

## **Annexe A1: Description des systèmes techniques in situ**

<b>1. Procédés hydrauliques.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Prélèvement de phase .....</b>	<b>3</b>
1.1.1 Pompage sélectif (LNAPL).....	3
1.1.2 Pompage sélectif (DNAPL) .....	6
1.1.3 Slurping.....	9
<b>1.2 Procédés hydrauliques utilisant de l'eau.....</b>	<b>12</b>
1.2.1 Pompage et traitement.....	12
1.2.2 Infiltration verticale / infiltration dans la nappe .....	15
1.2.3 Circulation d'eau souterraine .....	18
<b>1.3. Procédés d'assainissement passifs.....</b>	<b>22</b>
1.3.1 Parois filtrantes traversées sur toute leur surface .....	22
1.3.2 Parois filtrantes à écoulement souterrain dirigé .....	25
1.3.3 Bioscreen .....	28
<b>2. Procédés pneumatiques.....</b>	<b>31</b>
2.1 Aspiration de l'air interstitiel .....	31
2.2 Slurping .....	34
2.3 Strippage in situ.....	35
<b>3. Procédés de mobilisation.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1 Procédés physiques de mobilisation .....</b>	<b>38</b>
3.1.1 Injection d'air chaud ou de vapeur .....	38
3.1.2 Sources de chaleur solides.....	41
3.1.3 Divers procédés physiques de mobilisation .....	44
3.1.4 Fracturation.....	47
3.1.5 Électroosmose .....	49
<b>3.2 Procédés chimiques de mobilisation.....</b>	<b>51</b>
3.2.1 Lessivage à l'alcool.....	51
3.2.2 Lessivage avec un agent tensioactif .....	53
<b>4. Procédés biologiques .....</b>	<b>55</b>
4.1 Infiltration verticale avec ajout de substances nutritives .....	55
4.2 Aérobisation d'anciens lieux de stockage de déchets.....	57
4.3 Bioventilation .....	60
4.4 Procédés par oxydation dans l'eau souterraine .....	62
4.5 Biobarbotage .....	64
4.6 Biostimulation au méthane .....	67
4.7 Réduction au moyen de substances organiques .....	69
4.8 Atténuation naturelle dynamisée .....	71

<b>5. Procédés chimiques .....</b>	<b>74</b>
5.1 Oxydation chimique in situ (ISCO).....	74
5.2 Réduction chimique in situ (ISCR).....	77
5.3 Nanofer.....	80
<b>6. Procédés d'immobilisation.....</b>	<b>83</b>
6.1 Immobilisation in situ .....	83
6.2 Vitrification in situ.....	86

# 1. Procédés hydrauliques

## 1.1 Prélèvement de phase

### 1.1.1 Pompage sélectif (LNAPL)

<b>Autres désignations</b>
<p>Extraction de phase</p> <p>En anglais: liquid phase extraction, oil skimming. À ne pas confondre avec l'extraction biphasé (dual phase extraction, DPE) ou multiphasé (multi phase extraction, MPE), dans lesquelles l'eau souterraine est captée par un procédé pneumatique avec l'air interstitiel, mais aussi avec la phase libre (cf. «Slurping» au point 1.1.3).</p>
<b>Principe</b>
<p>Un polluant sous la forme de phase libre qui flotte à la surface de l'eau souterraine (moins dense que l'eau) ou qui est descendue sur le plancher de l'aquifère (plus dense que l'eau) est capté au moyen d'une installation appropriée. La phase flottante est nommée LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid) et celle qui a migré vers le bas DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid).</p>
<b>Fonctionnement</b>
<p>La phase libre qui flotte dans un puits ou à la surface de l'eau souterraine peut être soit pompée, soit aspirée avec des matériaux (acier, textile, matière plastique) auxquels elle adhère préférentiellement. La phase libre accumulée au fond de l'aquifère doit être pompée en appliquant des techniques spéciales décrites au point 1.1.2.</p> <p>Dans le pompage sélectif, la phase libre est extraite séparément de l'eau souterraine. La séparation peut être opérée soit par voie physique, en exploitant la différence de densité entre les liquides, soit en utilisant un filtre qui, par exemple, laisse passer l'huile minérale (filtre oléophile) mais pas l'eau. Ce dernier procédé tire également profit du phénomène d'adhésion, l'huile minérale étant extraite après avoir adhéré à des bandes d'acier ou à des matières similaires à des textiles (écrémeurs).</p> <p>Il est déconseillé de capter conjointement l'eau souterraine et l'huile avec une seule pompe, car son rotor forme alors des émulsions stables impossibles ou difficiles à défaire.</p>
<b>Description technique</b>
<p>L'<b>extraction de phase</b> est réalisée en pompant uniquement la phase flottante accumulée dans un puits. On peut rabattre l'aquifère pour que la phase s'écoule vers le puits (extraction biphasé) ou se passer du rabattement lorsque que la phase a une épaisseur suffisante (extraction monophasé).</p> <p>Des <b>filtres oléophiles</b> sont installés sur des bouées flottantes ou dans des pompes afin de pomper l'huile seule. Il existe des pompes immergées à deux compartiments séparés dont les entrées sont équipées, respectivement, de filtres oléophiles et de filtres hydrophiles (pompes à refoulement).</p> <p>Les <b>écrémeurs à bandes</b> constituent l'un parmi de nombreux types d'écumeurs d'huile. Dans le cas de l'écumeur à bandes adsorbantes immergées, l'huile est extraite au moyen de bandes sans fin en acier, en textile ou en matière plastique à laquelle l'huile adhère, contrairement aux</p>

<p>liquides aqueux. La bande d'écémage plonge dans le liquide, capture l'huile et la remonte après avoir franchi une poulie immergée. L'huile est alors séparée mécaniquement de la bande par un racleur, puis elle est acheminée dans un récipient collecteur.</p>	
<p><b>Modalités d'application</b></p>	
Milieu concerné	Phase libre de LNAPL.
Polluants visés	Tous les polluants en phase liquide libre, peu solubles dans l'eau et flottant à sa surface en raison de leur densité inférieure, c'est-à-dire essentiellement des polluants organiques (huile, essence, diesel, solvants non chlorés tels que BTEX, etc.).
Géologie/hydrogéologie	Aquifère perméable, en règle générale à porosité d'interstice; bonne connaissance des caractéristiques hydrogéologiques et hydrauliques.
<p><b>Limites d'application</b></p>	
<p>Procédé uniquement applicable à une phase libre flottante.</p>	
<p><b>Infrastructure requise</b></p>	
<p>Les principaux éléments techniques se trouvent dans le puits. Celui-ci doit être surmonté d'un emplacement plat pour poser les citernes collectrices et le système d'alimentation en électricité. Les écrémeurs doivent être complétés par un dispositif de séparation. Si de l'eau contaminée est aspirée en parallèle, il faut monter une installation de traitement qui remplisse les exigences requises.</p>	
<p><b>Suivi</b></p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi du niveau de la phase libre et de l'eau souterraine.</li> <li>▪ Enregistrement des quantités pompées.</li> <li>▪ Suivi de la teneur en eau de la phase libre pompée.</li> </ul>	
<p><b>Variantes</b></p>	
<p>Les variantes de ce procédé correspondent essentiellement:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ au mode de séparation de la phase libre et de l'eau souterraine avant le pompage;</li> <li>▪ au mode d'acheminement de la phase libre dans le puits de pompage;</li> <li>▪ au type de matériau adhésif.</li> </ul> <p>Il est possible de renforcer l'extraction de la phase libre en recourant à un système sous vide, jusqu'à une profondeur de 8 à 9 mètres (cf. «Slurping» au point 1.1.3). Il est également possible de chauffer la phase libre pour améliorer son écoulement et accroître son afflux dans le puits.</p>	

**Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires**

Les combinaisons de procédés suivantes sont usuelles:

- extraction de l'eau souterraine (pompage et traitement) et extraction de la phase libre dans un puits commun;
- combinaison du pompage sélectif avec un puits de circulation d'eau souterraine;
- combinaison envisageable avec tous les autres procédés in situ, mais le pompage sélectif sera mis en œuvre de préférence avant eux.

**Évaluation et expérience pratique**

Procédé éprouvé, souvent appliqué pour éliminer une phase libre flottante. Installations posant peu de problèmes, simples à exploiter. Procédé très efficace, car les polluants peuvent être capturés sous forme concentrée et en grandes quantités.

**Stade de développement et état du marché**

Les procédés d'extraction de phase de LNAPL correspondent à l'état de la technique. Des sociétés suisses en conçoivent et en mettent en œuvre.

## 1.1.2 Pompage sélectif (DNAPL)

Autres désignations	
Aspiration ou prélèvement de phase lourde ou dense (DNAPL). En anglais: removal of DNAPL (from DNAPL pools).	
Principe	
Un polluant sous la forme de phase lourde, dense, se trouve à la base d'un aquifère, où il s'accumule sur une couche de terrain peu perméable. Cette phase est généralement à une profondeur telle qu'elle ne peut plus être aspirée depuis le haut par voie pneumatique, en créant une dépression. Il faut utiliser des pompes immergées dans des puits profonds ou des techniques particulières de relevage.	
Fonctionnement	
Le DNAPL à éliminer peut par exemple être pompé à la base de la crépine équipant un puits de pompage – si la couche de phase dense libre est suffisamment épaisse – ou selon le principe de la pompe à jet d'eau (technique d'aspiration à grande profondeur). On utilise également des systèmes sous pression dans lesquels la phase dense pénètre dans un récipient au travers d'un filtre avant d'être remontée à la surface dans des tubes sous l'effet d'air comprimé.	
Description technique	
<p><b>Pompe immergée</b>, alimentée électriquement, applicable à une profondeur quasiment illimitée, appropriée pour pomper une phase dense pure, car les pompes centrifuges génèrent la formation d'émulsions difficiles à défaire.</p> <p><b>Pompe pneumatique</b>, utilisée pour extraire de l'eau souterraine pure ou mélangée avec une phase légère ou lourde. Elle est couplée à un écrémeur qui donne un signal d'enclenchement en arrivant en fin de course. Le liquide remplit la pompe par le haut ou par le bas selon la version, puis il est refoulé vers la surface à partir de la pompe pleine via des vannes actionnées à l'air comprimé.</p> <p><b>Pompe à pistons</b>, composée d'une unité d'entraînement à air comprimé, de tiges, du piston de la pompe et d'une vanne de réglage du débit. L'unité d'entraînement comprend un cylindre fonctionnant à l'air comprimé et un piston réversible. Le piston réversible est relié au piston de la pompe dans le corps de cette dernière, par l'intermédiaire des tiges. Le débit de la phase dense est commandé par des clapets antiretour automatiques placés dans le corps de la pompe.</p> <p><b>Pompe à jet d'eau</b>, dans laquelle un jet d'eau génère une dépression qui attire la phase dense, puis l'entraîne vers le haut.</p>	
Modalités d'application	
Milieux concernés	Phase dense avec ou sans eau souterraine.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tous les polluants liquides plus denses que l'eau (DNAPL), tels qu'huiles de goudron (HAP), produits de conservation du bois (créosotes), huiles contenant des PCB et hydrocarbures halogénés.</li> </ul>

Géologie/hydrogéologie	Aquifère perméable, en règle générale à porosité d'interstice; bonne connaissance des conditions hydrogéologiques et hydrauliques; emplacement et extension de la phase dense souvent difficiles à déterminer; procédé problématique dans les réseaux de fissures des roches consolidées.
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les DNAPL en couches très minces sont difficiles à localiser, à accumuler et à pomper.</li> <li>▪ Les DNAPL situés dans des fissures en roche consolidée ne peuvent guère être localisés et mobilisés.</li> <li>▪ Les pompes et les systèmes de relevage doivent être choisis en fonction de l'emplacement et de l'épaisseur des couches de phases libres.</li> </ul> <p>Plusieurs fabricants ont développé leurs propres systèmes de pompage ou de refoulement fonctionnant de manière hydraulique ou pneumatique. Les plus aisées à assainir sont les cuvettes dans lesquelles de grandes quantités de phase dense se sont accumulées.</p>	
<b>Infrastructure requise</b>	
Assise plane et accès aux éléments hors-sol de l'installation, alimentation en électricité et en eau, citernes, éventuellement protection contre les explosions, évacuation de l'eau souterraine épurée si elle est pompée avec la phase polluante. Épuration des gaz effluents en cas de pompage par voie pneumatique. Dispositif de séparation de la phase dense et de l'eau. Protection contre les incendies si le liquide pompé est inflammable et combustible.	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de la pression dans le système de relevage.</li> <li>▪ Suivi de l'épaisseur de la phase dense.</li> <li>▪ Suivi des installations de séparation et de traitement.</li> <li>▪ Éventuellement mesures portant sur les atmosphères explosives.</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
<p>Les variantes de ce procédé correspondent essentiellement:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ à la profondeur et à l'extension de la phase dense;</li> <li>▪ à la technique de relevage prévue.</li> </ul> <p>On peut aussi opter pour l'aspiration directe par dépression lorsque la phase dense se trouve à une profondeur inférieure à 8 m.</p>	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
Le prélèvement d'une phase dense peut être combiné avec une mesure de pompage et traitement. Il est aussi possible de le combiner avec d'autres mesures d'assainissement in situ.	
<b>Évaluation et expérience pratique</b>	
L'aspiration d'une phase dense est techniquement très complexe et l'installation nécessaire est difficile à exploiter. Les expériences les plus nombreuses en la matière devraient concerner des phases d'huile de goudron, car ce cas de figure est relativement fréquent.	

**Stade de développement et état du marché**

Bien que quelques installations opérationnelles correspondent à l'état de la technique, la conception et la mise en œuvre des systèmes devraient être confiées à des spécialistes et à des sociétés expérimentées dans le traitement de phases denses. Il en existe dans quelques pays d'Europe.

### 1.1.3 Slurping

<b>Autres désignations</b>
<p>Aspiration de phase.</p> <p>En anglais: slurping, bioslurping, extraction multiphase.</p>
<b>Principe</b>
<p>Un polluant sous la forme de phase libre qui flotte à la surface de l'eau souterraine est capté par voie pneumatique, en créant une dépression, puis il est séparé de l'air entraîné avec lui. En règle générale, de l'eau de la nappe, de l'eau interstitielle et de l'air interstitiel sont aspirés simultanément. L'air et l'eau interstitiels peuvent déjà être épurés biologiquement dans le sous-sol même (bioslurping). L'eau de la nappe pompée en même temps peut aussi être traitée en surface.</p>
<b>Fonctionnement</b>
<p>La phase libre flottante est aspirée avec l'air interstitiel (contaminé), puis ceux-ci sont à nouveau séparés en phase liquide et en phase gazeuse hors du puits d'extraction. La phase gazeuse doit être épurée avant d'être rejetée dans l'atmosphère. L'eau de la nappe, souvent aspirée simultanément, doit également être séparée et épurée.</p> <p>On parle de bioslurping lorsque l'aspiration de l'air interstitiel suscite une épuration biologique in situ de la zone insaturée du sol et éventuellement de l'eau interstitielle qu'il contient.</p>
<b>Description technique</b>
<p>Les puits de slurping sont crépinés au-dessus de la phase polluante jusqu'à l'intérieur de l'aquifère. Un tube d'aspiration ouvert à la base est placé à l'intérieur du tubage. Il peut être déplacé verticalement, de manière manuelle ou automatique, afin d'obtenir le rapport optimal entre l'eau, l'air et la phase polluante libre captés.</p> <p>Un générateur de vide crée une dépression permettant d'aspirer violemment («to slurp» signifie «boire à grand bruit») un mélange d'eau souterraine, d'air interstitiel et de phase polluante légère flottante. Les phases liquides et la phase gazeuse sont à nouveau séparées dans l'installation hors-sol. L'air interstitiel est séparé des liquides dans un premier stade (récipient à dépression), puis l'air effluent est épuré en passant à travers un filtre à charbon actif, tandis que les liquides sont différenciés dans un séparateur d'huile et d'eau. L'huile qui surnage est collectée dans une citerne et transportée hors du site. L'eau souterraine est épurée puis réinfiltrée ou évacuée.</p> <p>L'apport d'air ambiant dans le compartiment de sol soumis à l'aspiration entraîne de l'oxygène susceptible de favoriser des processus de biodégradation. Des substances nutritives peuvent être injectées en plus.</p>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	Phase libre, air interstitiel contaminé.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tous les polluants liquides qui flottent à la surface de l'eau en se mélangeant très peu ou pas du tout avec elle (huile, essence, diesel, solvants non halogénés);</li> <li>▪ polluants organiques volatils dissous dans l'eau interstitielle (HCCV, CFC, HAP, phénols, BTEX et autres composés, en particulier organochlorés).</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Aquifère perméable, en règle générale à porosité d'interstice; bonne connaissance des conditions hydrogéologiques et hydrauliques.
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Distance maximale de 8 m entre le sol et la nappe.</li> <li>▪ Une distance sol-nappe inférieure peut aussi s'avérer problématique lorsque des courtscircuits pneumatiques risquent de se produire.</li> <li>▪ Le bioslurping ne convient pas aux polluants peu biodégradables.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
Peu d'exigences: assise plane pour les éléments hors-sol de l'installation et pour les citernes collectrices, accès, alimentation en électricité et en eau.	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de la dépression.</li> <li>▪ Suivi du niveau de la nappe et de la phase libre.</li> <li>▪ Suivi des quantités d'air aspirées.</li> <li>▪ Éventuellement mesure de paramètres caractéristiques de la biodégradation (p. ex. concentration de CO<sub>2</sub> dans l'air interstitiel).</li> <li>▪ Suivi des installations de séparation et d'épuration.</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
<p>Les variantes de ce procédé correspondent essentiellement:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ au mode de captage de l'air;</li> <li>▪ au type d'influence sur les processus de biodégradation;</li> <li>▪ à la volatilité de la phase liquide libre aspirée.</li> </ul>	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
<p>Bioslurping: combinaison avec des procédés d'aspiration de l'air interstitiel et de stimulation de l'épuration biologique (préalable) de l'air interstitiel ou de l'eau interstitielle.</p> <p>Combinaison avec un procédé de pompage et traitement.</p>	

**Évaluation et expérience pratique**

L'extraction biphasé et l'extraction multiphasé sont des procédés connus et éprouvés pour capter conjointement de l'air interstitiel et de l'eau souterraine. Elles conviennent très bien pour extraire en même temps des phases polluantes flottantes, même en fines couches.

**Stade de développement et état du marché**

Le slurping correspond à l'état de la technique. La conception et l'aménagement d'installations sont bien établis en Suisse.

## 1.2 Procédés hydrauliques utilisant de l'eau

### 1.2.1 Pompage et traitement

Autres désignations	
<p>Captage et épuration d'eau souterraine.</p> <p>En anglais: pump+treat, groundwater extraction and treatment.</p>	
Principe	
<p>Des mesures hydrauliques visant à capter et à épurer l'eau souterraine sont mises en œuvre pour prévenir des émissions polluantes (empêcher l'extension d'une contamination de l'eau souterraine) et pour éliminer des polluants présents dans l'eau souterraine (décontaminer l'aquifère).</p>	
Fonctionnement	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La mesure hydraulique proprement dite consiste à capter, à pomper et éventuellement à réinjecter de l'eau souterraine. L'eau souterraine polluée est généralement épurée sur site par séparation, par dégradation ou par transformation des polluants qu'elle contient (cf. annexe A2).</li> <li>▪ Le captage d'eau souterraine provoque un rabattement de la nappe phréatique selon la quantité d'eau pompée et les caractéristiques de l'aquifère. Il en résulte un impact à court, moyen ou long terme sur le régime hydrologique d'un vaste périmètre, qui ne devrait pas être préjudiciable.</li> </ul>	
Description technique	
<p>Les puits de captage d'eau souterraine sont généralement construits verticalement. Dans ces ouvrages (p. ex. puits gravitaires ou en sous-pression), le captage d'eau génère un cône de rabattement et le gradient de pression résultant provoque un afflux d'eau vers le puits. Celui-ci ne devrait être crépiné que dans la partie de l'aquifère dont l'eau doit être retirée. Dans certaines configurations, un puits multiniveau permet de capter de l'eau souterraine à différentes profondeurs sous un même emplacement.</p> <p>Il est possible d'abaisser en plus la pression dans le tubage pour améliorer le débit, principalement dans les sols fins.</p>	
Modalités d'application	
Milieux concernés	Eau souterraine, phase libre (liquide).
Polluants visés	Polluants organiques et inorganiques solubles dans l'eau ainsi que polluants organiques liquides insolubles dans l'eau (phase libre).
Géologie/hydrogéologie	Zone saturée, sol perméable.

