

Code de Bonne Pratique 6

Atténuation naturelle surveillée des polluants dans le sol

Bruxelles Environnement



Contenu

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introduction..... | 3 |
| 2. | Description de la technique et des principes technologiques mis en œuvre..... | 4 |
| 2.1. | Description des processus responsables de l'atténuation naturelle..... | 4 |
| 2.1.1. | Les processus physiques..... | 4 |
| 2.1.2. | Les processus chimiques..... | 5 |
| 2.1.3. | La biotransformation des composés polluants..... | 6 |
| 2.2. | Combinaison avec d'autres méthodes de prise en charge..... | 7 |
| 3. | Objectifs poursuivis : panache versus noyau..... | 8 |
| 4. | Polluants et situations les plus favorables (notions qualitatives)..... | 9 |
| 4.1. | Polluants susceptibles d'être pris en charge par atténuation naturelle..... | 9 |
| 4.2. | Situations les plus favorables..... | 9 |
| 5. | Examen de la faisabilité technique..... | 11 |
| 5.1. | Critères d'acceptation..... | 11 |
| 5.2. | Etape préliminaire : faisabilité à priori..... | 12 |
| 5.3. | Examen spécifique de la faisabilité..... | 16 |
| 5.3.1. | Première étape de l'examen..... | 16 |
| 5.3.2. | Deuxième étape de l'examen..... | 16 |
| 5.3.3. | Troisième étape de l'examen..... | 17 |
| 5.4. | Nécessité d'un test pilote..... | 20 |
| 6. | Description d'une installation type..... | 21 |
| 7. | Projet d'assainissement ou de gestion du risque..... | 22 |
| 8. | Descriptif de l'installation qui sera mise en place..... | 23 |
| 9. | Limitation des incidences du projet sur l'environnement : odeurs, bruits, poussières, ... | 24 |
| 10. | Supervision du traitement..... | 25 |
| 10.1. | Règles de base de la supervision..... | 25 |
| 10.2. | Mesures de surveillance : dispositif type..... | 25 |
| 10.3. | Mesures de supervision : paramètres de supervision du traitement et fréquences..... | 27 |
| 11. | Rapportage, optimisation et mesures correctives..... | 31 |
| 11.1. | Rapportage..... | 31 |
| 11.2. | Mesures correctives et optimisation..... | 31 |
| 12. | Mesures de validation et schéma décisionnel arrêt-prolongation du traitement | 33 |
| 13. | Monitoring à long terme éventuel : dispositif et type de mesures..... | 35 |
| 14. | Recommandation en matière de santé, sécurité et organisation..... | 37 |
| 15. | Sources bibliographiques..... | 38 |



1. Introduction

La technique d'intervention s'intitule « Atténuation naturelle surveillée des polluants dans le sol (ANS) ».

Elle vise la prise en charge d'une pollution du sol et des eaux souterraines par la mise en œuvre sous surveillance des processus naturels prenant place dans le sol, sans intervention humaine directe, dans un délai raisonnable en comparaison avec les techniques de traitement plus actives. Les processus naturels responsables du traitement peuvent être de type chimique, physique ou biologique. Ils aboutissent soit à une diminution des teneurs, quantités ou volumes des polluants présents dans le sol, soit à réduction de mobilité ou de toxicité des polluants.

Cette technique de prise en charge repose sur une bonne compréhension et une évaluation quantitative des mécanismes et processus naturels opérant dans le site pollué. Il doit également se baser sur la preuve que les processus mis en œuvre débouchent sur une protection suffisante des personnes et de l'environnement contre l'exposition aux polluants présents.

Remarque

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

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



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

2.1. Description des processus responsables de l'atténuation naturelle

Les processus mis en œuvre dans l'atténuation naturelle surveillée (ANS) peuvent aboutir à une réduction des risques engendrés par la présence de polluants dans le sol (dans les phases solide, liquide et gazeuse du sol et éventuellement sous la forme d'une phase libre de produit pur) de différentes manières :

- En résultat de la transformation des composés polluants en des formes moins néfastes par l'action de mécanismes destructifs tels que la dégradation biologique ou abiotique (hydrolyse, oxydation, réduction,) ;
- En résultat de la diminution des teneurs en composés polluants, ces derniers restant inchangés. Les mécanismes responsables peuvent être par exemple la dilution lors de la migration d'un panache ou la volatilisation de composés vers la phase gazeuse de la couche insaturée et l'atmosphère ;
- En résultat de la réduction de la mobilité ou de la disponibilité des polluants par suite de leur adsorption sur la phase solide du sol ou la précipitation.

Les polluants peuvent être présents dans le sol au niveau d'un noyau de pollution où le polluant est présent à de fortes teneurs, parfois même sous forme de produit pur piégé dans les pores du sol (pollution résiduelle) ou évoluant sous forme d'une phase libre (surnageante ou plongeante). Les polluants peuvent également être rencontrés dans un panache de pollution alimenté par le noyau de pollution suite à la libération progressive et la migration des polluants en résultat des mécanismes d'advection, diffusion et dispersion.

La dégradation des polluants peut déboucher sur la production de produits inoffensifs, naturellement présents dans le sol, tels que le CO₂, l'H₂O et le Cl⁻, ou au contraire donner naissance à des produits intermédiaires tout aussi nocifs ce qui implique la nécessité de leur prise en charge ultérieure.

Dans le sol, la dégradation biologique est de loin le mécanisme le plus important tandis que les phénomènes abiotiques (hydrolyse, oxydation, ...) se produisent à une vitesse de loin plus réduite.

Les phénomènes physiques aboutissant à une diminution des teneurs dans la nappe d'eau souterraine, tels que la précipitation et l'adsorption, permettent de réduire les risques actuels mais ils ne limitent pas la charge polluante dans le sol et, de par leur réversibilité, ils peuvent déboucher à plus ou moins long terme, sur un rebond des teneurs en cas de modification des conditions prévalant dans le sol.

2.1.1. Les processus physiques

Les processus physiques suivants sont actifs dans l'atténuation naturelle des polluants : la dispersion, la dilution et la volatilisation. Ces processus débouchent sur une diminution des teneurs mesurées dans les différentes phases du sol tandis que la charge polluante globale dans le sol reste inchangée.

- Dispersion hydrodynamique : mode de dispersion des composés polluants lors de leur mouvement par advection (et aussi diffusif) le long de l'axe de circulation de l'eau souterraine et les axes transversaux.

- **Diffusion** : mouvement des molécules en fonction d'un gradient de teneurs dans un milieu. Même si le milieu (air du sol, eau souterraine) reste immobile, la diffusion prend cours. Les vitesses de migration sont lentes par rapports aux mouvements d'advection.
- **La dilution** des teneurs en polluants prend place lorsque le panache de pollution occupe un volume croissant en fonction de la distance parcourue (à partir du noyau). La dilution peut également résulter de l'infiltration d'eau non polluée vers le panache de pollution, à partir de la surface du sol (eaux météoriques) ou partir de couches aquifères sus- ou sous-jacentes.
- **La volatilisation** prend en compte la mobilisation de composés volatiles à partir de l'eau souterraine, d'une phase libre de produit pur ou des contaminants adsorbés sur la matrice solide du sol, en direction de la phase gazeuse du sol et éventuellement ensuite en direction de l'atmosphère.

Ces processus physiques sont contrôlés par les propriétés spécifiques des polluants et les conditions physiques prévalant dans le sol : T° , gradients de pressions, gradients de teneurs, gradients hydrauliques, etc.. Les propriétés du sol telles que : teneurs en matière organique et surface spécifique, porosité, perméabilité, ... sont également importantes.

2.1.2. Les processus chimiques

On peut distinguer les processus suivants :

- **L'adsorption** (parfois considérée comme un processus physique) résultant de l'interaction du polluant avec la surface des particules de la phase solide du sol. Cette interaction peut être de type électrostatique faisant intervenir les charges électriques des surfaces de la phase solide (minéraux des argiles et matière organique) et les composés polluants chargés (ions métalliques, composés organiques ionisés). Elle peut être aussi la résultante des forces de Vanderwaals pour lesquelles la surface spécifique de la phase solide du sol est prépondérante (particules argileuses, colloïdes d'oxydes métalliques, matière organique) de même que la taille et les propriétés hydrophobes de la molécule de polluant.

L'importance de l'adsorption d'un polluant dans un sol donnée par le coefficient de distribution K_d :

$$K_d = C_s / C_l \text{ en m}^3/\text{kg} \text{ où}$$

C_s est la teneur en polluant dans le sol (en kg polluant/kg de sol sec)

C_l est la teneur en polluant dans la phase liquide du sol (en kg/m³)

Le mécanisme d'adsorption est responsable du retard pris par les polluants lors de leur migration par advection dans la nappe d'eau souterraine, par rapport à la vitesse de circulation de l'eau. Ce retard est exprimé de manière quantitative par le facteur de retard R

$$R = 1 + \rho_b \cdot K_d / n \text{ sans unité où}$$

ρ_b = densité apparente du sol en kg/m³

n = porosité totale du sol

L'adsorption joue un rôle dans l'atténuation naturelle de la pollution dans la mesure où elle est responsable d'une diminution des teneurs présentes dans l'eau souterraine, la charge polluante dans les couches aquifères du sol restant toutefois inchangée. L'adsorption influence également l'action d'autres processus de l'atténuation naturelle tels que la biodégradation et la dégradation abiotique (hydrolyse) en résultat de la perte de disponibilité des composés polluants une fois adsorbés.