<b>Limites d'application</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ce procédé convient aux aquifères de perméabilité moyenne à élevée. En règle générale, il ne peut pas être appliqué lorsque le sol est très hétérogène ou anisotrope, et que la perméabilité varie donc fortement entre les différentes couches ou compartiments. Il en va de même lorsque les écoulements sont mal connus. L'application de ce procédé est également très délicate dans les aquifères en roche consolidée en raison du manque fréquent d'informations. Le déficit de connaissances sur la structure du sous-sol, et par conséquent sur les écoulements, peut amenuiser considérablement les possibilités de contrôler cette mesure d'assainissement.</li> <li>▪ Ce procédé ne convient pas ou convient mal aux polluants qui présentent une solubilité faible ou une tendance à la sorption marquée.</li> <li>▪ Le choix du système de pompage équipant le puits de captage diffère selon que les polluants sont dissous dans l'eau souterraine ou présents sous la forme de phase. Lorsqu'ils sont dissous, une seule pompe suffit pour extraire l'eau. Lorsqu'ils ne sont pas dissous, qu'ils se présentent donc sous la forme de phase à la surface ou au fond de la nappe, l'eau peut être captée soit avec la phase polluante (système monopompe), soit séparément (système multi-pompe). Dans le système monopompe, il faut tenir compte du fait que les pompes centrifuges peuvent générer des émulsions stables difficiles à défaire entre l'eau et la phase libre.</li> </ul>
<b>Infrastructure requise</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le captage de l'eau souterraine polluée nécessite les puits et les pompes décrits plus haut, suivis d'un dispositif de traitement de l'eau. Ces installations requièrent une assise plane accessible. L'alimentation en électricité et en eau claire doit être assurée. Il faut éventuellement installer des citernes, pour recueillir la phase libre, ainsi que des dispositifs de protection contre les incendies.</li> </ul>
<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de la réduction de la pollution de l'eau souterraine par analyse d'échantillons prélevés dans des piézomètres de contrôle, généralement placés en aval.</li> <li>▪ Suivi du niveau de la nappe phréatique.</li> <li>▪ Suivi des tassements dans les zones bâties.</li> <li>▪ Suivi de la qualité de l'eau restituée (canalisations, émissaire ou réinfiltration).</li> </ul>
<b>Variantes</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Puits à drains horizontaux:</b> ce type de puits comprend un ou plusieurs drains filtrants horizontaux reliés à un puits central, duquel l'eau captée est pompée. Sous l'effet du captage, le niveau d'eau dans le puits central est abaissé au-dessous de celui de la nappe libre. Le gradient de pression en résultant provoque un afflux d'eau souterraine vers le puits central à travers les drains horizontaux. L'eau souterraine peut aussi être extraite par un drainage, qui agit comme un barrage hydraulique partiel ou total selon sa profondeur.</li> <li>▪ <b>Tranchée drainante:</b> cette tranchée remplie de gravier filtrant, généralement placée dans le sous-sol perpendiculairement à l'écoulement de la nappe, a une perméabilité hydraulique supérieure à celle de l'aquifère. Il en résulte un rabattement de la nappe au voisinage de l'ouvrage et un afflux d'eau vers celui-ci. La tranchée peut être équipée de tuyaux de drainage. L'eau captée par les drains est collectée dans un puits, puis pompée pour être traitée.</li> <li>▪ <b>Drainage horizontal:</b> un tuyau de drainage est placé sous la surface de la nappe phréatique, perpendiculairement à la direction de l'écoulement. Il est enrobé de gravier filtrant. Le tuyau</li> </ul>

de drainage est relié à des fosses de pompage, où l'eau est collectée, puis pompée pour être traitée.
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Par rapport aux puits isolés, la mise en place de groupes ou de séries de puits, de systèmes de drainage ou d'une combinaison de ceux-ci sont susceptibles d'accroître l'efficacité de ce type de procédé. La réalisation d'ouvrages en amont ou en aval du site pollué (p. ex. rideau de palplanches, paroi étanche agissant comme une barrière verticale) ou l'implantation d'autres puits de captage à des endroits spécifiques permettent de diminuer la quantité d'eau contaminée à traiter.</li></ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
Procédé d'assainissement mis en œuvre très fréquemment avec succès. Il est reconnu par les autorités en charge de l'environnement à tous les échelons.
<b>Stade de développement et état du marché</b>
Les procédés de pompage et traitement correspondent à l'état de la technique. Comptant parmi les plus fréquemment appliqués pour assainir l'eau souterraine, ils sont souvent mis en œuvre avec succès en Suisse. Des bureaux techniques et des utilisateurs bénéficient d'une large expérience en la matière.

## 1.2.2 Infiltration verticale / infiltration dans la nappe

<b>Autres désignations</b>
<p>Lessivage, lessivage du sol, puits, tranchée ou installation d'infiltration, puits à drains horizontaux.</p> <p>En anglais: soil flushing, infiltration well, infiltration trench, horizontal well, infiltration system.</p>
<b>Principe</b>
<p>Les procédés hydrauliques in situ visant à épurer des secteurs contaminés dans la zone insaturée du sol combinent généralement le lessivage avec le pompage et traitement. Ils servent à:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ lessiver la zone insaturée du sol (infiltration);</li> <li>▪ restituer l'eau souterraine pompée et épurée (captage et réinfiltration).</li> </ul> <p>Par ailleurs, des procédés hydrauliques in situ peuvent être appliqués pour renforcer des mesures biologiques in situ (apport en substances nutritives et régulation du milieu).</p>
<b>Fonctionnement</b>
<p>Les polluants dissous ou solubles se trouvant dans la zone insaturée du sol ou dans la frange capillaire sont lessivés en appliquant des mesures spécifiques. À cet effet, de l'eau est introduite dans le sous-sol pour rincer le secteur contaminé, ce qui peut être fait selon divers procédés techniques. Lorsque les polluants lessivés ont atteint l'eau souterraine, celle-ci est captée, pompée, puis épurée (cf. «Pompage et traitement» au point 1.2.1).</p>
<b>Description technique</b>
<p>Les ouvrages permettant de lessiver la zone insaturée du sol peuvent être construits de différentes manières. Les procédés les plus utilisés sont énumérés ci-après. En règle générale, l'eau pompée et épurée peut être réutilisée pour l'infiltration dans le sol.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Puits d'infiltration:</b> cf. «Pompage et traitement» au point 1.2.1.</li> <li>▪ <b>Tranchée d'infiltration:</b> elle peut remplacer le puits d'infiltration lorsque la contamination est peu profonde et que le sous-sol est perméable. L'eau de lessivage est alors répartie directement à partir de la surface, via une ou plusieurs tranchées d'infiltration ou un bassin d'infiltration s'étendant sur toute l'aire à lessiver. Les tranchées sont remplies de matériel perméable (<math>k_f &gt; 10^{-3}</math> m/s) et équipées de drains d'infiltration, puis recouvertes si nécessaire. Un puits de captage permet de pomper l'eau souterraine polluée pour l'épurer.</li> <li>▪ <b>Puits à drains horizontaux et installation d'infiltration:</b> une installation permettant d'introduire l'eau de lessivage et de la répartir horizontalement est aménagée dans la zone insaturée, au-dessus de la contamination. L'eau polluée est captée dans des drains horizontaux situés sous le secteur contaminé et acheminée vers un puits collecteur, d'où elle est pompée pour être traitée.</li> </ul>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	Eau interstitielle, sol, air interstitiel.
Polluants visés	Polluants très solubles dans l'eau, hydrocarbures mobilisables.
Géologie/hydrogéologie	Zone insaturée, perméabilité élevée, sols sablo-graveleux.
Autres conditions requises	Tranchée d'infiltration: libre accès à la surface d'infiltration (pas de dalle, ni de voie de circulation).
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le lessivage («soil flushing») convient à l'assainissement de petites pollutions de sols de perméabilité moyenne à élevée (<math>k_f &gt; 10^{-4}</math> m/s). En règle générale, ce procédé n'est pas approprié lorsque le sol est très hétérogène ou anisotrope, et que la perméabilité varie donc fortement entre les différentes couches ou compartiments ou à l'intérieur de ceux-ci, car les écoulements risquent alors d'être aléatoires.</li> <li>▪ Lorsque la mobilité des polluants dans la zone insaturée du sol est faible (solubilité faible, tendance importante à l'adsorption), ce procédé ne peut pas être appliqué efficacement.</li> <li>▪ L'eau de lessivage risque de contourner les secteurs peu perméables sans en extraire les polluants.</li> <li>▪ Il est nécessaire de connaître précisément les caractéristiques du terrain pour pouvoir atteindre les buts de l'assainissement moyennant un coût et un délai raisonnables.</li> <li>▪ Quelle que soit la variante appliquée, il faut éviter qu'après le lessivage l'eau infiltrée atteigne la zone d'appel du puits de captage, propageant sournoisement des contaminants.</li> <li>▪ Ce type de mesure n'est généralement pas autorisé dans la zone d'alimentation des captages d'eau potable.</li> </ul>	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de la qualité et de la quantité de l'eau de lessivage introduite et captée.</li> <li>▪ Suivi du niveau de la nappe phréatique.</li> <li>▪ Suivi des tassements dans les zones bâties.</li> <li>▪ Suivi du débit d'infiltration de l'installation, pour identifier à temps un colmatage.</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Évacuation de l'eau traitée dans un émissaire ou dans les égouts et réinfiltration d'eau claire.</li> <li>▪ Les processus biologiques peuvent être stimulés par l'adjonction de substances nutritives (p. ex. agents tensioactifs, alcool) ou par régulation du milieu (p. ex. température, enrichissement en oxygène).</li> </ul>	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
Ce procédé ne peut être appliqué qu'en combinaison avec une mesure de pompage et traitement. Il peut aussi être combiné avec un assainissement biologique in situ (voir ci-dessus).	

**Évaluation et expérience pratique**

Ce procédé d'assainissement a été mis en œuvre de diverses manières avec succès pour épurée la zone insaturée du sol.

**Stade de développement et état du marché**

Ce procédé est éprouvé en Suisse également, où il est proposé par divers bureaux techniques et entreprises d'assainissement.

### 1.2.3 Circulation d'eau souterraine

<p><b>Autres désignations</b></p>
<p>Circuit d'eau souterraine in situ, puits de circulation d'eau souterraine. Forme particulière: puits d'évaporation à basse pression (cf. ci-après).</p> <p>En anglais: groundwater circulation well.</p>
<p><b>Principe</b></p>
<p>Ce dispositif hydraulique d'assainissement in situ vise à épurer la zone partiellement ou totalement saturée du sol. L'eau souterraine se trouvant dans la zone d'action du puits est mise en mouvement dans le circuit et transporte les polluants dissous ou mobiles vers le puits. Tous les types de procédés d'épuration peuvent être intégrés en surface dans le circuit (strippage, charbon actif, biofiltre, échange d'ions, etc.) La circulation d'eau peut aussi être utilisée pour transporter des substances nutritives, du charbon actif colloïdal et de l'oxygène destiné à stimuler l'activité biologique et pour véhiculer des produits chimiques oxydants ou réducteurs (p. ex. nano-fer, cf. point 5.3). Les écoulements dirigés vers le puits renforcent l'accumulation et l'extraction des LNAPL et des DNAPL dans le puits, en fonction de la direction de l'écoulement.</p> <p>Le puits d'évaporation à basse pression est une forme particulière de ce procédé. Son fonctionnement correspond à celui d'un puits de circulation d'eau souterraine à la différence que la circulation d'eau est générée par voie pneumatique en plus des pompes. La dépression créée à la tête du puits et l'ascension d'air qui en résulte entraînent l'eau vers le haut. Ce procédé a aussi pour effet de retirer, sous forme gazeuse, une grande partie des substances volatiles contenues dans cette eau.</p>
<p><b>Fonctionnement</b></p>
<p>Un ou plusieurs puits verticaux comprenant (au moins) deux tronçons filtrants sont implantés dans l'aquifère à épurer. Un obturateur («packer») les sépare en deux compartiments superposés. L'eau souterraine contaminée est transférée du compartiment inférieur au compartiment supérieur à l'aide d'une pompe, par exemple installée sous l'obturateur. La différence de potentiel ainsi générée induit une circulation d'eau horizontale et verticale externe autour du puits, de la crépine d'alimentation à celle de captage. Toutes les couches de l'aquifère parcourues par cette circulation sont rincées et épurées intensivement dans les directions horizontale et verticale. Il est possible d'imposer ou d'inverser le sens de rotation de l'écoulement en plaçant la pompe au-dessous du packer ou au-dessus de celui-ci, ou en inversant la direction d'aspiration et de compression de la pompe. La portée de la circulation d'eau et sa durée de rotation sont calculables en fonction des paramètres locaux. L'installation d'épuration est placée soit dans le puits, soit en surface. La circulation d'eau peut être utilisée pour transporter des substances nutritives ou des accepteurs d'électrons dans la zone saturée. Ainsi, l'aquifère lui-même fait office de réacteur.</p>
<p><b>Description technique</b></p>
<p>Un concept d'assainissement est élaboré sur la base des paramètres relevés sur le site (géologie, hydraulique, spectre de polluants, extension de la pollution, etc.). Il précise le nombre et l'agencement des puits d'assainissement ainsi que le procédé d'épuration à mettre en œuvre. La quantité d'eau pompée et le sens de rotation de l'écoulement sont adaptables à la répartition des polluants dans le sol et à l'avancement de l'assainissement. Si le puits de circulation d'eau souterraine</p>

comprend plus de deux tronçons filtrants, il peut générer plusieurs circuits, permettant de rincer sélectivement certains horizons. L'installation d'épuration appropriée est intégrée dans la circulation d'eau. Elle se trouve soit sous terre, dans une chambre aménagée dans le puits, soit en surface.	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	Eau souterraine, LNAPL, DNAPL.
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polluants organiques et inorganiques solubles dans l'eau;</li> <li>▪ polluants liquides non solubles dans l'eau.</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Zone saturée ou partiellement saturée, aquifère homogène ou hétérogène, parfois également aquifère en milieu fissuré.
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Seule l'eau souterraine contenue dans la zone sinistrée est mobilisée dans le circuit.</li> <li>▪ Le sol (y compris ses niveaux peu perméables) est lessivé dans les directions horizontale et verticale.</li> <li>▪ La même installation épure simultanément le sol, l'eau souterraine et la frange capillaire.</li> <li>▪ La nappe ne subit aucun rabattement.</li> <li>▪ Le sens de rotation de l'écoulement peut être adapté au spectre de polluants et à l'avancement de l'assainissement.</li> <li>▪ Tous les procédés d'épuration in situ et sur site peuvent être intégrés dans le circuit.</li> <li>▪ La circulation d'eau peut être utilisée pour introduire de l'oxygène, des substances nutritives, des produits chimiques, des nanoparticules, de l'énergie, etc.</li> <li>▪ La durée de rotation peut être déterminée en agissant sur le débit des pompes.</li> <li>▪ Tous les éléments de l'installation peuvent être installés dans une chambre souterraine aménagée dans le puits.</li> <li>▪ La mise en terre de l'installation permet d'éliminer le risque de gel et les émissions sonores.</li> <li>▪ Les frais d'exploitation et de maintenance sont modestes.</li> </ul>	
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ En cas d'aquifères superposés, chaque niveau doit être équipé de son propre puits d'assainissement.</li> <li>▪ Pour que la circulation atteigne une portée convenable, ce procédé ne devrait être appliqué qu'aux aquifères d'épaisseur supérieure à 4 m environ.</li> <li>▪ La présence d'inhomogénéités dans la structure géologique peut modifier ou empêcher le développement des boucles de circulation.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
<p>Le captage de l'eau souterraine polluée nécessite les puits et les pompes décrits plus haut, suivis d'un dispositif de traitement de l'eau. Ces installations requièrent une assise plane accessible. L'alimentation en électricité et en eau doit être assurée. L'injection de substances auxiliaires nécessite des citernes et des postes de dosage ainsi que des installations de sécurité appropriées.</p>	

<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Contrôle de la quantité d'eau en circulation.</li><li>▪ Contrôle de la teneur en polluants de l'eau brute et de l'eau épurée.</li><li>▪ Contrôle de l'évolution de la pollution dans la zone à assainir.</li><li>▪ Suivi des boucles de circulation, de leur extension, etc., dans des piézomètres de contrôle appropriés.</li></ul>
<b>Variantes</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ La mise en œuvre de puits d'évaporation à basse pression est une forme particulière de circulation d'eau souterraine dans lequel les boucles sont générées par une sous-pression en l'absence de pompes ou en combinaison avec des pompes.</li><li>▪ Il est possible d'extraire une partie de l'eau en circulation pour générer un gradient artificiel en direction du puits d'assainissement.</li><li>▪ Extraction de LNAPL et de DNAPL du puits de circulation d'eau souterraine.</li><li>▪ Puits de lessivage et de circulation: infiltration d'eau souterraine par des drains horizontaux ou par des tronçons filtrants verticaux situés dans la zone insaturée du sol.</li><li>▪ Puits de circulation réactif: injection de fer élémentaire (nanofe), etc., aux environs du puits, si bien que l'eau en circulation provoque une diminution du potentiel redox dans la zone d'action du puits.</li></ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Il existe une méthode scientifique reproductible pour calculer l'efficacité hydraulique des puits de circulation d'eau souterraine.</li><li>▪ Évaluation objective dans le cadre d'essais de modélisation à grande échelle (VEGAS) à Knielingen, par les universités de Stuttgart et de Karlsruhe.</li><li>▪ De nombreux tests hydrauliques, essais de traçage, etc., ont été effectués.</li><li>▪ Des puits de circulation d'eau souterraine sont mis en œuvre avec succès dans le monde entier dans de nombreux cas d'assainissement.</li></ul>

**Stade de développement et état du marché**

Des puits de circulation d'eau souterraine ont certes été exploités et suffisamment éprouvés, mais ils ne sont pas encore aussi largement répandus que les installations de pompage et traitement. Leur mise en œuvre demande une très bonne connaissance du sous-sol, si bien que la conception d'un système y recourant ne devrait être confiée qu'à des bureaux techniques expérimentés. Ce procédé fait l'objet de divers brevets, ce qui limite le nombre de fournisseurs.

Des puits d'évaporation à basse pression, formes particulières de puits de circulation d'eau souterraine, ont certes été exploités et suffisamment éprouvés, mais ils ne sont pas encore aussi largement répandus que les installations de pompage et traitement. Leur mise en œuvre demande une très bonne connaissance du sous-sol, si bien que la conception d'un système y recourant ne devrait être confiée qu'à des bureaux techniques expérimentés. Ce procédé fait l'objet de divers brevets, ce qui limite le nombre de fournisseurs. En règle générale, les fournisseurs ont apporté des modifications spécifiques et fait leurs propres expériences à son sujet.