- La dégradation chimique abiotique faisant intervenir les mécanismes suivants :
 - o L'hydrolyse et les réactions de substitution par lesquelles un composé organique (ou un complexe organométallique) réagit avec l'eau ou un ion hydroxyle pour former un autre composé (un alcool par exemple) ;
 - o Les réactions d'oxydo-réduction pouvant parfois être catalysées par des composants du sol (le fer, par exemple) ;
 - o Les réactions d'élimination transformant par exemple un alcane chloré en alcène.

Ces processus chimiques jouent un rôle peu important dans la dégradation abiotique des composés non polaires tels que les hydrocarbures de pétrole. Ils jouent cependant un rôle dans la dégradation par hydrolyse de composés polaires tels que les chloro-éthanés. Pour cette famille de composés, l'importance de cette hydrolyse augmente avec une diminution du degré de chloration. Le 1,1,1-TCA s'hydrolyse lentement (demi-vie du composé de l'ordre de plusieurs années), le 1,1-DCA s'hydrolyse plus rapidement tandis que pour le CA (chloro-éthane), la réaction d'hydrolyse est rapide avec une demi-vie du CA de l'ordre de quelques semaines.

D'une manière générale, l'importance de ces types de dégradation des polluants reste modeste en comparaison avec l'adsorption et la biotransformation.

2.1.3. La biotransformation des composés polluants

Dans le sol, de nombreux organismes (bactéries et champignons) sont en mesure de métaboliser des composés polluants. Idéalement, ces composés sont dégradés en des composés inoffensifs et naturellement présents dans les sols tels que le CO₂ et l'H₂O en conditions aérobiques, et en CH₄ et CO₂ en conditions anaérobiques.

Durant le processus de dégradation, des métabolites et produits secondaires, parfois néfastes ou toxiques, peuvent apparaître et même s'accumuler dans le sol.

Quelques exemples de processus de biotransformation, parmi les plus couramment enregistrés dans le sol peuvent être cités :

- Déhalogénéation réductive des solvants chlorés (ou halorespiration), en conditions fortement réductrices dans le sol (milieu méthanogène) ;
- Réduction biochimique de composés inorganiques et organiques où les microorganismes jouent le rôle de catalyseurs : transformation du nitrobenzène en aniline, réduction du Cr^{VI} en Cr^{III}, réduction du Nitrate en N₂, réduction du sulfate en sulfure avec en conséquence, la précipitation des métaux lourds présents dans la couche aquifère (immobilisation des pollutions métalliques) ;
- Oxydation des hydrocarbures en H₂O et CO₂ en présence d'accepteurs d'électrons (O₂) et de nutriments.

Ces processus de biotransformation prennent place à des vitesses satisfaisantes pourvu que les conditions suivantes soient respectées dans le sol :

- Une valeur de pH proche de la neutralité : optimum situé entre 6 et 8, valeurs tolérables situées entre 5 et 9 ;
- Pour les processus reposant sur l'oxydation des polluants, un approvisionnement suffisant en O₂ ou autres accepteurs d'électrons : nitrates, sulfates, Fe(III), Mn(IV). Le **Tableau 1** reproduit ci-après présente différents accepteurs d'électrons fréquemment rencontrés dans le sol et pour chacun d'eux, le couple redox actif et les conditions redox du sol nécessaires pour que l'accepteur d'électron soit opérant ;



- Pour les processus reposant sur la réduction des polluants, un approvisionnement suffisant en donneurs d'électrons ;
- Un taux d'humidité et une température suffisants dans le sol pour permettre la réalisation des processus biologiques ;
- Une disponibilité suffisante en nutriments (PO_4^{3-} , ...) pour les microorganismes ;
- Absence d'agents inhibiteurs de l'activité des microorganismes ou de conditions adverses (salinité du sol par exemple) ;
- Présence des microorganismes aptes à mener à bien la biotransformation et ce jusqu'au stade final désiré ;
- Biodisponibilité du polluant.

Tableau 1 : Liste des accepteurs d'électrons et des couples redox susceptibles d'être opérant dans le sol en fonction du potentiel redox du sol (Code van goedepraktijk–Natuurlijkeattenuatie)

| Accepteur d'électron | Couple redox actif | Potentiel redox du sol (mv) |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| O_2 | $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ | + 820 |
| Fe(III) dissous | $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ | + 770 |
| NO_3^- | $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$ | + 430 |
| Mn(IV) phase solide | $\text{MnO}_2/\text{Mn}^{2+}$ | + 380 |
| NO_2^- | NO_2^-/NO | + 350 |
| Fe(III) phase solide | $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ | 0 |
| SO_3^{--} | $\text{HSO}_3^-/\text{HS}^-$ | -110 |
| SO_4^{--} | $\text{SO}_4^{--}/\text{HS}^-$ | -230 |
| CO_2 | CO_2/CH_4 | -240 |

Au sein d'un même panache de contamination, les conditions redox du sol peuvent différer en fonction de la distance par rapport à la source de pollution de sorte différents accepteurs d'électrons peuvent être opérant de manière simultanée en différentes positions du panache.

2.2. Combinaison avec d'autres méthodes de prise en charge

L'ANS est fréquemment mise en œuvre après utilisation d'autres méthodes de prise en charge « plus actives », telles que l'excavation et la prise en charge hors site des matériaux du noyau, le traitement d'une phase libre par pump and treat au sein du noyau, ... Elle correspond alors à une phase de finition surveillée.

A l'inverse, l'ANS peut être identifiée comme la méthode de prise en charge la plus appropriée et céder la place, en cas de performances inférieures aux prévisions, à d'autres méthodes « plus actives », principalement si des cibles sensibles sont menacées par la progression du panache.

3. Objectifs poursuivis : panache versus noyau

L'ANS, pour laquelle les processus de biotransformation jouent un rôle prépondérant, s'applique d'avantage au panache de pollution qu'au noyau.

En effet, au niveau du noyau, les teneurs en polluants peuvent être élevées et ainsi se montrer toxiques ou peu favorables pour les microorganismes responsables de la biotransformation.

Par ailleurs, dans les zones de noyau, les polluants les moins solubles (hydrocarbures par exemple) sont souvent présents sous forme de phase libre (DNALP) peu bio-disponible pour les microorganismes de sorte que [le traitement](#) de ces zones par voie biologique ne peut être réalisé dans des délais réalistes.

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

4.1. Polluants susceptibles d'être pris en charge par atténuation naturelle

Le **Tableau 2** présenté ci-après reprend pour les principaux polluants rencontrés dans le sol, une appréciation du niveau de connaissance des mécanismes d'atténuation opérant dans le sol et une appréciation des chances de succès de l'atténuation naturelle.

Certaines bases de données reprennent pour les différents polluants rencontrés dans le sol, les voies de dégradation suivies dans les conditions naturelles. On peut citer à cet égard la base de données « University of Minnesota Biocatalysis/Biodegradationdatabase » (<http://eawag-bbd.ethz.ch/>).

4.2. Situations les plus favorables

L'atténuation naturelle surveillée (ANS) des polluants peut être appliquée pour le traitement d'une pollution du sol et de la nappe aquifère avec des chances de résultats favorables lorsque les circonstances suivantes sont rencontrées :

- Le polluant à prendre en charge n'est pas présent au niveau du noyau de pollution à de trop fortes teneurs (toxicité ou conditions défavorables pour les microorganismes) et est réparti de manière homogène ;
- Le polluant n'est pas présent au niveau du noyau de pollution sous forme de phase libre peu accessible (DNALP) piégée dans les pores du sol, par exemple. Compte tenu de la faible biodisponibilité de cette phase libre, le temps nécessaire à la biodégradation peut s'avérer trop long sans mise en œuvre de techniques complémentaires ;
- La source de pollution est éradiquée de sorte que l'arrivée du polluant dans le sol est définitivement interrompue ;
- Sol de composition homogène : absence de couches et de lentilles de texture différentes, absence de voies de circulation préférentielles résultant de la présence d'impétrants et d'infrastructures enterrées ;
- Teneurs en nutriments suffisantes dans le sol et l'eau souterraine ;
- Approvisionnement du sol et migration suffisantes en accepteur d'électrons si transformation par oxydation ou en donneur d'électrons si transformation par réduction ;
- Vitesse de migration des polluants dans le sol compatible avec le temps nécessaire pour l'atténuation de sorte que les cibles sensibles ne sont pas menacées ;
- Présence dans le sol des microorganismes assurant une biotransformation rapide et complète ;
- Données acquises lors de l'étude sont suffisamment complètes et détaillées.

Tableau 2 : Liste des principaux polluants rencontrés dans le sol, appréciation du niveau de connaissance des mécanismes d'atténuation et appréciation des chances de succès de l'atténuation naturelle (Code van Goede Praktijk–Natuurlijkeattenuatie)

| Polluant | Processus d'atténuation les plus importants | Niveau actuel des connaissances sur les mécanismes d'atténuation | Chance de succès de l'atténuation |
|--|---|--|-----------------------------------|
| Polluants organiques | | | |
| Hydrocarbures | | | |
| BTEX | Biotransformation | Haut | Haute |
| Essence - gasoil de chauffage | Biotransformation | Moyen | Moyen |
| Aliphatiques peu volatiles | biotransformation/immobilisation | Moyen | Faible |
| HAP | biotransformation/immobilisation | Moyen | Faible |
| Huiles de créosotage | biotransformation/immobilisation | Moyen | Faible |
| Hydrocarbures oxydés | | | |
| Alcools à faible poids moléculaires, cétones et esters | Biotransformation | Haut | Haute |
| MTBE | Biotransformation | Moyen | Faible |
| HCOV | | | |
| PCE, TCE, CCL ₄ | Biotransformation | Moyen | Faible |
| TCA, DCA | Biotransformation/transformation abiotique | Moyen | Faible |
| Dichlorométhane | Biotransformation | Haut | Haute |
| Chlorure de vinyle | Biotransformation | Moyen | Faible |
| DCE | Biotransformation | Moyen | Faible |
| Composés aromatiques halogénés | | | |
| <u>Fortement halogénés</u> | biotransformation/immobilisation | Moyen | Faible |
| PCB's | | | |
| Pentachlorophénols | | | |
| Chlorophénols | | | |
| Tetrachlorodibenzofuran | | | |
| <u>Faiblement chlorés</u> | | | |
| PCB's | Biotransformation | Moyen | Faible |
| Dioxine | Biotransformation | Moyen | Faible |
| Monochlorobenzène | Biotransformation | Moyen | Moyen |
| Composés aromatiques nitreux | | | |
| TNT, RDX | biotransformation/immobilisation/transformation abiotique | Moyen | Faible |
| Polluants anorganiques | | | |
| Métaux | | | |
| Ni | Immobilisation | Moyen | Moyen |
| Cu, Zn | Immobilisation | Moyen | Moyen |
| Cd | Immobilisation | Moyen | Faible |
| Pb | Immobilisation | Moyen | Moyen |
| Cr | Biotransformation/Immobilisation | Moyen | Faible/moyen |
| Hg | Biotransformation/Immobilisation | Moyen | Faible |
| Non métaux | | | |
| As | Biotransformation/Immobilisation | Moyen | Faible |
| Se | Biotransformation/Immobilisation | Moyen | Faible |
| Oxy-anions | | | |
| Nitrates | Biotransformation | Haut | Faible |
| Perchlorates | Biotransformation | Moyen | Faible |
| Cyanures | | | |
| Libres | Biotransformation | Moyen | Moyen |
| Complexes (fer) | Immobilisation | Moyen | Faible |
| Radio-nucléides | | | |
| ⁶⁰ Co, ¹³⁷ CS | Immobilisation | Moyen | Moyen |
| ³ H | Désintégration | Haut | Moyen |
| ⁹⁰ Sr | Immobilisation | Haut | Moyen |
| ⁹⁹ Tc | Biotransformation/Immobilisation | Faible | Faible |
| ^{238,239,240} Pu | Immobilisation | Moyen | Faible |
| ^{235, 236} U | Biotransformation/Immobilisation | Moyen | Faible |



5. Examen de la faisabilité technique

5.1. Critères d'acceptation

Les principaux critères d'acceptation de l'ANS comme méthode de prise en charge sont les suivants :

- Un monitoring de la situation suffisant a été réalisé établissant que l'atténuation prend bien place dans le sol et se poursuit, et ce, de manière suffisamment efficace pour atteindre les objectifs **de traitement** ;
- Les objectifs **de traitement** peuvent être atteints dans un intervalle de temps raisonnable (moins de 30 ans) ;
- Des données objectives et suffisantes sont fournies permettant d'établir que durant le processus d'atténuation naturelle, les récepteurs sensibles sont et vont rester protégés et qu'aucune extension sensible du panache de pollution ne sera observée.
- L'ANS est à considérer comme une technique innovante. Au cas où les objectifs **de traitement** ne sont pas atteints au terme d'un délai raisonnable, la mise en œuvre d'une technique d'intervention plus active doit être envisagée. A cet égard un projet détaillé d'une variante doit être disponible lors de la rédaction du projet d'assainissement ou de gestion du risque.

Les remarques suivantes peuvent être formulées :

- Les degrés de fiabilité et de précision des données qui doivent être fournies dépendent du type, de l'importance de la contamination et des risques qui en découlent ;
- Le délai estimé pour atteindre les objectifs **de traitement** doit être en relation avec les conditions prévalant sur le site : propriétés physico-chimiques des polluants, hydrogéologie du site, importance de l'aquifère ;
- L'utilisation du site ne doit pas être empêchée ou limitée sur le long terme par le processus d'ANS. Les zones contaminées du site doivent rester accessibles pour les opérations de supervision et, le cas échéant, l'autorisation des voisins doit être demandée au préalable si les opérations de supervision doivent prendre place sur les parcelles voisines.

L'examen de la faisabilité technique de l'atténuation naturelle repose sur 4 étapes successives :

- Etape de l'examen préliminaire : examen de la faisabilité à priori de l'atténuation naturelle ;
- Etape spécifique de la faisabilité sur la base des conditions et circonstances actuelles et spécifiques existant sur le site ;
- Etape de la définition du projet : procédures à mettre en place pour évaluer le potentiel de l'atténuation à long terme ;
- Etape d'exécution et de validation : procédures à suivre lors de la supervision de la prise en charge afin de vérifier que les objectifs **de traitement** ont bien été rencontrés.

5.2. Etape préliminaire : faisabilité à priori

Au minimum les données suivantes doivent être disponibles lors de l'examen de la faisabilité du traitement

Paramètres de polluants :

- Localisation et extension (verticale et horizontale) du noyau de pollution ;
- Localisation et extension (verticale et horizontale) du panache de pollution ;
- Teneurs (grandeur et répartition) dans les zones de noyau et de panache ;
- Charge polluante dans les zones de noyau et du panache pour les différents compartiments du sol (phase solide, liquide et gazeuse) et existence d'une phase de produit pur. Cet examen porte sur les polluants responsables de la contamination et leurs produits de dégradation à caractère polluant ;
- Origine et cause de la pollution ;
- Teneurs de fond dans les environs du site à traiter; mise en évidence éventuelle d'autres sources de pollution dans le voisinage ; caractéristiques physicochimiques.

Paramètres du sol :

- Si un aquifère est présent et concerné par la contamination : importance (physique et économique) de l'aquifère ;
- Présence d'une installation de captage (existante ou potentielle) dans l'aquifère ;
- Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère : conductivité hydraulique, gradient hydraulique, vitesse de circulation de l'eau, direction de l'écoulement (et variations éventuelles de celle-ci), composition du sol (hétérogénéité et présence de différentes couches), voies d'écoulement préférentielles ;
- Paramètres influençant la mobilité des polluants (pH, teneur en argile et en matière organique, ...)
- Paramètres influençant la susceptibilité des polluants à la (bio)dégradation : potentiel redox, disponibilités en donneurs ou accepteurs d'électrons, présence de pollutions multiples,...

Récepteurs :

Identification et localisation des cibles sensibles actuelles ou potentielles : aquifères, installations de captage, eaux de surface, zones d'habitat, zones vertes et autres zones particulières (selon la définition donnée à l'annexe 3 de [l'AGRBC du 29/03/2018](#)).

L'examen de la faisabilité à priori sera effectué selon les critères suivants.

Faisabilité technique :

- Examen des propriétés physico-chimiques des polluants présents (et de ses sous-produits), de leur toxicité et de leur susceptibilité à la (bio)dégradation, selon les données de la littérature ;
- Examen des caractéristiques et propriétés du sol et de l'aquifère éventuellement présent et influence de ces paramètres sur l'atténuation naturelle ;
- Examen de l'importance et de l'évolution de la contamination par les polluants d'origine et les produits de dégradation à potentiel polluants : charge polluante, teneurs présentes,

extension latérale et verticale, stabilité ou évolution de l'extension de la tache de pollution (panache et noyau) ;

- Présence d'un risque avéré ou potentiel pour les cibles sensibles ;
- Examen des caractéristiques spécifiques du site et de leur compatibilité avec une dégradation spontanée des polluants, sur la base des données rapportées dans la littérature : par exemple le pH, le potentiel redox du sol, ...