## 1.3. Procédés d'assainissement passifs

### 1.3.1 Parois filtrantes traversées sur toute leur surface

<p><b>Autres désignations</b></p>
<p>Parois ou barrières réactives, épurantes ou adsorbantes. En anglais: continuous reactive barrier (CRB), permeable reactive barrier (PRB).</p>
<p><b>Principe</b></p>
<p>Interception passive – sans apport externe d'énergie – de l'écoulement d'eau souterraine polluée en aval d'un site contaminé en le faisant traverser un matériel réactif ou adsorbant introduit dans le sous-sol local sous la forme d'une barrière perméable («paroi») disposée perpendiculairement à l'écoulement.</p>
<p><b>Fonctionnement</b></p>
<p>L'action hydraulique de la paroi filtrante traversée sur toute sa surface réside dans le fait que l'écoulement d'eau souterraine contenant les polluants dissous ou liés à des particules traverse une paroi réactive. Il faut que les perméabilités du sous-sol et du matériel réactif concordent pour que la paroi filtrante soit traversée à coup sûr. C'est toujours le cas lorsque la perméabilité hydraulique de la paroi est supérieure à celle du sous-sol.</p> <p>L'action réactive peut consister à dégrader les polluants (p. ex. par déchloration), à les transformer (par absorption ou par précipitation) ou à les retenir dans la paroi épurante (p. ex. par adsorption). Elle dépend de la nature du matériel réactif, choisi en fonction des polluants contenus dans l'eau souterraine.</p>
<p><b>Description technique</b></p>
<p>La paroi filtrante traversée sur toute sa surface se compose de matériel réactif perméable (elle ne nécessite donc pas d'installation guidant passivement l'eau souterraine). Aucun contrôle détaillé (hormis les points usuels de contrôle de l'eau souterraine) ni intervention en cas de dysfonctionnement n'est prévu.</p> <p>La paroi filtrante est réalisée en introduisant un matériel réactif dans l'aquifère. Elle peut être construite en appliquant l'une des nombreuses techniques éprouvées du génie civil.</p> <p>Le matériel réactif est choisi de manière à obtenir une diminution de la pollution aussi complète que possible, tout en tenant compte de critères économiques. Les matériaux suivants, éprouvés dans la pratique, sont disponibles à cet effet:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ fer élémentaire (à valence zéro) induisant une déshalogénéation réductrice d'hydrocarbures halogénés (HCCV, CFC) ou la précipitation de chrome VI sous la forme de chrome III réduit;</li> <li>▪ charbon actif ou zéolites induisant l'adsorption de composés organiques (HAP, phénols, BTEX, HCCV et autres composés adsorbables);</li> <li>▪ calcaire influençant le pH et induisant la précipitation de certains métaux lourds et composés inorganiques;</li> <li>▪ matériel bioactif ou libérant des substances nutritives (p. ex. compost) susceptibles de renforcer la dégradation biotique de polluants dans l'eau souterraine.</li> </ul> <p>La perméabilité du matériel réactif doit être nettement plus élevée que celle du sous-sol environnant, pour éviter que la paroi filtrante ne soit contournée latéralement ou par en dessous</p>

et pour garantir que tout l'écoulement souterrain contaminé entre en contact avec la paroi épurante.	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieu concerné	Eau souterraine
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polluants organiques (HCCV, CFC, HAP, phénols, BTEX et autres, en particulier composés organochlorés);</li> <li>▪ polluants inorganiques (chrome VI et autres métaux lourds).</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Aquifère perméable (généralement à porosité d'interstice); bonne connaissance des conditions hydrogéologiques et hydrauliques.
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Il n'existe aucun matériel réactif permettant de diminuer la pollution considérée.</li> <li>▪ Le matériel réactif est épuisé ou colmaté trop rapidement et il ne peut pas être remplacé.</li> <li>▪ Les techniques de construction usuelles ne permettent pas d'atteindre la base de l'aquifère, ou alors à un prix disproportionné.</li> <li>▪ La nature ou la concentration des polluants ou la présence d'autres substances dans l'eau souterraine (notamment susceptibles de provoquer des précipitations lorsque l'eau souterraine est très dure) nécessitent un remplacement fréquent du matériel réactif ou la construction d'une nouvelle paroi.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
En règle générale, la paroi devrait être accessible depuis le haut sur toute sa longueur. Sinon, il n'est pas possible de prélever un échantillon dans le milieu réactif, ni de remplacer ce milieu. Des piézomètres de contrôle, qui doivent rester accessibles, sont installés en amont et en aval de la paroi. Son exploitation ne requiert pas d'alimentation en eau ni en électricité.	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi du fonctionnement hydraulique et de l'efficacité de l'épuration par un monitoring approprié de l'écoulement d'eau souterraine en amont, en aval et sur les côtés de la paroi épurante, ainsi qu'éventuellement à l'intérieur de la zone réactive.</li> <li>▪ Éventuellement, investigation directe des propriétés hydrauliques du matériel réactif et de sa réactivité dans le réacteur (requiert un dispositif spécial de prélèvement d'échantillons).</li> </ul>	

## Variantes

Les variantes de ce procédé consistent principalement à :

- guider l'écoulement d'eau souterraine, en combinaison avec des parois étanches (cf. point 1.3.2);
- installer des systèmes de puits fixes ou des récipients remplis de matériel réactif qui permettent de remplacer celui-ci.

D'autres variantes consistent à modifier la géométrie du matériel réactif inséré par rapport à une paroi réactive couvrant l'aquifère contaminé sur l'entier de sa largeur et de sa hauteur :

- parois suspendues sans insertion dans un horizon peu perméable;
- parois disjointes comprenant, par exemple, des rangées de colonnes réactives en position décalée, qui peuvent être mises en place par forage (pieux réactifs).

À l'avenir, il sera possible d'utiliser de nouveaux matériaux réactifs tels que substances à effet catalytique, qui en sont encore au stade du développement.

## Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires

Il est possible d'appliquer l'une derrière l'autre, dans la direction d'écoulement de l'eau souterraine, des parois remplies de matériaux réactifs différents qui agiront sur des polluants réagissant différemment.

## Évaluation et expérience pratique

Des parois réactives ont été réalisées sur de nombreux sites, notamment aux États-Unis, en Allemagne et en Autriche. Il s'agit principalement de barrières au fer (pollution par des HCCV) et de barrières au charbon actif. Une application est aussi connue en Suisse.

## Stade de développement et état du marché

L'utilisation de fer et de charbon actif dans des parois filtrantes peut déjà être considérée comme correspondant à l'état de la technique. Il ne faudrait néanmoins confier l'application de cette technique qu'à des bureaux techniques et à des fabricants expérimentés, car il s'agit d'une mesure d'assainissement relativement complexe, qui demande de prendre en compte de nombreux paramètres.

### 1.3.2 Parois filtrantes à écoulement souterrain dirigé

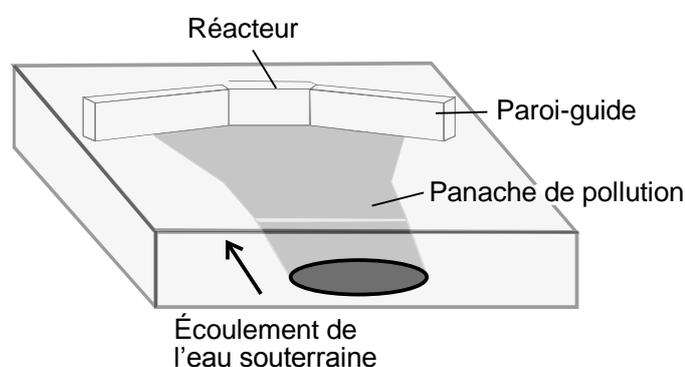
<b>Autres désignations</b>
<p>Parois filtrantes à écoulement guidé.</p> <p>En anglais: funnel and gate (F &amp; G-system), drain and gate-system, permeable reactive barrier (PRB).</p>
<b>Principe</b>
<p>L'objectif correspond à celui d'une paroi filtrante traversée sur toute sa surface (cf. point 1.3.1): épurer de l'eau souterraine polluée en aval d'un site contaminé en utilisant un matériel réactif introduit dans le sous-sol, perpendiculairement à l'écoulement, dans les zones perméables d'une paroi ou d'une barrière imperméable par ailleurs.</p>
<b>Fonctionnement</b>
<p>L'action hydraulique de la paroi filtrante à écoulement souterrain dirigé réside dans le fait que l'écoulement d'eau souterraine contenant les polluants dissous traverse le secteur perméable et réactif d'une barrière. Celle-ci se compose soit de parois-guides étanches («funnel»), soit d'un système de drainage très perméable («drain»), qui dirige l'écoulement contaminé ou le capte pour l'acheminer dans un réacteur in situ («gate»), généralement constitué d'un caisson perforé rempli de matériel réactif noyé dans un ballast meuble également perméable.</p> <p>Le milieu réactif peut dégrader les polluants (p. ex. par déchloration), comme dans le cas de la paroi filtrante traversée sur toute sa surface, ou les retenir dans le réacteur in situ. Son effet dépend donc de la nature du matériel réactif.</p> <p>La paroi filtrante à écoulement souterrain dirigé convient en particulier lorsqu'il faut remplacer le matériel réactif durant la période de fonctionnement prévue en raison de l'importance des concentrations ou de la nature des polluants et des autres substances contenues dans l'eau souterraine.</p>
<b>Description technique</b>
<p>Les parois filtrantes à écoulement souterrain dirigé se composent, comme mentionné précédemment, d'une paroi-guide ou d'un système de drainage et de la zone réactive proprement dite. Les parois-guides imperméables peuvent être construites en appliquant tous les procédés usuels de construction de parois étanches (cf. notamment l'aide à l'exécution de l'OFEV intitulée «Confinement des sites contaminés par des décharges»):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ parois moulées;</li> <li>▪ écrans minces;</li> <li>▪ rideaux de palplanches;</li> <li>▪ parois de pieux sécants;</li> <li>▪ parois construites par jet grouting;</li> <li>▪ parois en sol traité («mixed in place», MIP).</li> </ul> <p>Les techniques usuelles du génie civil peuvent aussi être appliquées pour réaliser les systèmes de drainage.</p> <p>Ici, contrairement au cas de la paroi filtrante traversée sur toute sa surface, la zone réactive revêt fréquemment la forme d'un puits, dans lequel on introduit le matériel réactif, qui peut être remplacé selon la construction de l'ouvrage.</p>

Le matériel réactif est choisi de manière à obtenir une diminution de la pollution aussi complète que possible, tout en tenant compte de critères économiques. Les matériaux suivants, éprouvés dans la pratique, sont disponibles à cet effet:

- fer élémentaire (à valence zéro) induisant une déshalogénéation réductrice d'hydrocarbures halogénés (HCCV, CFC) ou la précipitation de chrome VI et d'autres métaux lourds;
- charbon actif ou zéolites induisant l'adsorption de composés organiques (HAP, phénols, BTEX, HCCV et autres, en particulier composés organochlorés);
- calcaire induisant la précipitation et l'immobilisation de métaux lourds et de composés inorganiques;
- matériel bioactif ou libérant des substances nutritives (p. ex. compost) susceptibles de renforcer la dégradation biotique de polluants ou la précipitation réductrice dans l'eau souterraine.

Des contrôles détaillés sont généralement possibles selon le mode de construction des puits.

### Schéma du procédé



### Modalités d'application

Milieu concerné	Eau souterraine
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polluants organiques (HCCV, CFC, HAP, phénols, BTEX et autres, en particulier composés organochlorés);</li> <li>▪ polluants inorganiques (Cr VI et autres métaux lourds).</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Aquifère perméable (généralement à porosité d'interstice); bonne connaissance des conditions hydrogéologiques et hydrauliques.

### Limites d'application

- Il n'existe aucun matériel réactif permettant de diminuer la pollution considérée.
- Les techniques de construction usuelles ne permettent pas d'atteindre la base de l'aquifère, ou alors à un prix disproportionné.
- La nature ou la concentration des polluants ou la présence d'autres substances dans l'eau souterraine (notamment susceptibles de provoquer des précipitations lorsque l'eau souterraine est très dure) nécessitent un remplacement fréquent du matériel réactif.

<b>Infrastructure requise</b>
Il faut pouvoir accéder aux puits pour suivre l'épuration et remplacer le matériel réactif. Cet accès doit rester libre. L'exploitation de ces parois ne requiert pas d'alimentation en eau ni en électricité.
<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi du fonctionnement hydraulique et de l'efficacité de l'épuration par un monitoring approprié de l'écoulement d'eau souterraine en amont, en aval et sur les côtés des parois-guides, ainsi qu'éventuellement à l'intérieur de la zone réactive.</li> <li>▪ Éventuellement, investigation directe des propriétés hydrauliques du matériel réactif et de sa réactivité dans le réacteur (requiert un dispositif spécial de prélèvement d'échantillons).</li> </ul>
<b>Variantes</b>
<p>Les variantes de ce procédé consistent principalement à:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ installer plusieurs réacteurs le long de la paroi filtrante;</li> <li>▪ installer des systèmes réactifs à plusieurs étapes, en cas de mélange de polluants;</li> <li>▪ installer différents types de puits.</li> </ul> <p>Les parois filtrantes traversées sur toute leur surface (cf. point 1.3.1) constituent également des variantes de ce procédé.</p> <p>À l'avenir, il sera possible d'utiliser de nouveaux matériaux réactifs tels que substances à effet catalytique, qui en sont encore au stade de développement.</p>
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
Il est possible d'appliquer l'une derrière l'autre, dans la direction d'écoulement de l'eau souterraine, des parois remplies de matériaux réactifs différents qui agiront sur des polluants réagissant différemment.
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
<p>Des parois filtrantes à écoulement souterrain dirigé appliquant le principe du «funnel and gate» ont été réalisées sur plusieurs sites aux États-Unis, en Allemagne et en Autriche. Des systèmes de «drain and gate» ont été installés en Autriche.</p> <p>Nous ne disposons pas encore d'expérience pratique en Suisse. Mais les expériences faites à l'étranger peuvent y être transposées, car ce procédé combine des techniques de construction usuelles et mettent en œuvre des matériaux réactifs connus dans le traitement de l'eau.</p>
<b>Stade de développement et état du marché</b>
<p>L'utilisation de fer et de charbon actif et l'application de procédés impliquant des parois-guides et des puits peuvent être considérés comme correspondant à l'état de la technique.</p> <p>Il ne faudrait néanmoins confier l'application de cette technique qu'à des bureaux techniques et à des fabricants expérimentés, car il s'agit d'une mesure d'assainissement relativement complexe, qui demande de prendre en compte de nombreux paramètres.</p> <p>Le système du «funnel and gate» et certains types de réacteurs font l'objet de brevets.</p>

### 1.3.3 Bioscreen

<b>Autres désignations</b>
Biobarrière. En anglais: bio screen, bio barrier, multi barrier.
<b>Principe</b>
La biodégradation est stimulée en faisant transiter l'eau souterraine par une zone réactive jouant le rôle de barrière, qui peut revêtir diverses formes. On introduit dans la zone réactive soit du matériel perméable qui, par exemple, sert de source de carbone ou favorise l'implantation de microorganismes, soit certains substrats qui stimulent la dégradation microbienne des polluants.
<b>Fonctionnement</b>
Le bioscreen est tout à la fois un procédé d'assainissement passif et biologique. Dans cette technique, des substances favorisant la biodégradation de la pollution sont introduites dans le sous-sol perpendiculairement à l'écoulement de l'eau souterraine. La zone ainsi activée peut comporter une rangée de puits rapprochés et couvrir tout ou partie de la section du panache de pollution. L'effet obtenu dépend du matériel réactif choisi. Ce peut être du matériel organique qui largue du carbone et/ou favorise l'implantation de bactéries. Ou alors on stimule la dégradation aérobie en ajoutant de l'oxygène ou la dégradation anaérobie en ajoutant une substance réductrice (p. ex. hydrogène, mélasse, etc.).
<b>Description technique</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Une paroi complète ou partielle, destinée à être traversée par l'écoulement d'eau souterraine, est construite et remplie de matériel favorisant la biodégradation.</li><li>▪ Une rangée de puits rapprochés est introduite dans l'aquifère, à l'intérieur du panache de pollution, en direction perpendiculaire à l'écoulement de l'eau souterraine. Des récipients qui larguent continuellement de l'oxygène, des substances nutritives ou des donneurs d'électrons dans l'aquifère sont accrochés à ces puits. Ils doivent être remplacés périodiquement.</li><li>▪ Des substances nutritives et des donneurs d'électrons qui favorisent la biodégradation sont en outre injectés dans les zones réactives.</li></ul>

### Schéma du procédé

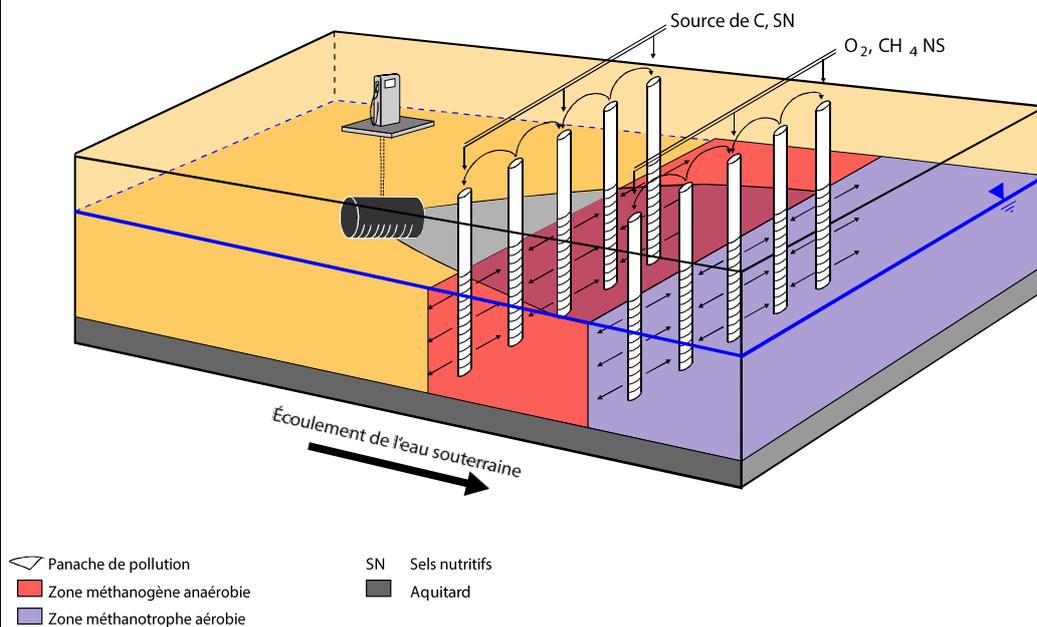


Abbildung Dr. Held, arcadis

### Modalités d'application

Milieus concernés	Eau souterraine, zone saturée.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polluants organiques biodégradables tels que HC aliphatiques ou aromatiques, HCP (diesel, huile de graissage), HAP (&lt;4 anneaux), phénols et alcools;</li> <li>▪ phosphates, sulfates, nitrates;</li> <li>▪ fluorures, HC volatils (BTEX), HCHV.</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Bonne connaissance des conditions hydrogéologiques et hydrauliques.

### Limites d'application

- Le passage à travers les zones réactives est trop court pour que la dégradation puisse être complète.
- L'aquifère est déjà chargé en substances consommant tellement de matériaux réactifs que ce procédé n'est plus économique.

### Infrastructure requise

Les sections de parois et les puits doivent être bien accessibles. Les installations d'injection nécessitent parfois des assises planes et des conduites d'alimentation.

<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Suivi de longue durée de l'effet épurateur par un monitoring approprié de l'eau souterraine pratiqué en amont, en aval et sur les côtés des puits.</li><li>▪ Suivi de l'activité biologique dans l'eau souterraine ou dans l'air interstitiel.</li><li>▪ Suivi des matériaux réactifs (épuiement).</li></ul>
<b>Variantes</b>
Les variantes de ce procédé concernent principalement: <ul style="list-style-type: none"><li>▪ l'agencement – latéral et vertical – des parois et des puits biologiquement réactifs;</li><li>▪ le nombre et le type des zones réactives.</li></ul>
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<p>Il est possible de combiner des procédés impliquant des matériaux de réactivités différentes introduits les uns derrière les autres dans le sens de l'écoulement de l'aquifère. On a aussi déjà mis en place des barrières multiples dont une section ou un puits favorise l'activité biologique liée à un polluant et une ou deux autres sections retiennent d'autres polluants (déshalogénation, précipitation, adsorption).</p> <p>Ce procédé peut être combiné avec des procédés hydrauliques ou d'autres procédés passifs.</p>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
<p>Différents types de biobarrières ont certes été éprouvés à l'échelle technique. Mais on ne dispose pas encore de renseignements sûrs au sujet de leurs effets à long terme et des résultats qu'elles permettent d'obtenir en raison de la longue durée nécessaire pour assainir les surfaces traitées. De plus, la charge polluante à épurer doit être relativement faible et ce procédé implique en règle générale un monitoring long et coûteux.</p> <p>On ne dispose en Suisse d'aucune expérience pratique concernant ce procédé.</p>
<b>Stade de développement et état du marché</b>
<p>Le procédé du bioscreen ne correspond pas encore à l'état de la technique. Il devrait être mis en œuvre uniquement par une entreprise expérimentée dans le domaine de l'assainissement ou suivi scientifiquement.</p>

## 2. Procédés pneumatiques

### 2.1 Aspiration de l'air interstitiel

<b>Autres désignations</b>
Extraction de l'air interstitiel. En anglais: soil vapor extraction (SVE).
<b>Principe</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Élimination de polluants volatils et/ou biodégradables présents dans le sol.</li> <li>▪ L'apport concomitant d'oxygène dans la zone insaturée du sol accélère en outre la biodégradation.</li> </ul>
<b>Fonctionnement</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'extraction contrôlée et dirigée de l'air contenu dans le sol (air interstitiel) permet d'éliminer les polluants volatils présents dans la zone insaturée.</li> <li>▪ L'aspiration provoque un afflux d'air riche en oxygène dans la zone insaturée, qui fait donc office de bioréacteur pour dégrader les polluants peu volatils (cf. «Bioventilation» aux points 4.5.2.3 du texte principal et 4.3 de la présente annexe A-1).</li> </ul>
<b>Description technique</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'air interstitiel est aspiré par des puits d'extraction spécialement adaptés à la géologie locale et à la répartition des polluants; des puits multiniveaux sont éventuellement nécessaires.</li> <li>▪ L'aspiration est contrôlée et régulée par une installation pilotable (p. ex. aspiration dynamique pulsée). La conception de l'extracteur d'air est adaptée à la perméabilité du sous-sol. Il peut être fait usage d'un compresseur à canal latéral, d'un compresseur centrifuge ou de pompes à vide.</li> <li>▪ L'air interstitiel pollué est épuré dans une installation de traitement appropriée (cf. annexe A-2).</li> <li>▪ Si des gaz combustibles sont aspirés (p. ex. BTEX, essence, méthane), l'installation doit être équipée de dispositifs anti-incendie et anti-explosion. Il y a lieu de respecter les prescriptions de sécurité en vigueur (p. ex. de la SUVA).</li> <li>▪ Les tuyaux d'aspiration doivent être conducteurs (p. ex. en acier) et être mis à terre pour éviter des décharges électrostatiques, et par conséquent l'apparition d'étincelles. Il en va de même pour l'installation technique.</li> <li>▪ Dans certaines conditions, une aspiration qui n'est ni régulée ni contrôlée peut provoquer un transfert de la pollution dans le sol ou vers l'eau souterraine.</li> </ul>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	Air interstitiel, zone insaturée au-dessus de l'eau souterraine.
Polluants visés	Polluants volatils et polluants peu volatils biodégradables (p. ex. HCCV, BTEX, essence, diesel, certains HAP, etc.)
Géologie/hydrogéologie	Zone insaturée, sous-sol sablo-graveleux ou limono-sableux.
Autres conditions requises	Accès dégagé.
<b>Limites d'application</b>	
<p>La perméabilité <math>k_f</math> devrait être supérieure à <math>10^{-6}</math> m/s. Lorsque le sol est très hétérogène, et que la perméabilité varie donc fortement au sein des différentes couches ou compartiments, il faudrait tester l'applicabilité du procédé et ses limites au moyen d'un essai pilote</p> <p>Si le point d'aspiration est trop proche de la surface, c'est surtout de l'air ambiant qui est capté, au lieu d'air interstitiel. Il est préférable que la surface soit constituée d'une couche de sol relativement compacte ou d'un niveau étanche artificiel (surface de circulation asphaltée, membranes géosynthétiques).</p>	
<b>Infrastructure requise</b>	
<p>Alimentation électrique, éventuellement connexion téléphonique, dispositif de pilotage, groupe aspirateur, puits d'aspiration, conduites de raccordement, installation de traitement de l'air effluent, éventuellement puits de contrôle dans la zone insaturée du sol, éventuellement étanchement de la surface au moyen de membranes géosynthétiques.</p> <p>Éventuellement dispositifs anti-incendie et anti-explosion en plus.</p>	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de la concentration des polluants et de la réduction de la pollution.</li> <li>▪ Tests de respiration.</li> <li>▪ Suivi de la zone d'influence (en anglais: radius of influence = ROI).</li> <li>▪ Monitoring de l'air interstitiel.</li> <li>▪ Suivi de la quantité d'air aspirée.</li> <li>▪ Repérage des baisses de pression.</li> <li>▪ Suivi des émissions à la sortie de l'installation d'épuration de l'air effluent.</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
<p>Aspiration de l'air interstitiel en continu, mais généralement moins efficace que l'aspiration dynamique pulsée lorsque les concentrations sont faibles.</p>	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Épuration de l'air aspiré nécessaire.</li> <li>▪ Stripping in situ (cf. point 4.3.3 du texte principal et 2.3 de la présente annexe A-1).</li> <li>▪ Pompage et traitement (cf. point 4.2.2.1 du texte principal et 1.2.1 de la présente annexe A-1).</li> </ul>	

**Évaluation et expérience pratique**

Ce procédé d'assainissement a largement fait ses preuves depuis plusieurs années à grande échelle technique et il est reconnu par toutes les autorités en charge de l'environnement.

**Stade de développement et état du marché**

L'aspiration de l'air interstitiel correspond à l'état de la technique. Ce procédé est mis en œuvre avec succès, en Suisse également, depuis plusieurs années pour réaliser des assainissements. Il devrait être appliqué par des bureaux techniques et par des entreprises expérimentés.

## 2.2 Slurping

<b>Autres désignations</b>
Cf. point 1.1.3 de la présente annexe A1.

## 2.3 Stripping in situ

<b>Autres désignations</b>
<p>Ventilation de l'eau souterraine.</p> <p>En anglais: air sparging, in situ air sparging (IAS).</p>
<b>Principe</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Injection d'air ambiant dans l'eau souterraine avec, la plupart du temps, aspiration simultanée de l'air interstitiel dans la zone insaturée.</li> <li>▪ Élimination de polluants volatils présents dans le sol et dans l'eau souterraine sous l'effet du stripping.</li> <li>▪ L'apport concomitant d'oxygène dans la zone saturée et dans la zone insaturée du sol accélère en outre la biodégradation.</li> </ul>
<b>Fonctionnement</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'injection contrôlée et dirigée d'air comprimé exempt d'huile dans l'aquifère permet de stripper les composants volatils présents dans la zone insaturée du sol avec l'air interstitiel extrait.</li> <li>▪ Grâce à l'apport d'oxygène, les composants peu volatils non susceptibles d'être strippés peuvent être dégradés biologiquement dans la zone saturée du sol et surtout dans la frange capillaire – pour autant qu'ils soient biodégradables –, la zone saturée faisant office de bioréacteur.</li> <li>▪ L'extraction contrôlée et dirigée de l'air contenu dans le sol (air interstitiel) permet d'éliminer les polluants volatils présents dans la zone insaturée.</li> <li>▪ L'aspiration provoque un afflux d'air riche en oxygène dans la zone insaturée, qui fait donc office de bioréacteur pour dégrader les polluants peu volatils.</li> </ul>
<b>Description technique</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'air comprimé exempt d'huile est injecté dans l'aquifère par des puits spécialement adaptés à la géologie locale et à la répartition des polluants, éventuellement par des puits multiniveaux.</li> <li>▪ La distribution de l'air (quantité, pression et durée) est la plus efficace lorsqu'elle est contrôlée et régulée par une installation pilotable.</li> <li>▪ L'air interstitiel est aspiré par des puits d'extraction spécialement adaptés à la géologie locale et à la répartition des polluants; des puits multiniveaux sont éventuellement nécessaires.</li> <li>▪ Un appareillage approprié doit permettre de contrôler et de réguler l'aspiration (aspiration dynamique pulsée). La conception de l'extracteur d'air est adaptée à la perméabilité du sous-sol.</li> <li>▪ L'air interstitiel pollué aspiré est épuré dans une installation de traitement approprié (cf. annexe A-2).</li> <li>▪ Dans certaines conditions, une aspiration de l'air interstitiel ou une injection d'air qui n'est ni régulée ni contrôlée peut provoquer un transfert de la pollution vers l'eau souterraine ou vers l'atmosphère.</li> </ul>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	Nappe souterraine, horizon aquifère suspendu, zone insaturée au-dessus des points d'injection.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polluants volatils et polluants peu volatils biodégradables (p. ex. HCCV, BTEX, essence, diesel, huile de chauffage, partiellement HAP);</li> <li>▪ ammonium, nitrites, fer, etc.</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Aquifère perméable à moyennement perméable, zone insaturée.
Autres conditions requises	Accès dégagé.
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La perméabilité <math>k_f</math> devrait être supérieure à <math>10^{-6}</math> m/s. Lorsque le sol est très hétérogène, et que la perméabilité varie donc fortement au sein des différentes couches ou compartiments, il faudrait tester l'applicabilité du procédé et ses limites au moyen d'un essai pilote. Il en va de même lorsque les écoulements sont mal connus et dans certains cas de nappes captives.</li> <li>▪ Dans le bassin d'alimentation des captages d'eau potable, à proximité immédiate de ceux-ci, ce procédé d'assainissement n'est généralement autorisé qu'au terme d'une étude détaillée.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
Alimentation électrique, éventuellement connexion téléphonique, dispositif de pilotage, compresseur, groupe aspirateur, puits d'aspiration et d'injection, conduites de raccordement, installation de traitement de l'air effluent, puits de contrôle dans la zone saturée et dans la zone insaturée du sol, éventuellement étanchement de la surface au moyen de membranes géosynthétiques.	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de la concentration des polluants et de la réduction de la pollution.</li> <li>▪ Tests de respiration.</li> <li>▪ Suivi de la zone d'influence (en anglais: radius of influence = ROI).</li> <li>▪ Suivi du niveau piézométrique.</li> <li>▪ Monitoring de la nappe aquifère.</li> <li>▪ Monitoring de l'air interstitiel.</li> <li>▪ Suivi de la quantité d'air aspirée.</li> <li>▪ Repérage des baisses de pression.</li> <li>▪ Suivi des émissions à la sortie de l'installation d'épuration de l'air effluent.</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
Ajout d'oxygène technique pur dans l'air injecté. Attention: il peut en résulter un danger d'explosion élevé selon la teneur en polluants.	

<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Aspiration de l'air interstitiel et épuration de l'air effluent (toujours) nécessaires.</li><li>▪ Possibilité de mettre en œuvre un pompage et traitement complémentaire.</li></ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
Ce procédé d'assainissement a largement fait ses preuves depuis plusieurs années à grande échelle technique et il est reconnu par toutes les autorités en charge de l'environnement.
<b>Stade de développement et état du marché</b>
Le strippage in situ, combiné avec l'aspiration de l'air interstitiel, correspond à l'état de la technique. Ce procédé est mis en œuvre avec succès, en Suisse également, depuis plusieurs années pour réaliser des assainissements. Il devrait être appliqué par des bureaux techniques et par des entreprises expérimentés.

## 3. Procédés de mobilisation

### 3.1 Procédés physiques de mobilisation

#### 3.1.1 Injection d'air chaud ou de vapeur

<b>Autres désignations</b>
<p>Aspiration de l'air interstitiel thermiquement assistée, injection d'air et de vapeur dans la zone saturée du sol.</p> <p>En allemand: thermisch unterstützte Boden-Luft-Absaugung (TUBA®), Dampf-Luft-Injektion in der gesättigten Bodenzone (DLI).</p> <p>En anglais: steam enhanced extraction (SEE), in situ thermal treatment (ISTT), In-situ Thermal Remediation (ISTR).</p>
<b>Principe</b>
<p>Des polluants sont mobilisés par introduction de chaleur dans le sol. Les polluants évaporés, sous forme gazeuse, sont aspirés avec l'air interstitiel. La chaleur est introduite par injection de vapeur, généralement dans l'air interstitiel, mais aussi dans l'eau souterraine.</p>
<b>Fonctionnement</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le terrain est échauffé sous l'effet de la condensation continue de la vapeur chaude injectée (50-100 °C) au contact de la matrice du sol froide (~10 °C), la vapeur transmettant son énergie (enthalpie de vaporisation) à la matrice du sol (introduction de chaleur par convection).</li> <li>▪ Le terrain est échauffé jusqu'à la température requise pour évaporer les polluants.</li> <li>▪ Le mélange d'air et de vapeur se propage radialement dans le plan horizontal jusqu'à ce que le terrain ait atteint la température d'évaporation. Les polluants évaporés sont transportés par l'air injecté jusqu'au puits d'extraction.</li> <li>▪ Les polluants sous forme gazeuse sont aspirés avec l'air interstitiel, puis celui-ci est épuré au moyen d'une installation usuelle (cf. «Aspiration de l'air interstitiel» au point 2.1).</li> <li>▪ Ce procédé accélère la mobilisation des polluants et l'aspiration de l'air interstitiel.</li> <li>▪ Ce procédé peut aussi être mis en œuvre pour échauffer l'eau souterraine afin d'y accroître l'extraction de polluants dissous et volatils par dégazage.</li> </ul>
<b>Description technique</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le mélange d'air et de vapeur est constitué et injecté au moyen d'un générateur de vapeur et d'un compresseur.</li> <li>▪ L'installation d'aspiration de l'air interstitiel (cf. point 2.1) comprend un échangeur de chaleur équipé d'un séparateur de condensat, un compresseur et un dispositif de traitement de l'air effluent (charbon actif, postcombustion thermique ou oxydation catalytique).</li> <li>▪ Un condenseur et un séparateur de phase placé en aval sont nécessaires pour épurer le condensat produit.</li> <li>▪ Un système de pompage de l'eau souterraine peut être installé pour fournir de l'eau, si cette dernière n'est pas trop réchauffée. Cette eau souterraine devrait être traitée. (Par exemple avec du charbon actif ou un strippeur)</li> </ul>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zone insaturée du sol, air interstitiel;</li> <li>▪ zone saturée du sol, eau souterraine.</li> </ul>
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polluants organiques volatils;</li> <li>▪ phase libre (LNAPL) dans certaines conditions.</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Roche consolidée (fissurée) ou terrain meuble de perméabilité bonne à moyenne (sable fin à limon).
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Couches peu perméables de grande épaisseur.</li> <li>▪ Polluants moyennement à peu volatils.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
Alimentation électrique, éventuellement connexion téléphonique, dispositif de pilotage, générateur de vapeur (avec alimentation électrique et eau), compresseur, groupe aspirateur, puits d'aspiration, conduites de raccordement, installation de traitement de l'air effluent, éventuellement puits de contrôle dans la zone saturée et dans la zone insaturée du sol, éventuellement étanchement de la surface au moyen de membranes géosynthétiques.	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de la concentration des polluants, ou de la réduction de la pollution, en analysant l'air interstitiel ainsi que l'eau souterraine prélevée dans des piézomètres.</li> <li>▪ Suivi de la zone d'influence (en anglais: radius of influence = ROI).</li> <li>▪ Monitoring de l'air interstitiel.</li> <li>▪ Suivi de la quantité d'air aspirée.</li> <li>▪ Repérage des baisses de pression.</li> <li>▪ Suivi des émissions.</li> <li>▪ Contrôle de la distance jusqu'aux éventuelles conduites enterrées voisines.</li> <li>▪ Mesure de la température dans le sol et dans l'eau souterraine.</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
Les entreprises d'assainissement proposent différentes variantes techniques, mais on ne connaît pas de variante du procédé même d'injection de vapeur. Cependant, la chaleur peut aussi être introduite dans le sol par des sources de chaleur solides (procédé THERIS <sup>®</sup> , cf. point 3.1.2) ou par un système de chauffage par résistance électrique (electrical resistance heating, ERH).	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ce procédé ne devrait être mis en œuvre qu'en aspirant simultanément l'air interstitiel.</li> <li>▪ L'aspiration de l'air interstitiel nécessite une installation d'épuration de l'air effluent.</li> <li>▪ Combinaison avec le procédé THERIS<sup>®</sup> (pour traiter de grandes épaisseurs de terrain).</li> <li>▪ Combinaison avec un procédé hydraulique (pour une mise en œuvre dans l'eau souterraine).</li> </ul>	

**Évaluation et expérience pratique**

L'injection d'air chaud ou de vapeur est un procédé rapide et bien contrôlable. Il a été appliqué à quelques reprises en Allemagne, en Autriche, en Grande-Bretagne, en Italie ainsi qu'en Suisse pour assainir des sites. Son grand avantage est de pouvoir être mis en œuvre à proximité immédiate de bâtiments ou sous ceux-ci sans en pénaliser l'exploitation. On connaît un exemple d'application réussie, en combinaison avec des sources de chaleur solides, dans le canton du Valais. L'échauffement y était assuré par des corps de chauffe dans la zone insaturée du sol et par injection de vapeur dans l'aquifère.

**Stade de développement et état du marché**

Le procédé de l'aspiration de l'air interstitiel thermiquement assistée (TUBA®) peut être considéré comme suffisamment au point pour être mis en pratique, mais il ne correspond pas encore à l'état de la technique. Un guide des techniques d'assainissement thermique in situ a été élaboré à l'intention du centre de compétence TASK (Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrum, à Leipzig, en Allemagne). Il existe des fournisseurs dans quelques pays européens, qui font parfois appel à des experts américains.

### 3.1.2 Sources de chaleur solides

<b>Autres désignations</b>
<p>Assainissement in situ au moyen de sources de chaleur solides.</p> <p>En allemand: thermische in situ-Sanierung mit festen Wärmequellen (THERIS®).</p> <p>En anglais: thermal conducting heating (TCH), In-situ Thermal Treatment (ISTT), In-situ Thermal Remediation (ISTR).</p>
<b>Principe</b>
<p>Des polluants volatils sont mobilisés par introduction de chaleur. Les polluants évaporés, sous forme gazeuse, sont aspirés avec l'air interstitiel. La chaleur est introduite au moyen de sources solides, habituellement des tubes métalliques verticaux, dont l'intérieur est chauffé. Ces corps de chauffe sont généralement mis en œuvre dans la zone insaturée, mais ils peuvent aussi l'être dans la zone saturée.</p>
<b>Fonctionnement</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Des corps de chauffe, sous la forme de lances chauffées électriquement ou au gaz, sont introduits verticalement dans le sol afin de l'échauffer par conduction thermique directe et par transport de chaleur avec la circulation d'eau souterraine (introduction de chaleur par convection).</li> <li>▪ Le terrain est échauffé jusqu'à la température requise pour évaporer les polluants très volatils et moyennement volatils.</li> <li>▪ L'eau interstitielle et les polluants situés au voisinage des corps de chauffe sont évaporés, puis ils migrent avec l'air interstitiel le long du gradient de température qui se forme entre la source de chaleur et le milieu ambiant plus froid. Les polluants évaporés sont ainsi transportés jusqu'aux puits d'extraction. Certains polluants sont détruits thermiquement lorsque que la température des corps de chauffe est élevée.</li> <li>▪ Les polluants sous forme gazeuse sont aspirés avec l'air interstitiel, puis celui-ci est épuré au moyen d'une installation usuelle (cf. «Aspiration de l'air interstitiel» au point 2.1).</li> <li>▪ Ce procédé accélère la mobilisation des polluants et l'aspiration de l'air interstitiel.</li> </ul>
<b>Description technique</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le sous-sol est échauffé au moyen de corps de chauffe. Ceux-ci revêtent la forme de tubes d'acier dont l'intérieur est chauffé par un courant électrique, ou alors par une flamme entretenue au gaz, ce qui permet de porter leurs parois à une température supérieure à 400 °C.</li> <li>▪ L'installation d'aspiration de l'air interstitiel (cf. point 2.1) peut comprendre un échangeur de chaleur équipé d'un séparateur de condensat, un compresseur et un dispositif de traitement de l'air effluent (charbon actif, postcombustion thermique ou oxydation catalytique).</li> </ul>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zone insaturée;</li> <li>▪ zone saturée (de perméabilité faible, donc objet d'échanges d'eau faibles).</li> </ul>
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polluants organiques très volatils à moyennement volatils;</li> <li>▪ également phase libre flottante (LNAPL).</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Sable fin, terre glaise, limon, argile, pour autant qu'il soit possible d'aspirer l'air interstitiel.
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lorsque que le débit d'écoulement de l'eau souterraine est trop élevé, une quantité excessive de chaleur s'échappe de la zone à assainir.</li> <li>▪ Dans la zone insaturée, le sol, s'il est argileux ou limoneux, risque de se dessécher au voisinage des corps de chauffe en provoquant la formation de fissures de retrait susceptibles de court-circuiter l'aspiration de l'air interstitiel.</li> <li>▪ Perméabilité du sol dans la zone insaturée <math>&gt;10^{-9}</math> m/s.</li> <li>▪ L'espacement entre les corps de chauffe dépend des conditions hydrogéologiques et géologiques locales, du type de polluants, des pertes d'énergie, du but de l'assainissement et de sa durée.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
<p>La surface du secteur à assainir est généralement couverte de conduites, corps de chauffe et dispositifs d'aspiration, aussi doit-elle rester librement accessible. Dans certains cas, une coûteuse installation souterraine est nécessaire.</p> <p>Alimentation électrique, éventuellement connexion téléphonique, dispositif de pilotage, corps de chauffe, éventuellement alimentation en gaz, groupe aspirateur, puits d'aspiration, conduites de raccordement, installation de traitement de l'air effluent, éventuellement puits de contrôle dans la zone insaturée du sol et éventuellement étanchement de la surface au moyen de membranes géosynthétiques.</p>	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de la concentration des polluants, ou de la réduction de la pollution, dans des points de contrôle.</li> <li>▪ Suivi de la zone d'influence (en anglais: radius of influence = ROI).</li> <li>▪ Monitoring de l'air interstitiel.</li> <li>▪ Suivi de la quantité d'air aspirée.</li> <li>▪ Repérage des baisses de pression.</li> <li>▪ Suivi des émissions.</li> <li>▪ Contrôle de la distance jusqu'aux éventuelles conduites enterrées voisines.</li> <li>▪ Mesure de la température.</li> </ul>	

<b>Variantes</b>
Les variantes portent principalement sur les détails de l'exécution technique. La chaleur peut aussi être introduite par injection de vapeur (procédé TUBA <sup>®</sup> , cf. point 3.1.1) ou par un système de chauffage par résistance électrique (electrical resistance heating, ERH).
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Ce procédé ne devrait être mis en œuvre qu'en aspirant simultanément l'air interstitiel.</li><li>▪ L'aspiration de l'air interstitiel nécessite une installation d'épuration de l'air effluent.</li><li>▪ Combinaison avec le procédé TUBA<sup>®</sup>.</li><li>▪ Combinaison avec un procédé hydraulique (pour une mise en œuvre dans l'eau souterraine).</li></ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
L'utilisation de sources de chaleur solides est un procédé rapide et bien contrôlable. Il a été appliqué à quelques reprises entre autres en Allemagne ainsi qu'en Suisse pour assainir des sites. Son grand avantage est de pouvoir être mis en œuvre à proximité immédiate de bâtiments ou sous ceux-ci, sans en pénaliser l'exploitation. On connaît un exemple d'application réussie, en combinaison avec l'injection d'air chaud ou de vapeur, dans le canton du Valais. L'échauffement y était assuré par des corps de chauffe dans la zone insaturée et par injection de vapeur dans l'aquifère.
<b>Stade de développement et état du marché</b>
Le procédé de l'assainissement in situ au moyen de sources de chaleur solides (THERIS <sup>®</sup> ) peut être considéré comme suffisamment au point pour être mis en pratique, mais il ne correspond pas encore à l'état de la technique. Un guide des techniques d'assainissement thermique in situ a été élaboré à l'intention du centre de compétence TASK (Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenz-zentrum, à Leipzig, en Allemagne). Il existe des fournisseurs dans quelques pays européens. Ceux-ci font parfois appel à des experts américains.