Aspects pratiques de la faisabilité :

- L'affectation future du site est-elle bien définie ? L'accessibilité du site est-elle garantie pour toute la durée de l'atténuation ? Le niveau de risque sera-t-il stable durant toute la durée de l'atténuation ?
- Mode d'occupation et propriétaires des parcelles voisines susceptibles d'être impactées en cas d'extension de la tache de pollution, accessibilité de ces parcelles pour les actes de supervision ;
- En cas de fonctionnement non suffisant de l'atténuation naturelle, les techniques de traitement alternatives à mettre en place sont-elles définies et peuvent-elles être mises en œuvre de manière réaliste ? La faisabilité des techniques alternatives doit être vérifiée durant le déroulement de la prise en charge par atténuation naturelle.

Faisabilité financière et économique

- Etablir la faisabilité technique d'une prise en charge par l'ANS implique l'exécution d'une étude détaillée ce qui, en soi, entraîne déjà des coûts importants ;
- Les coûts d'une supervision de longue durée peuvent également être élevés. Ces coûts ont-ils été correctement estimés, même dans une vision de long terme (inflation, actualisation des coûts). L'impact économique d'une prise en charge à long terme sur le mode d'utilisation de la parcelle et sa valeur commerciale est-il évalué ?
- Evaluation des probabilités qu'une technique alternative de traitement doive être mise en œuvre. L'évaluation des coûts de l'ANS doit prendre en compte l'éventualité de la mise en œuvre de cette technique alternative ;
- La comparaison entre les coûts à long terme de l'ANS et les coûts à court terme d'une technique alternative plus active doit être menée sur des bases fiables et complètes. Par exemple les surcoûts liés aux incertitudes des prises en charge par excavation + traitement hors site doivent être pris en compte, de même que les surcoûts liés à la longue durée de l'atténuation naturelle, à l'examen détaillé de la zone de traitement et l'éventualité de la nécessité de faire appel à une technique alternative.

Possibilité d'acceptation par l'opinion publique et les autorités

Cette possibilité repose sur les éléments suivants :

- Fiabilité de l'évaluation des risques ;
- Probabilité de succès de l'ANS à comparer avec la fiabilité des autres techniques de prise en charge plus « actives » ;
- Séjour plus long de la parcelle concernée dans la catégorie 4 de l'inventaire de l'état du sol.

L'impact des différents critères de l'examen sur la faisabilité d'une prise en charge par atténuation naturelle peut être résumé comme présenté (de manière qualitative) dans le **Tableau 3**.

Remarque : l'atténuation naturelle comme méthode de prise en charge d'une pollution ne peut être acceptée si les mécanismes dominants sur lesquels elle repose sont la dilution, la volatilisation, l'adsorption réversible et la précipitation réversible.

Tableau 3 : Examen qualitatif de l'impact des différents critères de l'examen de la faisabilité a priori (Code van goedepraktijk–Natuurlijkeattenuatie)

| Critère de l'examen | Situation favorable | Situation intermédiaire | Situation défavorable |
|--|--|--|---|
| A. Aspects techniques | | | |
| Source de la pollution | Éliminée | Épuisée ou presque épuisée | Présente et encore active |
| Panache | Bien délimitée spatialement et en phase de réduction | Stable | Contour mal définis et en phase d'expansion |
| Risque d'extension au-delà des limites de la parcelle | Pas de risque | Risque limité | Risque avéré |
| Susceptibilité théorique d'être décomposé compte tenu des conditions spécifiques prévalant sur le site | Bonne | Moyenne | Faible ou incertaine |
| Mobilité du contaminant | faible | Moyenne | Haute |
| Mécanisme de l'atténuation | Décomposition irréversible jusqu'au stade final | | Décomposition incomplète /réversible |
| Produits de décomposition intermédiaires | Produits intermédiaires également décomposés/ne générant pas de risque | | Produits intermédiaires s'accumulant/générant un risque |
| Effets délétères résultant de la combinaison des effets de pollutions mixtes | Pas d'effet : l'atténuation naturelle suit son cours sans être influencée | | Effet de la combinaison des pollutions : l'atténuation naturelle du polluant 1 influence négativement celle du polluant 2 |
| Couches aquifères : homogénéité et isotropie | Aquifère homogène et isotrope | | Hétérogène/anisotrope |
| Présence d'une cible sensible : | | | |
| '- actuelle | absence | présente mais faible risque | présente : risque élevé |
| '- potentielle | absence | présente mais faible risque | présente : risque élevé |
| Proximité d'une zone de protection de captage ou d'un captage | absence | | Présence d'une zone de protection de type I, II ou III selon la définition donnée par L'AGRBC du 19.09.2002 |
| Importance de l'utilisation de l'eau souterraine, actuelle ou dans le futur | Biotransformation | Moyen | Faible |
| '- usage privé | faible | Moyen | Elevée |
| -' Usage industriel | faible | Moyen | Elevée |
| Fiabilité des données de supervision | Haute : enregistrement des données depuis plus de deux ans | | Faible : enregistrement des données depuis moins de deux ans |
| Validité des données concernant la charge polluante et la répartition entre les différentes phases du sol et l'extension en 3D | Elevée (polluant uniquement sous forme dissoute) | | Faible : par exemple incertitude concernant la présence d'une phase de produit pur |
| B. Autorités compétentes | | | |
| Possibilité d'acceptation | Pas de conflit avec les directives et procédures en vigueur ; pas d'incertitude technique | Pas de conflit avec les directives et procédures en vigueur ; incertitudes techniques | Conflit avec les directives et procédures en vigueur ; incertitudes techniques |
| C. Aspects pratiques et faisabilité économique | | | |
| Points de la supervision situés en dehors des limites du site | Accessibilité sans restriction | Accès possible | Accessibilité limitée ou impossible |
| Aspects financiers | Budgets disponibles pour le long terme, source de financement garantie par contrainte légale | Budgets disponibles pour le long terme, source de financement non garantie par contrainte légale | Pas de budget prévu pour le long terme |



5.3. Examen spécifique de la faisabilité

Les étapes suivantes peuvent être suivies.

5.3.1. Première étape de l'examen

Analyse de tendance à effectuer sur les données de teneurs mesurées lors de campagnes réalisées depuis plusieurs années. Une tendance à la baisse de la gravité de la contamination peut être établie par :

- La baisse des teneurs mesurées dans différents piézomètres d'observation ;
- La chute des teneurs le long de l'axe de circulation de l'eau au sein du panache.

Si la tendance à la baisse représente l'argument principal permettant d'établir la faisabilité de l'atténuation naturelle, cette tendance doit être définie sur la base de mesures effectuées depuis 3 ans au moins avec par année, exécution de 2 à 4 campagnes de mesures. De cette façon l'évolution des teneurs et de la charge polluante pourra être considérée comme statistiquement significative. La fixation du nombre et de la fréquence requis des campagnes de mesure doit prendre en compte les variations saisonnières ou permanentes des paramètres hydrogéologiques du site.

L'analyse statistique de la tendance doit reposer sur un nombre suffisant de points de mesure (par exemple, un minimum de 8 points de mesure si l'examen repose sur le test de Mann-Kendall). A cet égard, les données récoltées lors des études de reconnaissance et détaillées peuvent être utilisées si les méthodes de collecte de mesures sont comparables et n'introduisent pas un biais. Si une analyse de tendance est menée de manière statistique, l'expert apportera les justifications nécessaires à la méthodologie utilisée.

Remarque : la mise en évidence d'une tendance évolutive à partir des mesures de teneurs ne donne pas d'indication sur les mécanismes responsables de la diminution des teneurs mesurées : dégradation des polluants ou dilution ou atténuation réversible.

5.3.2. Deuxième étape de l'examen

Cet examen vise à établir que la (bio)dégradation des polluants prend bien place sur le site. Ceci peut être établi de différentes manières :

- L'activité des microorganismes nécessaires à la biodégradation est bien présente : la présence des bactéries pouvant utiliser le polluant comme substrat de croissance est détectée dans les zones polluées du sol, l'activité des microorganismes est détectée par l'identification des produits de dégradation des polluants (surtout si ceux-ci sont absents des échantillons prélevés en dehors des zones polluées) ;
- Les conditions prévalant dans le sol sont favorables à la dégradation des polluants : la fourniture et la distribution des donneurs ou accepteurs d'électrons nécessaires à la dégradation est assurée, la biodisponibilité du polluant est suffisante, la durabilité de l'atténuation naturelle est assurée ;
- Utilisation d'indicateurs géochimiques ou biochimiques de l'atténuation naturelle : diminution des teneurs en O₂ et en nitrate, augmentation des teneurs en méthane, en Fe²⁺ et Mn²⁺ dissous, présence des produits de la dégradation des polluants (tels que les chlorures) ou de produits intermédiaires. Ces mesures donnent des informations sur les types de mécanismes responsables de l'atténuation et sur la vitesse de dégradation des polluants. Elles permettent également de distinguer la contribution des autres mécanismes (non destructifs

de l'atténuation tels que la dilution, la volatilisation, la sorption réversible, ... L'exploitation de ces données sous la forme de cartes de distribution de valeurs (carte de contours) en comparaison des cartes de distribution des teneurs en polluants peut être un bon outil d'interprétation. La relation entre teneurs en polluants et valeurs des indicateurs indirectes en fonction de la distance par rapport à la source peut ainsi être visualisée.