### 3.1.3 Divers procédés physiques de mobilisation

<b>Autres désignations</b>
<p>Chauffage par résistance électrique, procédé par énergie radiofréquentielle, par géochoc ou par hydrochoc.</p> <p>En anglais: electrical resistance heating (ERH), radio frequency / electromagnetic heating (RFH).</p>
<b>Principe</b>
<p>Les divers procédés physiques de mobilisation fonctionnent de différentes manières. Ils consistent soit à échauffer le sol ou l'eau souterraine par voie électrique, soit à augmenter la perméabilité de la zone insaturée ou de la zone saturée par voie mécanique, hydraulique ou pneumatique.</p> <p>Chauffage par résistance électrique: un courant électrique établi entre deux électrodes échauffe le sol et extrait les polluants.</p> <p>Procédé par énergie radiofréquentielle: les polluants sont mobilisés par l'introduction de chaleur, le sol étant échauffé par des ondes électromagnétiques, selon le principe du four à microondes.</p> <p>Procédé par géochoc ou par hydrochoc: les polluants sont mobilisés par l'introduction d'énergie mécanique. Le sol ou l'eau souterraine sont mis en vibration par un corps oscillant dans le but d'améliorer son aération et, ainsi, le transport de substances.</p>
<b>Fonctionnement</b>
<p>Le sol peut être échauffé en exploitant sa résistance électrique lorsqu'une tension électrique est établie entre deux électrodes et que le courant circulant entre elles est suffisant.</p> <p>Un autre procédé thermique de mobilisation de polluants consiste à utiliser de l'énergie radiofréquentielle. Il est similaire à celui de l'assainissement par injection d'air chaud ou de vapeur (procédé TUBA®) ou par application de corps de chauffe (procédé THERIS®), à ceci près que la chaleur est introduite dans le sous-sol par effet diélectrique.</p> <p>Il est aussi possible d'introduire de l'énergie mécanique pour mobiliser les polluants, comme dans les procédés par géochoc ou par hydrochoc. Dans celui du géochoc, des ondes élastiques sont injectées dans le sol pour améliorer son aération. Dans celui de l'hydrochoc, l'eau souterraine est mise en vibration pour accroître le transport de substances. Ces techniques visant à transmettre de l'énergie dans le terrain ont une incidence sur ses propriétés mécaniques. Il peut notamment en résulter des tassements qui infligent des dommages aux constructions voisines ou compactent le sol en diminuant sa porosité.</p>

<b>Description technique</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dans le chauffage par résistance électrique, des électrodes sont introduites dans le sol et alimentées en électricité.</li> <li>▪ Dans le procédé par énergie radiofréquentielle, le sous-sol est échauffé par des ondes électromagnétiques, selon le principe du four à microondes. La fréquence appliquée est généralement de l'ordre de quelques MHz (3 à 50 MHz).</li> <li>▪ Dans le procédé par géochoc, des ondes élastiques sont injectées dans le sol par un corps oscillant.</li> <li>▪ Dans le procédé par hydrochoc, des ondes sont générées dans un forage par un vibreur ou par un générateur d'impulsions à air comprimé.</li> </ul>	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zone insaturée;</li> <li>▪ zone saturée (procédé par hydrochoc).</li> </ul>
Polluants visés	Polluants dissous dans l'eau, susceptibles d'être extraits avec l'air interstitiel ou très volatils, ces derniers requérant une augmentation de la mobilité par voie thermique.
Géologie/hydrogéologie	Terrains perméables, ou alors peu perméables mais dont la perméabilité peut être accrue par des chocs.
<b>Limites d'application</b>	
<p>Chacun de ces procédés est applicable dans des limites relativement étroites. Par exemple:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ inapplicable à cause du risque de tassement du terrain;</li> <li>▪ consommation d'énergie excessive, en particulier pour les procédés par voie électrique;</li> <li>▪ site à assainir bâti;</li> <li>▪ accès non garanti;</li> <li>▪ non économique dans le cas considéré.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
Ces procédés nécessitent une assise plane et un bon accès ainsi qu'une alimentation électrique ou une génératrice, un transformateur, un raccordement d'eau, etc.	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ En cas d'introduction d'énergie mécanique, observation du terrain et des constructions voisines le cas échéant pour détecter des tassements susceptibles d'occasionner des dommages.</li> <li>▪ Contrôle de l'efficacité de l'épuration du sous-sol.</li> <li>▪ Suivi soigneux des paramètres de pilotage afférents aux diverses variantes.</li> </ul>	

<b>Variantes</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Il existe de nombreuses variantes spécifiques aux divers fournisseurs.</li></ul>
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Combinaison de procédés ERH ou RFH et TUBA® ou THERIS®.</li><li>▪ Combinaison avec un procédé de pompage et traitement de l'eau souterraine ou d'aspiration de l'air interstitiel.</li></ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
<p>Ces procédés sont encore en phase expérimentale. En particulier, les techniques impliquant de l'énergie mécanique peuvent occasionner des dommages et n'ont encore été que très peu testées. On n'en connaît aucune application en Suisse.</p>
<b>Stade de développement et état du marché</b>
<p>Aucun procédé décrit ici ne correspond à l'état de la technique. Toute application dans un cas concret doit être examinée avec grand soin, puis conçue, installée et exploitée par une entreprise d'assainissement expérimentée.</p>

### 3.1.4 Fracturation

<b>Autres désignations</b>	
En allemand: Frac-Technik.	
En anglais: fracking, pneumatic fracturing, hydrofracturing.	
<b>Principe</b>	
L'espace poral (volume des pores) est agrandi à l'aide d'air ou d'eau introduit dans le terrain sous haute pression pour augmenter sa perméabilité à l'eau et à l'air. La mobilité des polluants dissous dans l'eau souterraine ou adsorbés sur les grains constituant le sol s'en trouve accrue.	
<b>Fonctionnement</b>	
La fracturation vise à accroître le volume des pores dans les sols peu perméables ou la taille des fissures dans les roches consolidées. Le but consiste, respectivement, à briser la cohésion entre les grains de la matrice ou à développer les fissures. Il en résulte une augmentation de la perméabilité à l'air ou à l'eau des terrains peu perméables ainsi que, le cas échéant, de la mobilité des phases mobiles, améliorant ainsi l'accès aux secteurs peu perméables du sous-sol lors d'un assainissement in situ.	
<b>Description technique</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'agrandissement des pores ou des fissures est généralement obtenu par injection brusque d'air ou d'eau sous haute pression (fracturation pneumatique ou hydraulique) dans le sous-sol ou dans l'aquifère. En présence de roche consolidée, du sable est parfois ajouté à l'eau afin de conserver les fissures ouvertes après l'application de la surpression. Il suffit d'un forage, dans lequel est introduit un tube en PVC qui servira à l'injection.</li> <li>▪ La fracturation hydraulique utilise généralement des liquides composés à 95 % d'eau, de ballast (sable) et de produits chimiques, qui contribueront à maintenir les cheminements ouverts.</li> <li>▪ Les fissures peuvent aussi être agrandies à l'explosif.</li> </ul>	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	Zone saturée, zone insaturée.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tous les types de polluants qui peuvent être dissous dans l'eau ou extraits de l'eau par dégazage; même une phase polluante libre peut être mobilisée.</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sols cohésifs, roches consolidées.</li> </ul> <p>Dans les sols de perméabilité <math>k_f</math> entre <math>10^{-6}</math> et <math>10^{-4}</math> m/s, il y a lieu d'obtenir une bonne perméabilité dans un rayon de 6 à 12 m autour du point d'injection.</p>

<b>Limites d'application</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La fracturation du sous-sol peut provoquer des soulèvements susceptibles d'endommager des constructions, c'est pourquoi elle ne doit pas être pratiquée en zone bâtie.</li> <li>▪ Les produits chimiques contenus dans le liquide introduit sous pression ne doivent pas être toxiques et ils devraient être biodégradables.</li> </ul>
<b>Infrastructure requise</b>
Alimentations usuelles (électricité, eau), éventuellement raccordement aux égouts, assise plane pour l'appareillage de mise en pression et pour les stocks de matériaux à injecter. Le surplus de ces matériaux doit être éliminé de manière appropriée.
<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de l'avancement de l'assainissement.</li> <li>▪ Mesure des tassements et des soulèvements.</li> <li>▪ Suivi des paramètres techniques: consommation d'air, pression, consommation d'eau, extension de la zone d'influence, etc.</li> </ul>
<b>Variantes</b>
Les variantes correspondent aux moyens utilisés pour générer la pression: par voie pneumatique ou hydraulique ou par explosion (gaz comprimé).
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Il est pertinent et souhaitable de combiner cette technique avec un ou plusieurs autres procédés in situ.</li> </ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
Sur les sites à assainir de grande taille, il est nécessaire d'installer de nombreux points d'injection, ce qui coûte cher. Il est en outre possible que la fracturation génère des cheminements préférentiels au lieu d'une fissuration régulière. Leur incidence ne peut pas être prévue entièrement, notamment lorsque le type de roche ou la granulométrie fine du sol ne se prête pas à la fracturation. Il n'existe pas beaucoup de projets d'assainissement de sites contaminés ayant recouru ou recourant à la fracturation.
<b>Stade de développement et état du marché</b>
La fracturation est peu mise en œuvre pour améliorer l'efficacité de procédés d'assainissement in situ. Son développement n'est pas encore assez avancé pour qu'on puisse la considérer comme correspondant à l'état de la technique dans le domaine des sites contaminés.

### 3.1.5 Electrosmose

<b>Autres désignations</b>	
En anglais: electrokinetic remediation.	
<b>Principe</b>	
Des électrodes induisent un potentiel électrique dans le terrain contaminé. Sous l'effet de la tension continue, l'eau et les ions dissous migrent vers l'une ou l'autre électrode en fonction de leur charge.	
<b>Fonctionnement</b>	
Ce procédé a été utilisé longtemps pour assécher des terrains fins. Les polluants ne sont pas détruits, mais seulement déplacés. L'eau interstitielle et les polluants qu'elle contient sous forme dissoute sont transportés sous l'effet d'un champ électrique généré dans le sol. Lors de l'électrophorèse, les particules colloïdales chargées électriquement, comme les argiles, migrent dans le champ électrique. Les polluants sont retirés du sous-sol ou traités aux électrodes, en principe au moyen d'un des procédés usuels de décontamination in situ.	
<b>Description technique</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'installation d'assainissement comprend essentiellement une ou plusieurs paires d'électrodes (anodes et cathodes) branchées sur une source de courant continu.</li> <li>▪ Les électrodes génèrent dans la zone polluée un système de circulation de l'eau et des polluants qu'elle contient sous forme dissoute.</li> <li>▪ Les polluants sont accumulés dans des réservoirs installés près des électrodes, dont ils sont ensuite retirés pour être acheminés dans une installation de traitement des eaux effluentes ou pour être éliminés.</li> </ul>	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieus concernés	Eau souterraine, zone saturée, zone insaturée dans certaines conditions (eau interstitielle).
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Métaux lourds;</li> <li>▪ composés polaires.</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Investigation préalable du foyer de pollution selon une grille de maille de l'ordre du mètre; sable fin ou glaiseux, argile.
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'espacement entre les électrodes doit être de 10 m au maximum.</li> <li>▪ La tension ne devrait pas dépasser 500 V pour des raisons de sécurité.</li> <li>▪ Ce procédé ne peut être mis en œuvre avec succès dans la zone insaturée que si le terrain est argileux ou glaiseux et que sa teneur en eau est au moins égale à 80 %.</li> </ul>	

<b>Infrastructure requise</b>
Alimentations usuelles (électricité, eau), éventuellement raccordement aux égouts, assise plane pour l'éventuelle génératrice, mesures de sécurité, accès aisé.
<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Suivi de la qualité de l'eau souterraine, et ainsi de l'avancement de l'assainissement.</li><li>▪ Suivi de la tension et de l'intensité du courant électrique.</li><li>▪ Détermination de la quantité de polluants extraite.</li></ul>
<b>Variantes</b>
Les variantes correspondent au nombre d'électrodes et à leur espacement ainsi qu'à la tension et à l'intensité du courant électrique.
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
Ce procédé peut être combiné avec d'autres techniques in situ, en particulier avec celles qui assainissent la zone insaturée en parallèle.
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
Ce procédé consomme beaucoup d'énergie. L'expérience pratique à son sujet est limitée.
<b>Stade de développement et état du marché</b>
Ce procédé ne correspond pas encore à l'état de la technique. Il n'existe en Europe que peu d'entreprises d'assainissement qui disposent du savoir-faire et de l'expérience nécessaires.

## 3.2 Procédés chimiques de mobilisation

### 3.2.1 Lessivage à l'alcool

<b>Autres désignations</b>	
Lessivage avec un cosolvant, lessivage in situ du sol. En anglais: cosolvent flushing, in situ soil flushing.	
<b>Principe</b>	
Mobilisation de polluants par augmentation de leur solubilité.	
<b>Fonctionnement</b>	
La tension superficielle qui règne entre l'eau et le polluant non dissous est abaissée en présence d'alcool. Le mélange d'alcools utilisé doit en comporter un de nature hydrophile et un de nature lipophile. L'alcool lipophile («gonflant») pénètre dans le polluant et diminue sa densité en augmentant son volume. L'alcool hydrophile est nécessaire pour assurer la dissolution de l'alcool lipophile dans l'eau et pour permettre de contrôler hydrauliquement le cocktail d'alcools. Cette augmentation de la solubilité dans l'eau génère un mélange d'alcool, de polluant et d'eau, qui peut être extrait par un pompage contrôlé.	
<b>Description technique</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les alcools sont sélectionnés en fonction des caractéristiques des polluants.</li> <li>▪ Le mélange d'alcools est introduit dans la zone contaminée du sol par un puits ou par des lances.</li> <li>▪ Le secteur contaminé est lessivé, puis le mélange d'alcool, de polluant et d'eau est pompé. L'effluent liquide est traité et une grande partie de l'alcool est récupérée pour être réutilisée.</li> </ul>	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieus concernés	Zone saturée, zone insaturée.
Polluants visés	Polluants organiques non dissous situés dans l'espace poral et dans l'eau souterraine.
Géologie/hydrogéologie	Terrain meuble de perméabilité moyenne à élevée.
Autres conditions requises	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Connaissance de la position du foyer de pollution;</li> <li>▪ connaissance de la composition des polluants pour sélectionner les alcools;</li> <li>▪ confinement hydraulique du secteur à assainir.</li> </ul>
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les sols cohésifs ne peuvent pas être épurés.</li> <li>▪ L'alcool doit être récupéré pour des raisons économiques.</li> <li>▪ Il y a un risque de migration incontrôlée de polluants dans des zones plus profondes de l'aquifère.</li> </ul>	

<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ L'efficacité de l'épuration devrait être vérifiée dans un point de contrôle approprié.</li><li>▪ La dissémination de l'alcool (cosolvant) dans le sous-sol devrait être suivie.</li><li>▪ Les cosolvants utilisés devraient être soumis à un bilan de masse pour vérifier leur récupération.</li></ul>
<b>Variantes</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Infiltration verticale de l'alcool dans la zone insaturée (cf. «Infiltration verticale» au point 1.2.2)</li><li>▪ Infiltration de l'alcool dans la zone saturée (cf. «Infiltration dans la nappe» au point 1.2.2).</li></ul>
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
Il est habituel de combiner cette technique avec un procédé hydraulique. Mais elle peut aussi être combinée avec l'aspiration de l'air interstitiel ou avec une mesure biologique.
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
Ce procédé est éprouvé et utilisable dans la pratique, mais on n'en connaît pas d'application en Suisse.
<b>Stade de développement et état du marché</b>
Le lessivage à l'alcool est largement répandu aux États-Unis. Il fait aussi l'objet de recherches approfondies en Allemagne. Mais ce procédé ne correspond pas encore à l'état de la technique en Europe.

### 3.2.2 Lessivage avec un agent tensioactif

Autres désignations	
<p>Lessivage in situ du sol.</p> <p>En anglais: in situ soil flushing with surfactants.</p>	
Principe	
<p>Mobilisation de polluants par augmentation de leur solubilité au moyen de substances agissant sur leur surface (agents tensioactifs).</p>	
Fonctionnement	
<p>La tension superficielle qui règne entre la matrice du sol et le polluant non dissous (NAPL) est abaissée en présence d'un agent tensioactif. L'adhésion par capillarité s'en trouve réduite. Les agents tensioactifs agissent de deux manières. Lorsque que leur concentration est inférieure à la concentration critique pour la formation de micelles, leur tête hydrophile et leur reste hydrophobe abaissent la tension superficielle qui règne entre le NAPL et la phase aqueuse. Les polluants peuvent alors s'écouler et être captés hydrauliquement. Lorsque la concentration des agents tensioactifs est supérieure à la concentration critique pour la formation de micelles, leurs molécules s'agglomèrent pour former des micelles qui entourent les polluants hydrophobes, ce qui a pour effet de les mettre en solution. En règle générale, la concentration des agents tensioactifs est inférieure à la concentration critique pour la formation de micelles.</p>	
Description technique	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'agent tensioactif est sélectionné en fonction des caractéristiques des polluants.</li> <li>▪ L'agent tensioactif est introduit dans la zone contaminée du sol par un puits d'injection.</li> <li>▪ Le secteur contaminé est lessivé, puis le mélange d'agent tensioactif, de polluant et d'eau est pompé. Les phases extraites sont traitées et séparées sur le site même.</li> </ul>	
Modalités d'application	
Milieus concernés	Zone saturée, ainsi que zone insaturée.
Polluants visés	Polluants organiques non dissous, finement dispersés dans l'eau souterraine ou dans l'espace poral (NAPL).
Géologie/hydrogéologie	Terrain meuble, aquifère de perméabilité élevée à moyenne.
Autres conditions requises	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Confinement hydraulique du secteur à assainir;</li> <li>▪ prévenir la migration de polluants dans des zones plus profondes;</li> <li>▪ risque de colmatage de l'aquifère;</li> <li>▪ les agents tensioactifs sont agressifs et susceptibles de poser des problèmes d'étanchéité dans l'installation.</li> </ul>

<b>Limites d'application</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Procédé inapplicable à un aquitard, à un aquiclude ou à un aquifère fissural.</li><li>▪ Impossibilité d'assurer un confinement hydraulique, si bien que l'agent tensioactif est entraîné par l'eau souterraine.</li><li>▪ Procédé non autorisé dans un aquifère sensible pour des raisons de gestion des eaux.</li></ul>
<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ L'efficacité de l'épuration devrait être vérifiée dans un point de contrôle approprié.</li><li>▪ La dissémination de l'agent tensioactif dans le sous-sol devrait être suivie.</li><li>▪ L'agent tensioactif utilisé devrait être soumis à un bilan de masse pour vérifier sa récupération.</li></ul>
<b>Variantes</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Infiltration verticale de l'agent tensioactif dans la zone insaturée (cf. «Infiltration verticale» au point 1.2.2).</li><li>▪ Infiltration de l'agent tensioactif dans la zone saturée (cf. «Infiltration dans la nappe» au point 1.2.2).</li></ul>
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
Il est habituel de combiner cette technique avec un procédé hydraulique. Mais elle peut aussi être combinée avec l'aspiration de l'air interstitiel ou avec une mesure biologique.
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
Ce procédé est éprouvé et utilisable dans la pratique, mais il a très peu été mis en œuvre en Europe jusqu'ici. On n'en connaît pas d'application en Suisse.
<b>Stade de développement et état du marché</b>
Le lessivage avec un agent tensioactif est largement répandu aux États-Unis. Il fait aussi l'objet de recherches approfondies en Allemagne. Mais ce procédé ne correspond pas encore à l'état de la technique en Europe.