Les **Tableaux 4a, 4b et 4c** suivants présentent les paramètres qui doivent être mesurés et/ou quantifiés avant le lancement d'un programme de traitement d'une pollution du sol et/ou de l'eau souterraine au moyen de l'ANS. Ces tableaux représentent une checklist des données devant être acquises, soit au cours des phases d'études successives (étude de reconnaissance, étude détaillée, étude de risques) soit lors de la rédaction du projet d'assainissement ou de gestion du risque, ou avant le lancement des tests de laboratoire éventuels, **soit avant l'exécution des travaux ne nécessitant pas de projet spécifique**. Dans ces tableaux distinction est faite entre deux niveaux d'exigence :

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

5.3.3. Troisième étape de l'examen

Destests de laboratoire pouvant prendre la forme de tests en microcosme, détection et recensement de bactéries spécifiques, tests PCR (Polymérase Chain Reaction) ou examen d'isotopes stables dans les échantillons d'eau souterraine.

Ces tests sont à considérer comme nécessaires si au terme de la première et deuxième étape des doutes subsistent sur la possibilité d'une dégradation du polluant.

Les tests en microcosmes permettent de mesurer la (bio)dégradation ou le potentiel de (bio)dégradation du polluant à partir de matériel provenant du site à traiter, tout en reproduisant des conditions proches de celles rencontrées sur le site. Ils permettent d'établir que la décomposition du polluant peut être menée de manière complète jusqu'à la production de composés inoffensifs naturellement présents dans le sol. Ils peuvent être par exemple utiles pour mettre en évidence la dégradation de composés récalcitrants (le benzène en conditions anaérobiques, le MTBE en conditions aérobiques, par exemple). Ils sont également utiles pour établir que la dégradation de solvants chlorés (per- et trichloréthène) peut être menée de manière complète jusqu'à la production de composés inoffensifs (éthane) sans être interrompue à un stade intermédiaire (stagnation) aboutissant à l'accumulation de DCE et de VC plus toxiques et mobiles que les solvants d'origine.

Les tests en microcosmes menés en condition d'anaérobie permettent d'obtenir une estimation des vitesses de dégradation. Ces données combinées aux vitesses de circulation des polluants dans le sol peuvent être utilisées pour simuler par modélisation l'évolution de l'extension des panaches.

Les tests menés en conditions d'aérobie, par contre, ne permettent pas d'estimer de manière fiable les vitesses de dégradation étant donné que l'approvisionnement en O₂ en conditions naturelles est systématiquement plus lent qu'en conditions de labo.

Les tests en condition d'anaérobie sont à effectuer sur une durée de 3 à 12 mois tandis qu'en condition d'aérobie, les durées nécessaires sont plus courtes, de l'ordre de quelques semaines. Compte tenu de la durée de ces tests, il est envisageable de les mener lors de la première phase (phase de lancement) du traitement par atténuation naturelle.

La représentativité des tests en microcosme demande un soin particulier : préservation des conditions redox prévalant dans le sol lors du prélèvement, le conditionnement et le transport des échantillons de sol ou d'eau souterraine, prélèvement dans une ou plusieurs zones du sol représentatives de la tache de pollution (noyau ou panache).

Tableau 4a : paramètres des polluants à collecter avant le lancement d'un traitement par ANS

| Paramètres | Moyen de mesure | Commentaire |
|--|---|---|
| Source de pollution active ou éradiquée | Etude historique, examen des lieux | Disponible au terme de l'étude de reconnaissance |
| Teneurs dans le sol | | |
| Teneurs dans le sol : délimitation verticale et horizontale des taches de pollution (contour teneurs > NI et teneurs > NA et > teneurs objectifs) | Forages, prélèvement et analyses d'échantillons de sol et tracé des délimitations (krigeage) | Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée |
| Teneurs dans le sol : délimitation verticale et horizontale des taches de pollution (contour teneurs > NI et teneurs > NA et > teneurs objectifs) | Forages, prélèvement et analyses d'échantillons de sol et tracé des délimitations (krigeage) | Pour les polluants générés par la biodégradation |
| Estimation de la charge polluante totale | Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes | Pour tous les polluants concernés par la chaîne de biogégradation. |
| Teneurs dans l'eau souterraine | | |
| Teneurs dans l'eau souterraine : délimitation verticale et horizontale des taches de pollution (contour teneurs > NI et teneurs > NA et > teneurs objectifs) | Placement de piézomètres, prélèvement et analyse d'échantillons, tracé des délimitations (krigeage) | Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude détaillée |
| Teneurs dans l'eau souterraine : délimitation verticale et horizontale des taches de pollution (contour teneurs > NI et teneurs > NA et > teneurs objectifs) | Placement de piézomètres, prélèvement et analyse d'échantillons, tracé des délimitations (krigeage) | Pour les polluants générés par la biodégradation |
| Estimation de la charge polluante totale | Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes | Pour tous les polluants concernés par la chaîne de biogégradation. |
| Facteur de retard | Valeurs du Kd et porosité efficace de l'aquifère | Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque |
| Vitesse de migration longitudinale du polluant (progression du panache selon la direction d'écoulement de l'eau souterraine) | Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale Ou utilisation de modèles numériques | Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque |
| Vitesse de migration latérale dans le sol (extension latérale du panache lors de sa migration) | Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale Ou utilisation de modèles numériques | Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque |
| Vitesse de migration verticale dans le sol (extension verticale du panache lors de sa migration) | Simulation à l'aide de modèles analytiques : équations de Domenico faisant intervenir les coefficients de dispersion longitudinale, latérale et verticale Ou utilisation de modèles numériques | Pour chaque polluant dont la présence requiert une intervention. Disponible au terme de l'étude de risque |
| Analyse de tendance des teneurs sur plusieurs années dans le sol | Forages, prélèvement et analyses d'échantillons de sol et tracé des délimitations (krigeage) | Nombre de points de mesures et de campagnes de mesures suffisants - Pour les polluants d'origine et les produits intermédiaires |
| Analyse de tendance des teneurs sur plusieurs années dans l'eau souterraine | Placement de piézomètres, prélèvement et analyse d'échantillons, tracé des délimitations (krigeage) | Nombre de points de mesures et de campagnes de mesures suffisants - Pour les polluants d'origine et les produits intermédiaires |
| Analyse de tendance sur plusieurs années de la charge polluante totale | Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes | Nombre de points de mesures et de campagnes de mesures suffisants - Pour les polluants d'origine et les produits intermédiaires |
| Teneurs dans la phase gazeuse du sol | | |
| Mesure des teneurs en polluants dans la phase gazeuse du sol | Placement de puits d'observation et mesure des teneurs dans le gaz du sol | Si jugé nécessaire par l'expert compte tenu de la contribution de la phase gazeuse dans la charge polluante totale |
| Présence d'une phase libre (DNAPL) | | |
| Vérification de la présence d'une phase libre | Prélèvement et analyse d'échantillons d'eau et de sols dans la zone du noyau | |
| Extension latérale et en profondeur de la phase libre | Observation de la présence d'une phase libre piégée ou plongeante à partir d'un réseau de piézomètres/sondages - campagnes de mesures à l'aide du système MIP (Géoprobe) ou de mesures de gaz dans le sol | Si présente |
| Estimation de la charge polluante globale, toutes phases du sol confondues | Sur base des volumes estimés et des teneurs moyennes | |
| Propriétés physico-chimique des polluants présents | | |
| Disponibilité des polluants présents pour une dégradation spontanée dans le sol - Conditions favorables et défavorables | Données de la littérature | Pour tous les polluants présents pris individuellement - Effet de la combinaison de différentes pollutions |