## 4. Procédés biologiques

### 4.1 Infiltration verticale avec ajout de substances nutritives

Autres désignations	
<p>Lessivage biologique in situ, lessivage du sol, puits, tranchée ou installation d'infiltration, puits à drains horizontaux.</p> <p>En anglais: in situ biological treatment.</p>	
Principe	
<p>Les procédés microbiologiques in situ visant à épurer des secteurs contaminés dans la zone insaturée du sol peuvent combiner l'infiltration de microorganismes et de substances nutritives dans un circuit de lessivage avec un pompage et traitement. Ils servent à:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ alimenter la zone insaturée du sol en substances nutritives et à réguler le milieu;</li> <li>▪ restituer l'eau souterraine pompée et épurée.</li> </ul>	
Fonctionnement	
<p>Les processus biologiques sont stimulés dans la zone insaturée du sol en ajoutant des substances nutritives (p. ex. carbone, azote ou phosphate) ou en régulant le milieu de manière optimale (p. ex. ajustement de la température, enrichissement en oxygène ou réduction) selon le type de dégradation souhaité (aérobie ou anaérobie).</p> <p>Les additifs sont injectés au moyen d'un dispositif d'aspersion posé en surface ou de lances, piézomètres ou puits placés dans le sol. Il faut veiller à ce que les polluants ne soient pas transportés verticalement dans la zone saturée ou associer une mesure d'assainissement de l'eau souterraine. Les polluants lessivés peuvent être captés dans des drains horizontaux et pompés en surface pour y être traités.</p>	
Description technique	
<p>En règle générale, l'eau pompée épurée peut-être réinjectée dans un puits d'infiltration avec les substances nutritives et les substances régulatrices du milieu.</p> <p>Au lieu d'un puits d'infiltration, on peut, lorsque le sous-sol est perméable, répartir les substances nutritives directement depuis la surface via une tranchée ou un bassin d'infiltration s'étendant sur toute l'aire à traiter. La tranchée est remplie de matériel perméable (<math>k_f &gt; 10^{-3}</math> m/s) et équipée de drains d'infiltration, puis recouverte si nécessaire. Il est également possible d'aménager dans la zone insaturée du sol une installation permettant d'introduire les substances nutritives et de les répartir horizontalement. L'eau polluée est captée dans des drains horizontaux (puits horizontal) situés sous le secteur contaminé et acheminée vers une chambre collectrice, d'où elle est pompée pour être traitée.</p>	
Modalités d'application	
Milieu concerné	Zone insaturée du sol.
Polluants visés	Polluants biodégradables par voie aérobie ou anaérobie, tels qu'hydrocarbures pétroliers ou chlorure de vinyle (voie aérobie) ou solvants chlorés (essentiellement voie anaérobie).

Géologie/hydrogéologie	Perméabilité élevée dans la zone insaturée, sols sablo-graveleux.
Autres conditions requises	Tranchée d'infiltration: libre accès à la surface d'infiltration (pas de dalle ni de voie de circulation).
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les procédés microbiologiques in situ conviennent à l'assainissement de pollutions de faible extension dans des sols de perméabilité moyenne à élevée (<math>k &gt; 10^{-4}</math> m/s). En règle générale, ce type de procédé n'est pas approprié lorsque le sol est très hétérogène ou anisotrope, et que la perméabilité varie donc fortement entre les différentes couches ou compartiments ou à l'intérieur de ceux-ci, car les écoulements risquent alors d'être aléatoires.</li> <li>▪ L'efficacité de ces procédés dépend étroitement de la dégradabilité des polluants. Il est nécessaire de très bien connaître les conditions microbiologiques du milieu pour optimiser l'apport de substances nutritives.</li> <li>▪ Il est nécessaire de connaître précisément les caractéristiques du terrain pour pouvoir atteindre les buts de l'assainissement moyennant un coût et un délai raisonnables.</li> <li>▪ Ce type de mesure n'est généralement pas autorisé dans la zone d'appel des captages d'eau potable.</li> </ul>	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de l'apport de substances nutritives dans la zone insaturée.</li> <li>▪ Suivi de la quantité et de la qualité de l'eau introduite et de l'eau captée.</li> <li>▪ Suivi du niveau de la nappe phréatique.</li> <li>▪ Suivi des tassements dans les zones bâties.</li> <li>▪ Suivi du débit d'infiltration de l'installation pour repérer à temps un colmatage.</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
Évacuation de l'eau traitée et infiltration d'eau claire.	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
Ce procédé est généralement mis en œuvre en combinaison avec une mesure de pompage et traitement.	
<b>Évaluation et expérience pratique</b>	
L'infiltration verticale avec ajout de substances nutritives appliquée à de nombreuses reprises a fait ses preuves. Des bureaux techniques et des entreprises d'assainissement expérimentés implantés en Suisse sont donc à même de la mettre en œuvre.	
<b>Stade de développement et état du marché</b>	
L'infiltration verticale avec ajout de substances nutritives correspond à l'état de la technique et est mise en œuvre dans de nombreux projets en Suisse.	

## 4.2 Aérobisation d'anciens lieux de stockage de déchets

<b>Autres désignations</b>
<p>Aération par aspiration ou par injection d'air comprimé.</p> <p>En anglais: landfill aeration.</p>
<b>Principe</b>
<p>Les processus de dégradation à l'œuvre dans les dépôts de matériaux organiques sont généralement anaérobies. L'aérobisation de ces dépôts permet de diminuer, voire de faire cesser, les émissions polluantes émanant de décharges et d'anciens lieux de stockage de déchets. L'instauration d'un milieu aérobie génère une diminution plus rapide du potentiel de pollution par des composés biodégradables et stoppe le dégagement de gaz nauséabonds, tels que H<sub>2</sub>S et mercaptan. La technique de l'aérobisation est le plus souvent appliquée dans des sites pollués par des décharges. Elle est nommée bioventilation (cf. point 4.3) lorsqu'elle porte sur la zone insaturée du sol.</p>
<b>Fonctionnement</b>
<p>L'aérobisation désigne l'introduction active d'air à l'intérieur d'une décharge et la transformation ciblée de la matière organique biogène sous l'effet de l'oxygène contenu dans l'air. Celui-ci est introduit dans le sol par aspiration à partir de puits spéciaux, crépinés à la base de la décharge, ou par injection d'air comprimé. L'instauration d'une dépression homogène «force» l'air aspiré à traverser l'ensemble du dépôt. La matière organique biogène est dégradée progressivement en grande partie, de l'extérieur vers l'intérieur de la décharge. L'aérobisation permet d'obtenir les effets suivants:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ préparation du démantèlement de secteurs de décharges pour éviter le dégagement d'odeurs lors des travaux d'excavation;</li> <li>▪ accélération de la dégradation in situ des polluants à l'intérieur des décharges;</li> <li>▪ raccourcissement de la période de suivi des décharges désaffectées et des anciens lieux de stockage de déchets;</li> <li>▪ diminution du potentiel de pollution à l'intérieur des décharges;</li> <li>▪ élimination des émissions de méthane et de gaz nauséabonds;</li> <li>▪ diminution de la pollution des eaux de percolation.</li> </ul>
<b>Description technique</b>
<p>La pression est abaissée à l'intérieur de la décharge par des puits d'aspiration spécialement conçus à cet effet. Les puits sont crépinés au minimum dans le tiers inférieur de la décharge afin d'aspirer l'air à la base de celle-ci. La profondeur de l'aspiration peut être modifiée pour traiter différents horizons. L'utilisation de puits multiniveaux permet de déterminer la composition des gaz à différents niveaux. Un intervalle d'au moins 2 m entre les niveaux permet d'éviter tout mélange des gaz détectés dans les différents horizons.</p> <p>L'air comprimé peut aussi être injecté dans la décharge au moyen de lances, de manière continue ou par à-coups.</p>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieu concerné	Air interstitiel.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Part organique de déchets (ordures ménagères, déchets industriels, déchets spéciaux);</li> <li>▪ méthane;</li> <li>▪ ammonium;</li> <li>▪ DCO;</li> <li>▪ BTEX;</li> <li>▪ HCC.</li> </ul>
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cheminements préférentiels ou secteurs de perméabilité élevée à l'intérieur de la décharge (configuration de court-circuit).</li> <li>▪ Excès d'eau, décharge engorgée.</li> <li>▪ Polluants persistants.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
Les raccordements usuels (électricité, eau) devraient être assurés. Les points d'aspiration et d'injection doivent être accessibles. Des conduites d'acheminement et d'évacuation d'air sont nécessaires.	
<b>Suivi</b>	
La concentration de méthane, de gaz carbonique et d'oxygène est déterminée dans des points de mesure afin d'établir l'efficacité de l'aérobisation. Lorsque l'aspiration est maximale, la teneur en oxygène doit être maintenue au niveau le plus bas possible (<3 % volumiques), tandis qu'il faut atteindre une teneur maximale en gaz carbonique (>20 % vol.). Les concentrations de gaz mesurées dans les différents puits ou dans les gaz rejetés par l'installation d'aspiration permettent de déterminer quand l'aérobisation est achevée (p. ex. <1 % vol. CH <sub>4</sub> , < env. 5 % vol. CO <sub>2</sub> , teneur en O <sub>2</sub> élevée [env. 10 à 15 % vol.], humidité relative >96 %).	
<b>Variantes</b>	
<p>Selon la situation, connexion d'un réseau approprié de puits d'aspiration ou de puits multiniveaux et d'un réseau de points de mesure (monitorage). Des points de contrôle supplémentaires peuvent être installés à la périphérie de la décharge.</p> <p>Injection d'air comprimé au lieu d'une aspiration.</p>	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
On prendra le cas échéant des mesures de protection contre les explosions.	

**Évaluation et expérience pratique**

- Mesure d'assainissement éprouvée pour confiner d'anciennes décharges d'ordures ménagères ou pour préparer leur démantèlement.
- Frais de réparation et d'entretien faibles.
- Consommation d'énergie selon la configuration.
- Traitement pouvant durer plusieurs années selon le volume des déchets.

**Stade de développement et état du marché**

Ce procédé correspond à l'état de la technique. Il a été mis en œuvre à de nombreuses reprises en Autriche, mais aussi en Allemagne. Il est appliqué pour la première fois en Suisse dans le cadre de l'assainissement in situ d'une décharge de déchets urbains.

### 4.3 Bioventilation

<b>Autres désignations</b>	
Circulation d'air interstitiel. En anglais: bioventing.	
<b>Principe</b>	
La bioventilation consiste à produire dans la zone insaturée du sol, contaminée, un léger flux d'air qui stimule la dégradation microbienne de polluants organiques en améliorant l'oxygénation du terrain.	
<b>Fonctionnement</b>	
<p>La bioventilation est étroitement apparentée au traitement pneumatique in situ. Elle consiste à injecter de l'air comprimé dans le sous-sol afin d'optimiser les processus microbiens de transformation des polluants qui se déroulent dans la zone insaturée. L'air introduit est aspiré à un autre endroit, ce qui permet d'établir un courant d'air à travers le secteur pollué.</p> <p>La bioventilation est appliquée pour accélérer l'assainissement et pour influencer le flux d'air interstitiel de manière plus ciblée que ne le permet l'aspiration seule. Elle fait augmenter la pression moyenne de l'air dans le secteur à assainir, ce qui génère une diminution de sa teneur en eau et une augmentation de sa perméabilité à l'air.</p>	
<b>Description technique</b>	
La bioventilation peut être appliquée de deux manières: extraction par bioventilation et injection améliorée par bioventilation. Dans la méthode d'extraction, la pression est abaissée dans le foyer de contamination pour y aspirer l'air comprimé injecté. Dans la méthode de l'injection améliorée, elle est abaissée à l'extérieur du foyer pour y aspirer l'air comprimé injecté. Bien que des polluants volatils soient aussi retirés par ce procédé, la plus grande partie des substances organiques contenues dans le sol subit plutôt une transformation biologique. Néanmoins, dans ce procédé, l'air effluent doit en principe aussi être capté et traité (cf. annexe A-2). L'apport d'air peut être continu ou intermittent. En sus de l'oxygène, des substances nutritives peuvent aussi être introduites dans le terrain par des lances d'infiltration pour alimenter les microorganismes présents dans le sol.	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieus concernés	Air interstitiel, eau interstitielle, grains constituant le sol sur lesquels des polluants sont adsorbés.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polluants biodégradables;</li> <li>▪ essence;</li> <li>▪ kérosène;</li> <li>▪ phénols;</li> <li>▪ hydrocarbures pétroliers;</li> <li>▪ BTEX;</li> <li>▪ HCCV.</li> </ul>

Géologie/hydrogéologie	Zone insaturée, sols sablo-graveleux, sous certaines conditions lorsque le sol est cohésif ou de perméabilité hétérogène.
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Il faut éviter de créer une surpression excessive pour pouvoir aspirer tout l'air contaminé de manière ciblée.</li> <li>▪ Secteurs de sous-sol peu perméables.</li> <li>▪ Polluants non volatils et polluants non biodégradables.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
<p>Les raccordements usuels (électricité, eau) devraient être assurés. Il faut disposer d'assises planes pour l'appareillage de ventilation et d'évacuation de l'air interstitiel et pour l'installation d'épuration de l'air effluent. Des conduites servant à acheminer et à évacuer l'air comprimé et l'air interstitiel sont également nécessaires.</p>	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Des points de contrôle permettant de vérifier la teneur en oxygène et en gaz carbonique de l'air interstitiel sont installés en complément aux puits de ventilation et d'évacuation de l'air.</li> <li>▪ L'avancement de l'assainissement est suivi en observant le taux d'extraction dans l'air effluent et en déterminant la pollution résiduelle dans la zone insaturée du sol au moyen de forages carottés permettant de prélever des échantillons représentatifs.</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
<p>Selon les cas, les puits individuels peuvent être remplacés par des séries de puits agencés de façon à éviter de laisser subsister des secteurs mal ventilés entre les puits d'aspiration. Ce procédé est souvent appliqué en combinaison avec des mesures hydrauliques.</p>	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
<p>Le procédé de l'injection améliorée par bioventilation doit inclure une installation de captage et de traitement de l'air effluent (cf. annexe A-2). On prendra le cas échéant des mesures de protection contre les explosions.</p>	
<b>Évaluation et expérience pratique</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesure d'assainissement éprouvée pour éliminer en tout ou partie des polluants biodégradables dans la zone insaturée du sol.</li> <li>▪ Durée de traitement moyenne pour un investissement technique moyen.</li> <li>▪ Frais de réparation et d'entretien faibles.</li> <li>▪ Gain de temps lorsque l'apport d'énergie est rapide et élevé.</li> </ul>	
<b>Stade de développement et état du marché</b>	
<p>Ce procédé, qui correspond à l'état de la technique, est largement utilisé pour améliorer l'aspiration de l'air interstitiel (enhanced soil vapor extraction), mais il est rarement mis en œuvre en Suisse.</p>	

#### 4.4 Procédés par oxydation dans l'eau souterraine

Autres désignations	
<p>Enrichissement de l'eau souterraine en oxygène.</p> <p>En anglais: enhanced aerobic biodegradation, oxygen releasing compounds (ORC), enhanced natural attenuation.</p>	
Principe	
<p>L'enrichissement de l'eau souterraine en oxygène a pour but d'accroître l'efficacité des processus de biodégradation aérobie dans la zone saturée. À la différence de l'oxydation chimique (cf. ISCO au point 5.1), on n'ajoute que l'oxygène nécessaire pour optimiser l'activité de dégradation aérobie assurée par les bactéries. L'enrichissement de l'eau souterraine en oxygène est aussi fréquemment utilisé pour accroître la dégradation naturelle (cf. «Atténuation naturelle dynamisée» au point 4.8).</p>	
Fonctionnement	
<p>L'eau souterraine peut être enrichie en oxygène des manières suivantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ injection d'air ou d'oxygène dans l'aquifère (comme dans le biobarbotage [cf. point 4.5]), non pas pour en extraire des polluants, mais pour accroître la teneur du milieu en oxygène;</li> <li>▪ injection de liquide fortement enrichi en oxygène;</li> <li>▪ introduction dans l'aquifère de substances qui relâchent lentement mais constamment de l'oxygène dans l'eau souterraine (ORC = oxygen releasing compounds).</li> </ul>	
Description technique	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Introduction de l'agent oxydant avec de l'eau infiltrée ou directement dans l'aquifère.</li> <li>▪ L'agent oxydant est en règle générale de l'oxygène ou du peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).</li> <li>▪ Combinaison avec un pompage et traitement afin de contrôler les conditions hydrauliques de l'eau souterraine.</li> </ul>	
Modalités d'application	
Milieu concerné	Eau souterraine.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ BTEX;</li> <li>▪ essence (C6, C10–12);</li> <li>▪ diesel (C8–12, C24–26);</li> <li>▪ huile minérale (C22–32);</li> <li>▪ créosote (huile de goudron);</li> <li>▪ MTBE;</li> <li>▪ cis-1,2 dichloréthène (DCE);</li> <li>▪ chlorure de vinyle (CV).</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Aquifère à porosité d'interstice homogène et perméable.