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

= paramètre dont la mesure ou l'estimation est utile

Tableau 4b: paramètres du sol à mesurer avant lancement d'un traitement par atténuation naturelle supervisée

| Paramètre | Moyen de mesures | Commentaires |
|--|---|---|
| Paramètres hydrodynamique du sol | | |
| Stratigraphie du sol : couches(s) aquifères, aquitard, aquicludes, ... | Cartes géologiques et géotechniques, sondages et description des couches de sol | Disponible au terme de l'étude détaillée |
| Piézométrie de ou des aquifère(s), gradients hydrauliques, sens d'écoulement, caractère confiné ou semi confiné | Cartes géologiques et géotechniques, sondages et description des couches de sol, placement de piézomètres, mesures piézométriques et calage en altimétrie | Disponible au terme de l'étude détaillée |
| Puissance de la couche aquifère ou des couches aquifères | Cartes géologiques et géotechniques, sondages et description des couches de sol | Disponible au terme de l'étude détaillée |
| Variations saisonnières des niveau piézométriques | Suivi piézométrique lors de campagnes successives | |
| Caractéristiques de l'eau souterraine | | |
| Paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine: pH, Eh, conductivité électrique, O ₂ dissous, T° | Mesure sur le terrain | Disponible au terme de l'étude détaillée |
| - Dégradation en conditions d'anaérobiose = mécanisme principal | | |
| Paramètres chimiques : mesure des produits de dégradation intermédiaires, Ethène, Ethane, méthane, TOC, accepteurs d'électrons : Nitrate, Fe(III), Mn(IV), sulfates, CO ₂ et leur produits de réduction : nitrites, Fe(II), Mn(II), sulfite, sulfure. | Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire | OVAM 2003 |
| Paramètres chimiques complémentaires : H ₂ dissous, acétate + autres acides gras volatiles, carbone inorganique dissous, Cl ⁻ | Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire | OVAM 2007 |
| Teneurs en nutriments : Phosphates, Ca | Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire | OVAM 2003 |
| Recensements bactériens et examen par PCR : population de bactéries spécifiques | Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire | OVAM 2003 |
| - Dégradation en conditions d'aérobiose = mécanisme principal | | |
| Paramètres chimiques : mesure des produits de dégradation intermédiaires, TOC, accepteurs d'électrons : Nitrate, Fe(III), Mn(IV), sulfates, CO ₂ et leur produits de réduction : nitrites, Fe(II), Mn(II), sulfite, sulfure. | Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire | OVAM 2003 |
| Indice phénol | Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire | Indicateurs de la décomposition de composés aromatiques tels que les BTEX (OVAM 2003) |
| Teneurs en nutriments : Phosphates, Ca | Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire | OVAM 2003 |
| Recensements bactériens et examen par PCR : population de bactéries spécifiques | Prélèvements d'échantillons et analyses de laboratoire | OVAM 2003 |

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

Tableau 4c : paramètres du site d'intervention à évaluer avant lancement d'un traitement par atténuation naturelle supervisée

| Paramètre | Moyen de mesures et d'observation | Commentaires |
|---|--|---|
| Présence d'impétrants dans le sol au droit du site et ses alentours immédiats | Consultation des concessionnaires des réseaux d'impétrants, Commune, | Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillées |
| | Détection sur le terrain : pré-fouilles, passage au détecteur CAT, ... | Réalisé lors des études de reconnaissance et détaillées |
| Présence de cibles sensibles au niveau de l'aquifère traité et les autres aquifères sous-jacents | Inventaire des installations de captage proches, étude hydrogéologique | Réalisé lors de l'étude détaillée |
| Accessibilité du site pour les campagnes de supervision | Inventaire | |
| Possibilité que le panache de pollution atteigne ou s'approche des parcelles voisines | Simulation sur la base des données recueillies | |
| Accessibilité des parcelles voisines si les campagnes de supervision doivent ou peuvent y prendre place | Inventaire | |
| Présence d'infrastructures susceptibles d'être endommagées suite à la présence du polluant et des produits de dégradation compte tenu de la durée du traitement | Inventaire | |

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

L'estimation de la vitesse de l'atténuation naturelle peut être réalisée de différentes manières :

- Mesure de la vitesse d'atténuation du noyau de pollution influençant la durée de vie du panache (évolution des teneurs mesurées en fonction du temps) ;
- Gradient de décroissance des teneurs en fonction de la distance par rapport au noyau. Ce paramètre contrôle l'extension maximale que le panache pourra prendre ;
- Vitesse de l'atténuation de la charge polluante totale : ce paramètre contrôle l'impact que pourra avoir la pollution sur une cible menacée. Il résulte de la somme des effets de la (bio)dégradation et des effets des autres mécanismes tels que la dilution et dispersion, la volatilisation et l'adsorption ;
- Vitesse de la biodégradation seule.

Cette vitesse estimée peut être utilisée dans le traitement des données par modélisation pour simuler l'extension future des panaches de contamination. Différents modèles peuvent être utilisés à cet égard : Bioscreen, Biochlor, Bioplum III, Modflow +RT3D, ...

5.4. Nécessité d'un test pilote

Compte tenu de la durée de temps importante que pourrait prendre un test pilote, cette option n'apparaît pas justifiée. Si les résultats de l'examen de faisabilité amènent à considérer l'atténuation naturelle comme une méthode de prise en charge adaptée, le traitement de la pollution et les opérations de supervision peuvent être lancés.

Les opérations de supervision menées lors du traitement permettront de statuer, lors de la phase de démarrage, si l'atténuation naturelle se révèle aussi efficiente qu'attendu ou si, au contraire, une ou plusieurs méthodes de prise en charge alternatives doivent être mises en œuvre.

L'expert trouvera dans [l'AGRBC du 29/03/2018 fixant le contenu type du projet de gestion du risque, du projet d'assainissement, de la déclaration préalable au traitement de durée limitée et des modalités d'affichage du traitement de durée limitée](#), les conditions rendant nécessaire les argumentations et le contenu d'un test pilote.

6. Description d'une installation type

Un dispositif de traitement par atténuation naturelle supervisée se limite aux infrastructures et dispositifs de supervision (voir section suivante).

7. Projet d'assainissement ou de gestion du risque

Le projet reprendra l'ensemble des éléments de l'examen de la faisabilité du mode de traitement.

Seront également clairement définis :

- Durée estimée de la prise en charge par ANS pour atteindre les objectifs de traitement fixés ;
- Comparaison de cette durée avec celle attendue en cas d'utilisation de techniques de prise en charge plus « actives » ;
- Possibilité que l'atténuation naturelle se poursuive au rythme attendu ou, à l'inverse, possibilité que des contraintes interviennent dans le futur et limitent l'efficacité de l'atténuation : par exemple limitations dans l'approvisionnement et la distribution des électro-donneurs ou accepteurs, des nutriments, accumulation de produits intermédiaires (stagnation) ;
- La fiabilité et le degré de complétude des données collectées et le niveau de compréhension des phénomènes ayant conduit à la situation actuelle ;
- La fiabilité des prévisions et simulations faites sur l'extension du panache et la migration des polluants d'une part et l'efficacité de l'atténuation naturelle d'autre part, sur la base des données collectées. Ces dernières sont-elles complètes ou au moins suffisantes ?

Le projet fournira également la description d'une ou plusieurs méthodes de prise en charge de la contamination à mettre en place en cas d'échec de la procédure par ANS.

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

L'installation à mettre en place se limite au dispositif de supervision décrit ci-après.



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

Les risques à prendre en compte découlent du temps de résidence important des polluants dans le sol et la menace d'une migration des polluants en direction des cibles sensibles (parcelles voisines, installations de captage, ...) au cas où l'efficacité de l'atténuation naturelle n'est pas suffisante pour compenser la vitesse de déplacement du panache.

10. Supervision du traitement

10.1. Règles de base de la supervision

Les actes à réaliser dans le cadre de la supervision de l'ANS visent à fournir une image précise et actualisée de l'état de pollution du sol et des paramètres géochimiques et hydrogéologiques du sol.

Plus précisément le programme de supervision doit répondre aux objectifs suivants :

- Montrer que l'atténuation naturelle se déroule comme anticipé ;
- Identifier tous les produits intermédiaires de la dégradation éventuellement formés ;
- Contrôler l'extension éventuelle du panache ;
- Vérifier qu'aucune cible sensible n'est menacée ;
- Mettre en évidence tout changement dans les conditions prévalant dans le sol pouvant menacer l'efficacité de l'atténuation naturelle ;
- Vérifier l'évolution des teneurs et éventuellement valider l'atteinte des objectifs de **traitement**.

Le programme de supervision doit être adapté au site à prendre en charge (basé sur le modèle conceptuel défini pour la tache de pollution) et faire l'objet d'un plan de prélèvement et mesures dans l'eau souterraine avec prélèvements et analyses périodiques d'échantillons de sol. Le programme de supervision sera d'autant plus complet et détaillé que des incertitudes subsistent sur la validité et la représentativité du modèle conceptuel.

Le plan de prélèvement et mesures à définir lors du lancement du traitement doit au minimum définir les éléments suivants :

- La durée de la supervision ;
- La fréquence des campagnes de mesure et d'échantillonnage ;
- La localisation des points de mesure et de prélèvement ;
- Le mode d'échantillonnage et les paramètres à mesurer et analyser.

10.2. Mesures de surveillance : dispositif type

La supervision de l'atténuation d'une tache de contamination repose sur le placement, l'observation et le prélèvement d'un certain nombre de piézomètres disposés au sein et aux alentours de la zone contaminée. Un tel dispositif a pour but d'observer si l'importance de la tache de pollution (noyau + panache) en termes de teneurs et extension, varie et de vérifier que le panache ne s'étend pas au-delà des limites autorisées. Les piézomètres doivent être établis au minimum dans les endroits suivants :

- En amont hydrogéologique de la source de pollution en dehors de la tache de pollution, le long de l'axe de circulation de l'eau souterraine (et du panache). Objectif : contrôle de la qualité de l'eau souterraine pénétrant dans la zone polluée et contrôle des modifications des paramètres physico-chimiques pouvant influencer les processus gouvernant l'atténuation naturelle ;
- Au niveau du noyau de pollution. Objectif : identification de contaminations complémentaires qui pourraient influencer le déroulement de l'atténuation naturelle et suivi de l'évolution de la gravité de la pollution au niveau du noyau (et de la source)

éventuellement encore présente) en fonction du temps. Le nombre de piézomètres doit être adapté à l'extension du noyau de manière à obtenir une bonne image de l'évolution ;

- En aval du noyau, le long de l'axe principal de migration, tant dans les zones d'anaérobie que d'aérobie de l'eau souterraine, de manière à suivre les changements dans les caractéristiques physico-chimiques et les teneurs enregistrées dans le panache. Le nombre de points d'observations et de prélèvements dépend de la taille du panache mais il doit être suffisant pour pouvoir prédire (par modélisation) l'évolution du panache ;
- En aval de la tache de contamination, où aucun polluant n'est encore détecté mais où les teneurs en accepteurs d'électrons sont déjà moins élevées en comparaison des zones non influencées de la nappe d'eau souterraine. Ces piézomètres fournissent une indication prémonitoire de la migration du panache de contamination ;
- Au niveau de points de contrôle « sentinelle » en aval du panache de contamination, localisés à la limite des parcelles cadastrées ou en direction de cibles sensibles. Ces points de mesures doivent permettre de déclencher suffisamment tôt la mise en œuvre de procédures de prises en charge alternatives assurant le contrôle de la contamination avant le franchissement des limites parcellaires ou avant l'impact des cibles sensibles ;
- Sur les côtés du panache de manière à surveiller l'extension latérale du panache.

Un exemple de dispositif de surveillance type est donné dans la **Figure 1**.

Au niveau des différents points de prélèvement, surtout au sein du panache de contamination, il est recommandé de mettre en place des piézomètres multiples (installés dans le même trou de sondage ou dans des trous de sondage voisins) de manière à mettre en place des crépines à différentes profondeurs. Cette recommandation est particulièrement justifiée dans les cas suivants :

- Présence de polluants plus denses que l'eau (goudrons, HCOV, ...) ;
- Variations significatives des niveaux piézométriques ;
- Présence d'une installation de pompage ou de drainage profonde causant un rabattement localisé des niveaux piézométriques ;
- Stratification importante de la pollution (hydrocarbures).

D'une manière générale, il est recommandé que la différence de profondeur entre les différentes crépines installées au même point d'observation soit de maximum 1 m. Il est également recommandé de placer les crépines dans les couches aquifères caractérisées par la conductivité hydraulique la plus élevée de manière à éviter la sous-estimation des risques de dissémination des polluants.

Une attention particulière, tenant compte des caractéristiques du site, sera apportée par l'expert dans l'élaboration plan de prélèvement et mesures. Pour le placement correct des piézomètres le long de l'axe de circulation, la prise en compte des teneurs en polluants et des valeurs mesurées pour les indicateurs géochimiques est généralement suffisante. Pour les panaches de grande extension et dans les sols hétérogènes, l'expert peut faire appel à des tests de traçage (Bromure, iodures, borate, ...). De manière à être certain d'identifier correctement la direction de l'axe de migration des polluants, il est recommandé d'établir les piézomètres de contrôle le long de lignes transversales au sens d'écoulement (transects) comme montré dans la **Figure 2**.

Il est également recommandé de placer des piézomètres de contrôle, le long de l'axe de circulation de l'eau souterraine, à proximité des interfaces entre différents milieux : par exemple le point de rencontre entre l'aquifère et un élément des eaux de surface.

La densité du réseau des points de surveillance doit être adaptée en fonction de l'hétérogénéité et la complexité de la composition du sol. Le nombre de points de mesure doit également être



suffisant si un traitement statistique des données est envisagé (analyse de tendance) pour les paramètres les plus critiques.

En cas de situation particulièrement complexes (sols très hétérogènes) les piézomètres peuvent être remplacés par des tranchées d'interception du panache.

Pour le placement des piézomètres, il convient de se référer au Code de Bonnes Pratiques n°2 portant sur l'installation des piézomètres.

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

Les paramètres de supervision du traitement et la fréquence des mesures sont donnés dans le **Tableau 5**.

Figure 1 : schéma d'un dispositif type de supervision(extrait de « **Guidance on the Assessment and Monitoring of Natural Attenuation of Contaminants in groundwater** » M.A. Carey et al., June 2000)

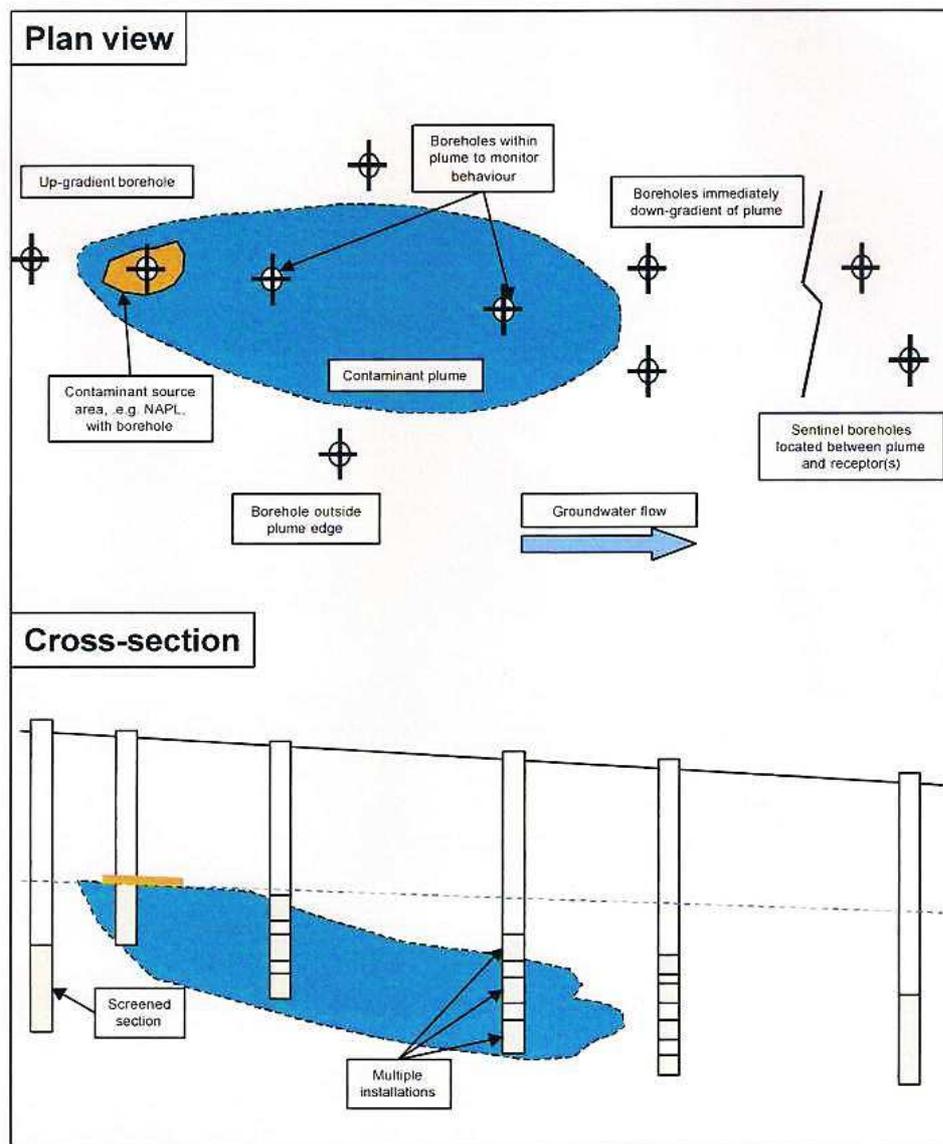


Figure 2 : Position des piézomètres de contrôle en lignes transversale (Extrait de OVAM 2003, Code van Goede praktijk - Natuurlijke attenuatie)