<b>Limites d'application</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Convient seulement aux polluants dégradables en conditions aérobies.</li> <li>▪ La présence de teneurs élevées en fer dans l'eau souterraine peut provoquer des précipitations (boucher les pores).</li> <li>▪ L'aquifère doit être très perméable.</li> </ul>
<b>Infrastructure requise</b>
<p>Il n'y a aucune exigence particulière hormis les raccordements usuels (alimentation en électricité et en eau, éventuellement raccordement aux égouts). Les points d'injection (puits) devraient être bien accessibles. Une assise plane est nécessaire pour préparer le liquide à injecter (installations de dosage et de mélange).</p>
<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de la qualité de l'eau souterraine dans des points de contrôle implantés en amont et en aval.</li> <li>▪ Mesure de la teneur en oxygène dans l'eau souterraine.</li> <li>▪ Relevé de l'activité biologique (si nécessaire ou possible).</li> </ul>
<b>Variantes</b>
<p>Les seules variantes connues de ce procédé sont celles qui sont proposées par les fabricants. Un autre procédé connu permettant de stripper les polluants après les avoir oxygénés est le biobarbotage (cf. point 4.5), qui consiste à ventiler activement l'eau souterraine.</p>
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Il est pertinent de combiner l'enrichissement de l'eau souterraine en oxygène avec une mesure de pompage et traitement.</li> <li>▪ D'autres combinaisons avec des mesures d'assainissement portant sur la zone insaturée ou visant à éliminer une phase libre flottante (LNAPL) sont envisageables.</li> </ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
<p>Ce procédé éprouvé dans la pratique est appliqué à l'échelle internationale.</p>
<b>Stade de développement et état du marché</b>
<p>Ce procédé correspond à l'état de la technique. Tout système y recourant devrait être conçu et mis en œuvre par un fournisseur expérimenté.</p>

## 4.5 Biobarbotage

<b>Autres désignations</b>
Biosparging. En anglais: air sparging.
<b>Principe</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Élimination de polluants biodégradables dans l'eau souterraine et dans la zone insaturée du sol.</li><li>▪ Apport d'oxygène dans la zone saturée et dans la zone insaturée du sol pour accélérer la biodégradation.</li><li>▪ En plus, strippage in situ de polluants volatils dans les deux zones du sol.</li></ul>
<b>Fonctionnement</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Une injection contrôlée d'air comprimé exempt d'huile génère dans l'aquifère une dégradation microbienne des polluants et un strippage in situ des composants volatils dissous dans l'eau souterraine.</li><li>▪ Grâce à l'apport d'oxygène, les composants peu volatils ne pouvant pas être strippés sont dégradés biologiquement dans la zone saturée et dans la frange capillaire, ainsi que dans l'eau interstitielle et dans le sol.</li><li>▪ Les composants volatils strippés peuvent être dégradés biologiquement dans la zone insaturée du sol.</li><li>▪ Comme l'oxygène de l'air injecté ne se dissout pas entièrement dans l'eau souterraine, sa concentration augmente également dans la zone insaturée du sol, où il stimule la dégradation microbienne (cf. «Bioventilation» au point 4.3).</li><li>▪ La combinaison, recommandée, avec une installation d'aspiration de l'air interstitiel permet généralement d'améliorer le rendement de l'assainissement ou de l'accélérer (dans le cas de polluants volatils) et d'éviter le dégagement incontrôlé de polluants sous forme gazeuse.</li></ul>
<b>Description technique</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ L'air comprimé exempt d'huile est injecté dans l'aquifère au-dessous du secteur contaminé, par des puits spécialement adaptés à la géologie locale et à la répartition des polluants. Un appareillage approprié doit permettre de contrôler et de réguler la distribution de l'air (quantité et pression).</li><li>▪ L'air contaminé résultant du strippage devrait être capté sélectivement au moyen d'un système d'aspiration de l'air interstitiel, puis traité.</li><li>▪ Une injection d'air qui n'est ni régulée ni contrôlée peut provoquer un transfert de la pollution dans l'eau souterraine ou dans l'atmosphère. Il y a alors un risque de dépassement des valeurs d'émission, des valeurs indicatives ou des valeurs limites.</li></ul>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieu concerné	Eau souterraine et zone insaturée.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polluants biodégradables volatils et non volatils (p. ex. BTEX, ammonium, nitrites, essence, diesel, certains HAP à petit nombre d'anneaux;</li> <li>▪ fer (précipitation).</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Zone saturée et zone insaturée, sols sablo-graveleux, sols limoneux, aquifère homogène.
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lorsque le sol est très hétérogène ou anisotrope, et que la perméabilité varie donc fortement au sein des différentes couches ou compartiments ou entre ceux-ci, l'applicabilité de ce procédé doit faire l'objet d'une étude préliminaire détaillée. La perméabilité <math>k_f</math> devrait se situer entre <math>10^{-4}</math> et <math>10^{-6}</math> m/s. Il en va de même lorsque les écoulements sont mal connus et dans certains cas de nappes captives. Dans de telles conditions, il y a un risque que certaines zones du sol ne soient pas atteintes.</li> <li>▪ Les sinistres impliquant des polluants volatils inflammables situés dans des zones bâties comportent un risque de dépassement des valeurs limites et d'explosion. Dans de tels cas, il faut impérativement que la technologie d'assainissement mise en œuvre comprenne des dispositifs de sécurité appropriés.</li> <li>▪ Le point d'injection de l'air (appelé «sparging point» en anglais) doit être situé au-dessous du secteur contaminé de l'aquifère.</li> <li>▪ Une injection d'air qui n'est ni régulée ni contrôlée peut provoquer un transfert de la pollution dans l'atmosphère. Il y a alors un risque de dépassement des valeurs d'émission, des valeurs indicatives ou des valeurs limites.</li> <li>▪ Ce procédé ne convient ni aux polluants insolubles et non volatils, ni aux polluants non biodégradables.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
Alimentation électrique, compresseur, puits d'injection, conduites de raccordement, installation technique (de pilotage), éventuellement connexion téléphonique, puits de contrôle dans la zone saturée et dans la zone insaturée du sol.	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de la quantité injectée (quantité d'air comprimé introduite, surpression).</li> <li>▪ Monitoring de l'air interstitiel (concentration ou diminution des polluants volatils dans l'air interstitiel, émissions).</li> <li>▪ Monitoring de l'eau souterraine (niveau piézométrique, augmentation de la teneur en <math>O_2</math> dans l'eau souterraine).</li> <li>▪ Tests de respiration pour vérifier l'activité de biodégradation.</li> <li>▪ Suivi de la zone d'influence (en anglais: radius of influence = ROI).</li> </ul>	

<b>Variantes</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Apport d'air riche en O<sub>2</sub> ou en sels nutritifs pour activer et pour forcer la dégradation microbienne.</li><li>▪ Injection de substances nutritives et de substances chimiques régulatrices du pH sous forme liquide.</li><li>▪ Stripping in situ avec une part accrue d'extraction de polluants par désorption (cf. point 2.3).</li><li>▪ Bioventilation du foyer de l'assainissement par application d'un procédé microbiologique dans la zone insaturée du sol (cf. point 4.3).</li></ul>
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Le biobarbotage devrait être combiné avec une aspiration de l'air interstitiel.</li><li>▪ Un pompage et traitement complémentaire peut être utile, mais il n'est pas absolument nécessaire.</li></ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
<p>Ce procédé d'assainissement a largement fait ses preuves depuis plusieurs années à grande échelle technique et il est reconnu comme étant très pertinent par toutes les autorités en charge de l'environnement. Exemple: assainissement d'un parc de citernes à Birsfelden.</p>
<b>Stade de développement et état du marché</b>
<p>Ce procédé est appliqué avec succès depuis plusieurs années pour procéder à des assainissements en Suisse. Il faudrait ne mandater que des bureaux techniques et des entreprises d'assainissement expérimentés pour l'appliquer.</p>

## 4.6 Biostimulation au méthane

<b>Autres désignations</b>	
En allemand: Methan-Biostimulationsverfahren (MBSV). En anglais: biostimulation.	
<b>Principe</b>	
Dans le procédé de la biostimulation au méthane, des microorganismes méthanotrophes sont multipliés pour favoriser la dégradation aérobie de HCC par oxydation.	
<b>Fonctionnement</b>	
Des microorganismes méthanotrophes se multiplient en présence du méthane contenu dans un mélange d'air et de méthane injecté. Ils produisent, au contact du méthane, l'enzyme méthane monooxygénase, catalyseur d'oxydation qui accélère, par exemple, la dégradation des HCCV.	
<b>Description technique</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Injection d'un mélange d'air et de méthane dans la zone saturée, au-dessous du secteur contaminé.</li> <li>▪ Rapport air: méthane de l'ordre de 20 : 1 pour rester en deçà du seuil d'explosion du méthane.</li> <li>▪ Confinement hydraulique en aval pour juguler le risque de transport de polluants hors du secteur à assainir.</li> <li>▪ Aspiration complémentaire de l'air interstitiel dans la zone insaturée en raison d'effets de strippage.</li> </ul>	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	Eau souterraine, zone saturée.
Polluants visés	Polluants dégradables par des microorganismes méthanotrophes (p. ex. HAP, BTEX, HCC, MTBE).
Géologie/hydrogéologie	Zone insaturée perméable (pour l'aspiration de l'air interstitiel), zone saturée d'épaisseur suffisante (portée de l'injection d'air), perméabilité $k_f > 10^{-6}$ m/s, la présence d'une alternance de couches dans la zone saturée peut avoir un effet favorable.
Autres conditions requises	Connaissance des conditions hydrochimiques et de la dissémination des produits de dégradation des HCC, étude des microorganismes méthanotrophes présents dans l'eau souterraine.

<b>Limites d'application</b>
Ne convient pas aux: <ul style="list-style-type: none"><li>▪ aquifères peu perméables;</li><li>▪ aquifères fissurés;</li><li>▪ polluants en phase libre;</li><li>▪ HCC fortement chlorés.</li></ul>
<b>Infrastructure requise</b>
Alimentations usuelles (électricité, eau), éventuellement raccordement aux égouts.
<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Suivi de l'avancement de l'assainissement dans des puits ou des piézomètres de contrôle.</li><li>▪ Suivi de la teneur en méthane dans l'air interstitiel.</li><li>▪ Suivi des paramètres techniques: pression, débit, quantités, etc.</li></ul>
<b>Variantes</b>
Aucune variante connue.
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
La biostimulation au méthane peut ou devrait être combinée avec les procédés suivants: <ul style="list-style-type: none"><li>▪ aspiration de l'air interstitiel;</li><li>▪ procédé pneumatique;</li><li>▪ procédé hydraulique.</li></ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
Ce procédé a été développé et mis en œuvre à de nombreuses reprises aux États-Unis. Sinon, il n'est pas très répandu. Il n'a été appliqué que sur quelques sites en Europe.
<b>Stade de développement et état du marché</b>
Ce procédé ne correspond pas à l'état de la technique. En Allemagne, il n'existe que quelques entreprises d'assainissement au bénéfice d'une licence qui le proposent. Aucune application n'en est connue en Suisse.

## 4.7 Réduction au moyen de substances organiques

<b>Autres désignations</b>	
Déchloration réductrice, dégradation anaérobie de HCCV, halorespiration, déshalogénéation. En anglais: reductive dechlorination.	
<b>Principe</b>	
L'ajout d'un cosubstrat a pour effet de consommer l'oxygène ambiant, ce qui favorise la dégradation anaérobie ou la minéralisation d'hydrocarbures fortement chlorés et d'autres substances qui sont préférentiellement biodégradées dans un milieu réducteur.	
<b>Fonctionnement</b>	
Dans l'eau souterraine, les hydrocarbures fortement chlorés sont dégradés uniquement en conditions anaérobies et les hydrocarbures peu chlorés plutôt en conditions aérobies. De l'hydrogène se forme lors de la dégradation de substances organiques aisément dégradables ajoutées au milieu. Les atomes d'hydrogène ainsi produits remplacent progressivement les atomes de chlore présents dans les HCCV en les réduisant. Ce processus est qualifié de réduction cométabolique. Les HCC peu chlorés peuvent être dégradés en conditions aérobies.	
<b>Description technique</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ajout du cosubstrat à de l'eau qui sera infiltrée ou introduction du cosubstrat directement dans les puits d'infiltration.</li> <li>▪ Les cosubstrats peuvent être les suivants: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ mélasse;</li> <li>○ acides organiques;</li> <li>○ alcools;</li> <li>○ HRC® (hydrogen release compounds = polymères d'acide lactique).</li> </ul> </li> </ul>	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieu concerné	Eau souterraine.
Polluants visés	HCC et autres polluants halogénés.
Géologie/hydrogéologie	Aquifère à porosité d'interstice homogène et perméable.
Autres conditions requises	Connaissance des conditions hydrochimiques et de la dissémination des produits de dégradation des HCC, étude des micro-organismes du groupe des Dehalococcoides éthénogènes.
<b>Limites d'application</b>	
Ne convient pas aux: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ aquifères peu perméables;</li> <li>▪ aquifères fissuraux lorsque le système de fissures est inconnu;</li> <li>▪ polluants en phase libre.</li> </ul>	

<b>Infrastructure requise</b>
Alimentations usuelles (électricité, eau), éventuellement raccordement aux égouts. Assise plane pour les installations d'injection. Accès aux points d'injection.
<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Puits de contrôle pour vérifier l'efficacité de l'assainissement.</li><li>▪ Analyse de l'éthène et de l'éthane contenus dans l'eau souterraine pour vérifier la dégradation.</li><li>▪ Éventuellement confinement hydraulique en aval.</li></ul>
<b>Variantes</b>
Les variantes correspondent essentiellement à la nature des substances injectées pour assurer la réduction.
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Puits de circulation d'eau souterraine (en cas d'aquifère de constitution hétérogène).</li><li>▪ Procédé hydraulique tel que pompage et traitement.</li></ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
Ce procédé est techniquement au point et il a été mis en œuvre dans de nombreux projets d'assainissement au plan international. La technique recourant aux HRC® est surtout appliquée aux États-Unis.
<b>Stade de développement et état du marché</b>
Ce procédé peut être considéré comme correspondant à l'état de la technique. Les bureaux techniques et les entreprises d'assainissement mandatés devraient être à même de faire état d'une expérience appropriée.

## 4.8 Atténuation naturelle dynamisée

<p><b>Autres désignations</b></p>
<p>L'abréviation anglaise ENA est fréquemment utilisée. En anglais: enhanced natural attenuation (ENA).</p>
<p><b>Principe</b></p>
<p>On entend par atténuation naturelle dynamisée (ENA) tout processus susceptible d'accroître la réduction de polluants par des processus naturels (atténuation naturelle; natural attenuation, NA).</p>
<p><b>Fonctionnement</b></p>
<p>L'atténuation naturelle dynamisée (ENA) consiste à intervenir activement pour stimuler des processus naturels de réduction de la pollution au moyen de procédés techniques de nature biologique, chimique ou physique. Les mesures mises en œuvre, souvent nommées «assainissement in situ» en abrégé, visent par exemple à initier ou à renforcer la dégradation aérobie par introduction d'oxygène ou de substances nutritives.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ En conditions aérobies: l'introduction de peroxyde d'hydrogène, d'ORC<sup>®</sup>, d'iSOC<sup>®</sup> ou d'oxygène selon le procédé Oxytec (cf. point. 4.4) déclenche ou accélère la dégradation aérobie par oxydation des polluants contenus dans l'eau. Les substances organiques s'oxydent pour former du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et de l'eau (H<sub>2</sub>O), tandis que les substances inorganiques forment des oxydes qui peuvent être extraits de l'eau.</li> <li>▪ En conditions anaérobies: l'ajout de nitrate favorise la dégradation anaérobie de polluants organiques (dénitrification).</li> <li>▪ Zones réactives: l'installation de parois filtrantes perméables traversées par l'écoulement d'eau souterraine peut aussi être considérée comme un procédé d'atténuation naturelle dynamisée.</li> <li>▪ Phytoremédiation: cette technique est également applicable pour stimuler la réduction naturelle de polluants.</li> </ul>
<p><b>Description technique</b></p>
<p>Atténuation naturelle dynamisée pour stimuler la dégradation aérobie ou anaérobie:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Introduction de substances dans de l'eau qui sera infiltrée ou introduction de ces substances directement dans l'aquifère.</li> <li>▪ Stimulation de la dégradation aérobie ou anaérobie selon la substance ajoutée.</li> <li>▪ Les substances ajoutées peuvent être les suivantes: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ peroxyde d'hydrogène (dégradation aérobie à l'oxygène);</li> <li>○ nitrate (dégradation anaérobie);</li> <li>○ ORC<sup>®</sup> (dégradation aérobie à l'oxygène, fourni sous la forme de peroxyde de potassium ou de magnésium);</li> <li>○ iSOC<sup>®</sup> (dégradation aérobie à l'oxygène, exempt de bulles, apporté par des faisceaux de fibres creuses);</li> <li>○ oxygène selon le procédé Oxytec (dégradation aérobie à l'oxygène, introduit au travers de membranes perméables aux gaz);</li> <li>○ HRC<sup>®</sup> (dégradation anaérobie).</li> </ul> </li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Parois filtrantes perméables (cf. point 1.3).</li> <li>▪ Phytoremédiation: accumulation de polluants dans des plantes (convient également pour réduire des métaux lourds).</li> </ul>	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieu concerné	Principalement eau souterraine.
Polluants visés	Tous les polluants déjà dégradés (réduits) par un processus naturel tels que BTEX, HCP, HAP à faible poids moléculaire, hétérocyclène azoté, soufré ou oxygéné, MTBE, hydrocarbures peu chlorés, métaux lourds [phytoremédiation]).
Géologie/hydrogéologie	Aquifère à porosité d'interstice homogène et perméable.
Autres conditions requises	Bonne connaissance des processus d'atténuation naturelle.
<b>Limites d'application</b>	
L'application de ce procédé est soumise à certaines limites liées à la technique choisie. Mais il n'existe en principe aucune restriction au principe consistant à stimuler la réduction naturelle de polluants.	
<b>Infrastructure requise</b>	
Selon le procédé choisi (voir les explications concernant chacun des procédés).	
<b>Suivi</b>	
Suivi de la qualité de l'eau souterraine. Suivi des paramètres liés au procédé choisi.	
<b>Variantes</b>	
Presque tous les procédés d'assainissement peuvent être appliqués en appui.	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
Presque toutes les combinaisons de procédés sont envisageables dès le moment où elles stimulent la réduction naturelle de la pollution. Une technique d'atténuation naturelle dynamisée peut aussi être mise en œuvre s'il s'avère au cours d'un assainissement que la mesure d'atténuation naturelle appliquée ne suffit pas à elle seule pour obtenir une dégradation satisfaisante, si bien que le but de l'assainissement ne peut pas être atteint dans un délai raisonnable («back-up»).	
<b>Évaluation et expérience pratique</b>	
Les procédés d'appui ont largement fait leurs preuves dans la pratique. L'expérience acquise dépend du type de procédé et elle est indiquée dans la description de chacun d'entre eux.	

**Stade de développement et état du marché**

Certains procédés d'appui correspondent à l'état de la technique. Des fournisseurs appropriés devraient bénéficier d'expérience dans le procédé d'appui choisi.

## 5. Procédés chimiques

### 5.1 Oxydation chimique in situ (ISCO)

<b>Autres désignations</b>
En anglais: in situ chemical oxidation (ISCO).
<b>Principe</b>
L'oxydation chimique a pour but de détruire les polluants organiques ou inorganiques visés en les décomposant en sous-produits non nuisibles ou de les transformer de manière à diminuer leur mobilité (p. ex. précipitation).
<b>Fonctionnement</b>
L'oxydation désigne une réaction chimique, souvent provoquée par l'oxygène, par laquelle des électrons sont retirés à un autre élément ou composés. Cette réaction chimique entre l'oxygène et les polluants contenus dans l'eau est déclenchée en introduisant de l'ozone, du peroxyde d'hydrogène ou du permanganate, avec ou sans l'appui de catalyseurs. Les composés nuisibles sont alors détruits et transformés en molécules inoffensives. Les substances inorganiques forment parfois des oxydes, qui peuvent être retirés de l'eau.
<b>Description technique</b>
<p>Un agent oxydant chimiquement très réactif est introduit dans l'aquifère pour qu'il réagisse avec les polluants dissous. La réaction d'oxydation démarre dès qu'un contact efficace s'établit entre l'oxydant et les polluants. La vitesse du processus est principalement limitée par le transfert de l'oxydant vers les polluants. La concentration des polluants peut en outre augmenter à nouveau plusieurs jours ou plusieurs mois après l'assainissement si des substances qui se trouvaient dans des secteurs peu perméables situés hors d'atteinte de l'oxydant diffusent dans des zones de perméabilité supérieure. Les oxydants suivants, qui ont fait leurs preuves, sont disponibles:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• permanganate de potassium ou de sodium;</li> <li>• réactif de Fenton (mélange d'une solution de peroxyde d'hydrogène et d'une solution saline de Fe II);</li> <li>• ozone (distance de transport faible, donc inapproprié pour les longs panaches de pollution);</li> <li>• persulfate.</li> </ul> <p>On installe en règle générale plusieurs puits d'infiltration ainsi qu'un ou plusieurs piézomètres de contrôle, puis on utilise ce réseau pour introduire l'oxydant dans l'aquifère en solution diluée. Ce procédé convient aux terrains de perméabilité élevée et homogène. Lorsque la perméabilité de la zone saturée est hétérogène, l'oxydant n'est transféré que par diffusion, si bien qu'il n'atteint pas tous les polluants. Ces derniers migreront alors dans l'aquifère après plusieurs jours, semaines ou mois.</p> <p>Lorsqu'on utilise de l'ozone, on installe en règle générale un système d'aspiration de l'air interstitiel en plus des puits d'infiltration et des piézomètres de contrôle. Outre la zone saturée du sol, l'ozone peut être utilisé dans la zone insaturée du fait de son état gazeux.</p> <p>L'ozone ayant une stabilité et un rayon d'action faibles, le réseau de puits et de piézomètres associé à sa mise en œuvre doit être très serré. Ce procédé ne convient donc qu'aux foyers de pollution d'extension limitée.</p>

<p>Il est souvent nécessaire de pratiquer des essais préalables en laboratoire ou sur le terrain pour déterminer la quantité d'oxydant nécessaire, son rayon d'action, les paramètres d'infiltration et la quantité de polluants présente sur le terrain ainsi que les effets de recontamination et la dissémination possible de métabolites ou d'autres substances.</p>	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	Eau souterraine, zone insaturée dans certaines conditions.
Polluants visés	<p>Selon l'oxydant retenu:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ permanganate de potassium ou de sodium: HCC, alcènes (halogénés), BTEX sauf le benzène, HAP à faible poids moléculaire;</li> <li>▪ réactif de Fenton: composés aliphatiques à courte chaîne, HCC, BTEX, HAP à faible poids moléculaire, cyanures libres, chlorobenzènes, chlorophénols;</li> <li>▪ ozone: alcènes (halogénés), BTEX, HAP à faible poids moléculaire;</li> <li>▪ persulfate: alcènes (halogénés) et alcanes halogénés, BTEX, HAP à faible poids moléculaire, HCP à courte chaîne, etc.</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Très bonne connaissance des conditions géologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques; terrain de perméabilité bonne à très bonne; terrain homogène; connaissance de la configuration de la pollution; éventuellement essais en laboratoire et sur le terrain.
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Terrain de perméabilité faible ou irrégulière.</li> <li>▪ Une forte teneur en substances organiques (p. ex. tourbe) ou en composés inorganiques réduits accroît le besoin d'agent oxydant, ce qui rend le procédé économiquement inintéressant.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
<p>Alimentations usuelles (électricité, eau), éventuellement raccordement aux égouts, assise plane pour la préparation et pour l'injection de l'agent oxydant. En ce qui concerne l'alimentation en ozone, il est parfois économiquement intéressant d'installer un générateur d'ozone qui le produit soit à partir de l'air ambiant, soit à partir d'oxygène technique. Le stockage et la manipulation des produits chimiques très oxydants requièrent d'importantes mesures de sécurité.</p>	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de la qualité de l'eau souterraine dans des puits ou des piézomètres de contrôle.</li> <li>▪ Suivi de la pression d'injection et des quantités injectées.</li> <li>▪ Suivi des produits d'oxydation (nature et mobilité).</li> </ul>	

<b>Variantes</b>
La zone à assainir doit éventuellement être confinée au moyen de mesures hydrauliques ou de parois étanches.
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Procédés de pompage et traitement.</li></ul>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
Ce procédé d'assainissement, largement utilisé, fournit généralement de bons résultats. Sa réussite dépend cependant de nombreux facteurs, si bien que sa mise en œuvre est relativement complexe et qu'il peut générer des effets secondaires indésirables si tous les paramètres cruciaux ne sont pas respectés. On en connaît une application en Suisse.
<b>Stade de développement et état du marché</b>
Ce procédé correspond à l'état de la technique. Des bureaux techniques et des entreprises d'assainissement expérimentés en la matière sont actifs en Suisse.

## 5.2 Réduction chimique in situ (ISCR)

Autres désignations	
En anglais: in situ chemical reduction (ISCR).	
Principe	
<p>L'injection d'un agent réducteur chimique sous forme liquide dans le sol ou dans l'eau souterraine provoque une réduction chimique in situ (ISCR). Le sulfate de Fe II, le dithionite de sodium et le sulfite de potassium sont des agents réducteurs typiques. Contrairement à l'injection de HRC® (hydrogen releasing compounds = composés larguant de l'hydrogène), qui vise à stimuler la biodégradation de HCHV, l'injection d'un agent réducteur sert essentiellement à faire précipiter des métaux lourds, en particulier du chrome Cr VI. Mais il permet généralement aussi d'immobiliser des métaux lourds tels que mercure, nickel, cadmium ou plomb.</p>	
Fonctionnement	
<p>Le Cr VI est réduit en Cr III lorsqu'on le met en contact avec un agent réducteur approprié. Puis le chrome réduit est précipité sous la forme d'hydroxyde de Cr III [Cr(OH)<sub>3</sub>] ou de chromite, insolubles, afin qu'il se dépose dans la matrice du sol.</p>	
Description technique	
<p>Il est essentiel que l'agent réducteur injecté soit réparti régulièrement dans toute la partie du terrain à traiter, qui doit être bien perméable et aussi homogène que possible. L'agent réducteur est habituellement mélangé à de l'eau, puis introduit dans des puits d'injection. Le nombre et l'emplacement de ces puits sont déterminés par la perméabilité du sous-sol et par la répartition de la pollution.</p> <p>Selon le procédé appliqué, il faut tenir compte du fait que l'injection de sulfate de Fe II, de dithionite de sodium ou de sulfite de potassium peut provoquer la constitution de dépôts due à la dégradation microbologique de substrats organiques et la formation de précipités composés d'oxydes et d'hydroxydes de fer ainsi que d'hydroxyde de Cr III. Or ces dépôts sont susceptibles de colmater l'aquifère, notamment lorsque sa porosité effective est faible.</p>	
Modalités d'application	
Milieus concernés	Eau souterraine, eau interstitielle.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Principalement polluants inorganiques (Cr VI et autres métaux lourds);</li> <li>▪ exceptionnellement pour stimuler des processus de biodégradation anaérobies.</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Aquifère perméable (en règle générale à porosité d'interstice); bonne connaissance des caractéristiques hydrogéologiques et hydrauliques.

<b>Limites d'application</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ce procédé ne convient pas aux sols très inhomogènes ou peu perméables.</li> <li>▪ Ce procédé n'est pas applicable en cas de contamination par plusieurs polluants dont l'un ou plusieurs peuvent se mobiliser – se dissoudre – dans le milieu réducteur. C'est par exemple le cas lorsqu'une pollution au chromate comprend aussi de l'arsenic.</li> <li>▪ La précipitation d'oxydes, de carbonates et de sulfures dans le sol et dans l'eau souterraine accroît considérablement la consommation d'agents réducteurs.</li> </ul>
<b>Infrastructure requise</b>
<p>Les puits d'injection peuvent être installés presque partout. Ils doivent être alimentés par des conduites. Une alimentation en électricité et en eau est requise. Le produit à injecter peut être acquis sous forme prémélangée, ce qui évite de devoir le préparer sur place. Les agents réducteurs doivent être stockés d'une manière sûre. Leur manutention doit faire l'objet de prescriptions et de mesures de sécurité claires.</p>
<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de la consommation d'agents réducteurs.</li> <li>▪ Contrôle de l'efficacité de l'épuration dans des piézomètres.</li> <li>▪ Suivi de la teneur en oxygène dans l'eau souterraine (et dans l'air interstitiel).</li> </ul>
<b>Variantes</b>
<p>Les agents réducteurs sont insuffisamment stables quand l'eau souterraine contient de l'oxygène et que le potentiel redox est élevé. Dans ces conditions, il est utile d'injecter en plus une source de carbone organique (p. ex. mélasse ou éthanol), qui jouera le rôle de donneuse d'électrons. La consommation d'oxygène et l'abaissement du potentiel redox ainsi induits facilitent l'injection des agents réducteurs inorganiques et leur confèrent un rayon d'action supérieur.</p>
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
<p>La réduction chimique in situ peut être combinée, selon le site, avec un procédé de pompage et traitement, en particulier dans la phase initiale. L'eau souterraine enrichie en agent réducteur est alors pompée pour être réinfiltrée en amont, ce qui empêche l'afflux d'eau souterraine très oxygénée.</p> <p>Dans certains cas particuliers, il est possible de combiner la réduction chimique in situ avec, par exemple, un procédé biologique pour assainir un secteur peu contaminé.</p>
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
<p>Une certaine expérience est disponible aux États-Unis et quelques cas d'application existent en Europe. Mais ce procédé n'est pas très répandu et pas encore appliqué dans tous les pays européens. C'est la précipitation de Cr VI qui devrait faire l'objet de l'expérience la plus vaste à l'avenir.</p>

**Stade de développement et état du marché**

La réduction chimique in situ doit être considérée comme un procédé innovant. Il existe en Europe quelques bureaux techniques et entreprises d'assainissement qui la proposent en bénéficiant d'expérience à son sujet.

### 5.3 Nanofer

<b>Autres désignations</b>
<p>Réduction chimique au nanofer. Les nanoparticules, dont le fer élémentaire (à valence zéro), qui jouent le rôle de donneuses d'électrons dans le processus de décontamination sont regroupées ci-après sous le terme «nanofer».</p> <p>En anglais: chemical reduction by using nano iron particles.</p>
<b>Principe</b>
<p>Des particules de fer élémentaire très fines, de taille nanométrique (1–100 nm), sont injectées dans le sol ou dans l'eau souterraine, généralement dans une matrice liquide, afin d'initier une réduction chimique. On entend par là une réaction chimique lors de laquelle des électrons sont retirés d'un élément, d'un ion ou d'une molécule. Leur nombre d'oxydation s'en trouve abaissé (réaction redox).</p>
<b>Fonctionnement</b>
<p>Le fer élémentaire est un agent réducteur efficace, qui est oxydé en Fe II lors de la réduction de son partenaire de réaction. Le nanofer est 10 à 1000 fois plus réactif que le fer granulaire grâce à sa petite taille et à sa grande surface spécifique. Il faut le modifier pour pouvoir le transférer jusqu'à la pollution dans le sous-sol et pour accroître l'efficacité de l'assainissement qu'il induit. On y parvient, par exemple, en traitant la surface des particules de nanofer, en les revêtant d'une couche particulière, en les introduisant dans du (micro)charbon actif colloïdal, en produisant une émulsion, en rendant le nanofer hydrophobe par introduction dans un mélange d'huile et d'agent tensioactif ou en confectionnant une suspension aqueuse stabilisée.</p> <p>Lorsque l'assainissement d'un site contaminé fait appel à du nanofer élémentaire, il est aussi possible d'initier la dégradation réductrice en appliquant un processus biologique. Ainsi, la réduction au nanofer génèrera des processus biotiques, et pas uniquement abiotiques, qui dégraderont, par exemple, des composés d'hydrocarbures.</p>
<b>Description technique</b>
<p>L'utilisation de nanofer très réactif spécialement traité en suspension aqueuse permet de l'injecter de manière ciblée dans le sous-sol. La suspension doit être introduite dans l'aquifère de telle sorte que le nanofer se répartisse bien dans l'eau souterraine contaminée afin qu'il puisse réagir avec les polluants. Les points d'injection sont généralement espacés d'un à quelques mètres.</p> <p>Lorsque du nanofer traité réagit avec l'eau souterraine, avec les polluants et avec d'autres substances présentes, il perd sa réactivité après quelques semaines. Il est oxydé et précipité sous la forme d'hydroxyde de fer (rouille) et d'oxyde de fer, en colmatant parfois les pores.</p>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieus concernés	Zone insaturée, zone saturée, eau souterraine, eau interstitielle, air interstitiel, sol.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polluants organiques biodégradables par réduction, par exemple les hydrocarbures chlorés, en particulier le tétrachloréthène, le trichloréthène et le dichloréthène;</li> <li>▪ polluants inorganiques (Cr VI) et autres métaux lourds (Hg, Pb, Ag, Ni, Cu, Zn) susceptibles d'être précipités par réaction chimique.</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Aquifère perméable (en règle générale à porosité d'interstice); bonne connaissance des caractéristiques hydrogéologiques et hydrauliques.
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ce procédé n'est applicable que de manière limitée pour stimuler une biodégradation à lui seul, mais une synergie entre la réaction abiotique et la stimulation de la biodégradation a été observée.</li> <li>▪ Il est difficile de répartir régulièrement le nanofer dans le sous-sol.</li> <li>▪ Le rayon d'action du nanofer est très faible.</li> <li>▪ Certaines instances officielles de protection de l'environnement estiment que l'utilisation de nanofer pose relativement peu de problèmes. Mais il faut veiller, lors de l'assainissement, à ce que le nanofer et ses sous-produits ne sortent pas du secteur d'intervention délimité spatialement et en particulier à ce qu'ils n'atteignent pas un autre aquifère.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
Ce procédé ne requiert que des puits d'injection avec leurs conduites d'alimentation, des citernes pour stocker le nanofer en suspension et un accès approprié.	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Contrôle de l'efficacité de la dégradation dans des piézomètres.</li> <li>▪ Suivi des quantités injectées.</li> <li>▪ Suivi du rayon d'action du nanofer.</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
Les variantes de ce procédé correspondent principalement aux différentes sortes de fer utilisées et de vecteurs avec lesquels elles sont introduites dans le sous-sol. Il existe par exemple des matériaux composites qui comprennent des structures de fer de taille nanométrique liées fixement à du carbone. La combinaison de ces deux matériaux assure tout à la fois une bonne réactivité chimique est une accumulation de polluants par adsorption.	

**Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires**

Il est possible de combiner ce procédé avec une méthode biologique et avec un pompage et traitement visant à assainir l'eau souterraine. Du nanofer peut aussi être introduit dans un puits de circulation d'eau souterraine. Si le nanofer est injecté dans le sous-sol selon une ligne, il peut former une zone réductrice qui sera franchie par l'écoulement souterrain en agissant à la manière d'une paroi réactive passive traversée sur toute sa surface.

**Évaluation et expérience pratique**

Jusqu'ici, le nanofer a été utilisé surtout pour remédier à des atteintes aux eaux souterraines dues à des hydrocarbures chlorés (HCC). Ce procédé innovant ne fait encore l'objet que d'une expérience restreinte. Plusieurs fabricants proposent divers modes d'application du nanofer.

**Stade de développement et état du marché**

L'injection de nanofer dans le sous-sol est un procédé d'assainissement innovant qui est en cours de développement en Europe, où il n'a été appliqué qu'à quelques reprises jusqu'ici. L'expérience à son sujet est donc encore relativement restreinte.

La conception et l'exécution de l'assainissement d'eau souterraine au moyen de nanofer ne devraient être confiées qu'à des bureaux techniques et à des fabricants bénéficiant d'une expérience appropriée.

## 6. Procédés d'immobilisation

### 6.1 Immobilisation in situ

<b>Autres désignations</b>
<p>Immobilisation.</p> <p>En anglais: stabilisation, fixation, solidification.</p>
<b>Principe</b>
<p>Les polluants sont soit enrobés, soit mués en forme peu soluble dans le terrain par ajout d'une substance d'étanchéification ou d'un réactif afin qu'ils perdent leur mobilité.</p>
<b>Fonctionnement</b>
<p>Les polluants sont soit mués en forme peu soluble par injection d'un réactif, soit enrobés d'une substance appropriée dans le terrain. Les réactifs peuvent revêtir la forme d'agents précipitants, d'agents adsorbants ou d'échangeurs d'ions (voir les points consacrés à l'oxydation et à la réduction). Le colmatage des pores du sol est assuré par du verre soluble – le plus souvent – ou par une autre substance d'étanchéification (p. ex. suspension de ciment et de bentonite), pour empêcher tout déplacement d'eau ou dégazage des polluants.</p>
<b>Description technique</b>
<p>La substance d'étanchéification ou le réactif est injecté dans le sous-sol sous pression, dans une suspension ou une solution aqueuse. Les lances d'injection utilisées sont espacées d'un à quelques mètres, de manière à former un réseau relativement dense.</p> <p>Les substances d'étanchéification suivantes sont utilisables:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ verre soluble (silicate d'alcalin qui réagit avec des ions métalliques plurivalents en produisant un gel silicaté aqueux);</li> <li>▪ ciment (réagit avec l'eau interstitielle en produisant une pâte qui durcit en liant les polluants);</li> <li>▪ bentonite (substance d'étanchéification minérale gonflante qui adsorbe des métaux lourds);</li> <li>▪ gypse, calcaire (non résistants à l'eau);</li> <li>▪ thermoplastiques (fluides à haute température, ils durcissent en enrobant les polluants lors du refroidissement);</li> <li>▪ polymères organiques (forment une masse solide similaire à une éponge qui enrobe les polluants).</li> </ul> <p>Les substances d'étanchéification peuvent aussi être combinées. C'est ainsi que des suspensions de ciment et de bentonite sont souvent mises en œuvre.</p>

<b>Modalités d'application</b>	
Milieux concernés	Zone saturée, zone insaturée.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tous les types de polluants;</li> <li>▪ métaux lourds (p. ex. chrome VI), qui sont précipités sous la forme de composés insolubles (p. ex. chrome III) au contact de sulfate de fer ou d'un autre agent précipitant;</li> <li>▪ polluants adsorbables;</li> <li>▪ polluants susceptibles d'être fixés par un échange d'ions.</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Il est préférable que le sous-sol soit homogène et au moins moyennement perméable.
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le produit injecté doit se répartir régulièrement dans le sous-sol.</li> <li>▪ Ce procédé n'est applicable en roche fissurée que si la fissuration est connue avec précision.</li> <li>▪ Ce procédé n'est pas applicable lorsque la diminution de la pollution doit être durable.</li> <li>▪ Les procédés d'immobilisation, à l'exception de la précipitation, servent essentiellement à confiner des polluants et non à décontaminer un site.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
Alimentations usuelles (électricité, eau) et assise plane pour les installations et les conduites de raccordement. Accès aisé. Procédé également applicable sous des bâtiments.	
<b>Suivi</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suivi de l'avancement de l'assainissement au moyen de piézomètres de contrôle placés en aval.</li> <li>▪ Contrôle de la propagation du produit injecté.</li> <li>▪ Suivi des paramètres techniques: pression, quantités, etc.</li> </ul>	
<b>Variantes</b>	
Les variantes correspondent essentiellement au choix du produit injecté.	
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>	
Ce procédé peut être combiné avec d'autres techniques in situ selon le produit injecté. Les combinaisons possibles sont très restreintes lorsqu'on utilise une substance d'étanchéification destinée à colmater les pores.	
<b>Évaluation et expérience pratique</b>	
La perméabilité du terrain est diminuée par la solidification de la pollution. Les procédés d'immobilisation ont fait leurs preuves et ils sont souvent mis en œuvre. Des expériences en la matière sont disponibles en suffisance.	

**Stade de développement et état du marché**

Les procédés d'immobilisation correspondent généralement à l'état de la technique. Ils sont aussi mis en œuvre en Suisse. Tous les bureaux techniques et entreprises d'assainissement mandatés devraient bénéficier d'une expérience appropriée.

## 6.2 Vitrification in situ

<b>Autres désignations</b>	
En anglais: in situ vitrification.	
<b>Principe</b>	
La pollution est immobilisée en la soumettant à une température très élevée, qui fait fondre la roche. Les polluants organiques sont détruits et les polluants inorganiques sont bloqués dans une matrice vitrifiée sous l'effet d'une température portée à plus de 1500 °C par l'application d'un courant électrique.	
<b>Fonctionnement</b>	
Le sol est échauffé jusqu'à la température de fusion des grains de minéraux et de roche. Des structures vitreuses se forment lors du refroidissement. L'eau contenue dans le sol est évaporée et les polluants volatils s'échappent – pour autant qu'ils ne soient pas détruits sous l'effet de la température. La plus grande partie des polluants inorganiques est fixée dans la matière fondue. Il convient de noter qu'il n'est pas possible de prévoir et de surveiller les produits issus d'un processus in situ qui ne serait pas entièrement contrôlable. Le volume des structures formées peut être notablement inférieur à celui du matériau initial.	
<b>Description technique</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Augmentation de la température jusqu'au-delà de 1500 °C par application d'un courant continu de forte intensité passant entre des électrodes fichées dans le sol.</li> <li>▪ Des additifs tels que sable ou verre usagé peuvent éventuellement être ajoutés si la teneur en silicium du sous-sol est insuffisante pour former une matrice silicatée.</li> <li>▪ Le dégagement d'émissions incontrôlables est inévitable ou techniquement très difficile à juguler.</li> </ul>	
<b>Modalités d'application</b>	
Milieus concernés	Sol, zone insaturée.
Polluants visés	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ polluants inorganiques (immobilisation);</li> <li>▪ polluants organiques (destruction).</li> </ul>
Géologie/hydrogéologie	Sols riches en silicates et pauvres en eau.
<b>Limites d'application</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inapplicable dans un aquifère.</li> <li>▪ Inapplicable lorsque des polluants peuvent s'échapper lors de l'échauffement du sol.</li> <li>▪ Inapplicable en zone bâtie.</li> </ul>	
<b>Infrastructure requise</b>	
Toute la surface de la zone polluée doit rester libre. Ce procédé nécessite une alimentation en électricité de forte intensité, voire une génératrice de courant continu.	

<b>Suivi</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Contrôle de l'efficacité de l'assainissement (extension du compartiment vitrifié).</li><li>▪ Suivi de la température, y compris aux environs.</li><li>▪ Surveillance des émissions et des immissions.</li></ul>
<b>Variantes</b>
Frittage (à environ 1000 °C).
<b>Combinaisons de procédés possibles ou nécessaires</b>
Aucune connue.
<b>Évaluation et expérience pratique</b>
Ce procédé est très coûteux du fait de sa grande consommation d'énergie. De plus, il est encore peu développé et seulement au stade de l'expérimentation. Hormis l'immobilisation des polluants, il a plutôt des effets préjudiciables sur le sous-sol ainsi que sur l'atmosphère ambiante.
<b>Stade de développement et état du marché</b>
Ce procédé a été développé aux États-Unis et testé dans un petit nombre de cas. Ses avantages ne compensent pas ses inconvénients, aussi ne sera-t-il très vraisemblablement pas mis en œuvre en Europe.