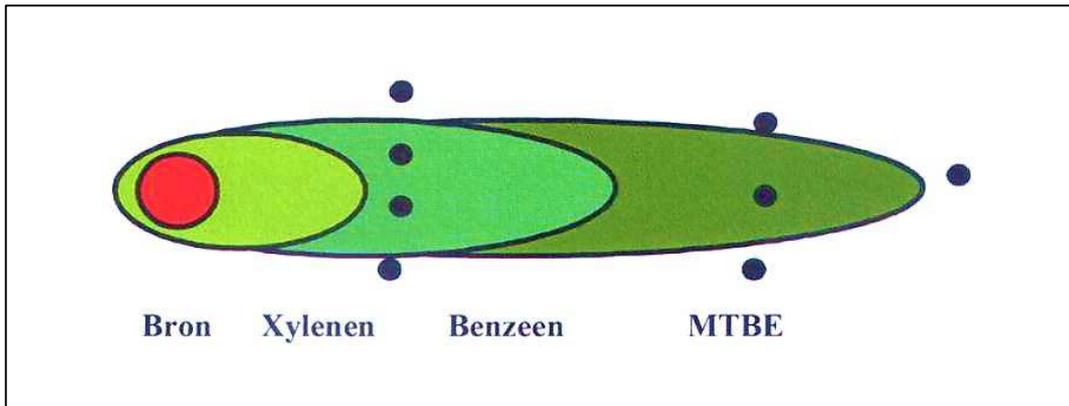


Tableau 5 : Fréquences et paramètres des opérations de supervision du traitement

| Paramètres de supervision | Moyen | Paramètre | Fréquence minimale* | Commentaires |
|---|--|--|--|--|
| Suivi piézométrique | Mesures du niveau de l'eau souterraine dans les piézomètres de contrôle | Sonde piézométrique (m) | Trois premières années (Phase de lancement) : tous les mois, ensuite tous les 3 mois | Etablissement et mise à jour d'une carte des iso-pièzes et sens d'écoulement |
| Paramètres de l'eau souterraine | Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine | Teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention et produits de dégradation intermédiaires + polluants secondaires générés (As, ...) | Trois premières années (Phase de lancement) : tous les 3 mois, ensuite tous les 6 mois | Objectif : réaliser ou compléter l'analyse de tendance, mettre en évidence l'atténuation et estimer la cinétique de l'atténuation, surveiller l'extension du panache |
| Paramètres de l'eau souterraine | Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine | Indicateurs géochimiques de l'atténuation : TOC, teneurs en accepteurs d'électrons : O ₂ , Nitrate, sulfate, Fe(II), Mn(II), pH, Eh, conductivité électrique, T°, carbone inorganique dissous | Trois premières années (Phase de lancement) : tous les 3 mois, ensuite tous les 6 mois | Source OVAM 2003 |
| Paramètres facultatifs pour l'eau souterraine | Echantillonnage et analyse d'échantillons d'eau souterraine | Examen PCR, H ₂ , acétate et acides gras volatiles, chlorure, nitrite, sulfite, sulfure, éthène, éthane, méthane, indice phénol, CO ₂ | Trois premières années (Phase de lancement) : tous les 3 mois, ensuite tous les 6 mois | Source OVAM 2007 et 2003 |
| Teneurs résiduelles dans le sol | Forages et prélèvements de carottes de sol et analyse, au sein du noyau et du panache de contamination | Teneurs en polluants d'origine et produits de dégradation intermédiaires (kg/kg ou kg/m ³) | Au lancement des opérations et ensuite tous les 6 mois | La profondeur d'échantillonnage doit permettre de suivre une éventuelle migration verticale de la pollution - si possible évaluation du rôle des processus précipitation/sorption dans l'atténuation |
| Teneurs dans la phase gazeuse du sol | Prélèvement dans l'air du sol | Polluants et produits de dégradation volatiles | Trois premières années (Phase de lancement) : tous les 3 mois, ensuite tous les 6 mois | Facultatif, si la volatilisation ou la dégradation en phase gazeuse est un mécanisme important de l'atténuation |
| Bilan de masse : Estimation des quantités résiduelles de polluants et des produits de dégradation | Teneurs résiduelles moyennes dans les différentes phases du sol dans la zone d'intervention | Bilan de masse : quantités de polluants initiales, quantités résiduelles, quantités détruites (Kg) et quantités produites (kg) de produits de dégradation intermédiaires | Tous les 6 mois | Estimation du temps de traitement |

*La fréquence sera ajustée par l'expert en fonction des données du suivi



Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- Concernant les paramètres à analyser, le **Tableau 5** ci-dessus fournit une check list à l'intention des experts. Lors de la rédaction du plan de prélèvement et mesures, l'expert formulera et justifiera une proposition de paramètres à analyser dans les différentes phases du sol ;
- La liste des paramètres à analyser proposée par l'expert pourra être modifiée de manière évolutive : réduction du nombre de paramètres à analyser après la phase de lancement si l'atténuation suit son cours comme anticipé et que les données disponibles sont jugées suffisantes pour prédire l'évolution de la tache de contamination en termes de teneurs et extension ;
- Concernant la fréquence des prélèvements et des analyses de l'eau souterraine, différents facteurs sont à prendre en compte : les variations saisonnières de la piézométrie, la distance des cibles sensibles et la vitesse d'advection de l'eau souterraine. En règle générale on admet que l'intervalle de temps entre deux campagnes successives de supervision représente au maximum le temps nécessaire pour que le panache de contamination atteigne le premier piézomètre de contrôle non pollué. Ce laps de temps est parfois divisé par deux pour prendre en compte les incertitudes concernant la limite du panache de pollution et la vitesse de migration du polluant. Les règles de fréquence proposées dans le **Tableau 5** sont donc proposées à titre indicatif et peuvent être modifiées par l'expert sur la base d'une justification motivée par des arguments concrets basés sur les caractéristiques spécifiques du site ;
- La fréquence des campagnes de supervision pourra être modifiée de manière évolutive, sur proposition de l'expert, en fonction de l'évolution dans le temps de l'efficacité de l'atténuation. Au cas où l'atténuation suit son cours comme anticipé, la fréquence des campagnes pourra être allégée tandis qu'en cas d'apparition de phénomènes ou comportement non prévus, la démarche inverse pourra être conseillée ;
- On remarquera que pour le MTBE, des fréquences de supervision plus élevées sont à conseiller compte tenu du comportement particulier de ce polluant : variations importantes dans le temps des teneurs mesurées suite à une mise en solution sporadique du composé ;
- La durée de la supervision correspond, au minimum, au temps nécessaire pour atteindre les objectifs de traitement auquel s'ajoute quelques années pour confirmer l'atteinte de ces objectifs ;
- L'analyse des teneurs en polluants dans les gaz, si nécessaire, sera réalisée au laboratoire après prise d'échantillons sur des cartouches à charbon actif ou dans des ballons. L'expert pourra cependant proposer de réaliser des mesures directes de teneurs à l'aide d'appareil FID, PID ou de cartouches Dräger, s'il démontre qu'il existe une bonne correspondance entre les mesures directes et les analyses de laboratoire. Les mesures de teneurs en O₂, CO₂ dans les gaz pourront faire l'objet de mesures directes ;
- Pour le prélèvement des échantillons de sol, d'eau souterraine et de gaz, il convient de se référer au code de bonnes pratiques n° 3 de Bruxelles Environnement « Prise d'échantillons de sol, d'eau souterraine, de sédiments et d'air du sol. ... ». Pour l'analyse de ces échantillons, il convient de se conformer au code de bonnes pratiques n° 4 « Code de bonne pratique pour les méthodes d'analyse ... », de Bruxelles Environnement.



11. Rapportage, optimisation et mesures correctives

11.1. Rapportage

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

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

Le contenu du premier rapport intermédiaire comprendra au minimum les informations reprises dans le **Tableau 6**.

11.2. Mesures correctives et optimisation

Comme toute méthode de prise en charge où les processus biologiques prenant place en conditions naturelles jouent un rôle prépondérant, l'efficacité de l'ANS est sujette à de nombreuses incertitudes compte tenu du grand nombre de facteurs pouvant influencer la bonne conduite du traitement : propriétés physico-chimiques du sol et des eaux souterraines, hétérogénéité du sol, pollutions mixtes pouvant influencer négativement l'activité bactérienne (métaux lourds, par exemple, ...),

Des mesures correctives peuvent s'avérer nécessaires si, malgré le niveau élevé d'informations recueillies lors des étapes préliminaires, lors des mesures faites sur le terrain et éventuellement au laboratoire, le niveau d'incertitude quant à la faisabilité (technique et économique) du procédé par atténuation naturelle est jugé trop important, ou si la vitesse de dégradation des polluants s'avère être inférieure à celle escomptée lors de la rédaction du projet.

Quatre types de situations problématiques sont typiquement rencontrés.

Les informations collectées apparaissent insuffisantes pour se prononcer sur la faisabilité (technique et/ou économique) du traitement par atténuation naturelle. Les solutions correctives à apporter peuvent être les suivantes :

- Densification ou extension du réseau de piézomètres d'observation ;
- Mesures de paramètres complémentaires permettant de suivre l'évolution de l'atténuation naturelle ou de simuler l'extension du panache de pollution.
- Stagnation ou accumulation de produits de dégradation intermédiaires éventuellement plus mobiles et plus toxiques en raison, par exemple, de l'absence d'une flore bactérienne capable de réaliser les dernières étapes de la dégradation. Cette explication peut être vérifiée par un examen PCR de l'eau souterraine. Les solutions correctives à envisager font nécessairement appel à des méthodes d'intervention plus actives



- Combinaison avec une technique d'atténuation stimulée permettant de modifier les conditions du sol ;
- Inoculation du sol avec des microorganismes capables de mener la dégradation jusqu'au stade ultime (CO₂, éthène, éthane) après tests de laboratoire et obtention des autorisations nécessaires. Ces microorganismes peuvent être délivrés par un laboratoire certifiant leur caractéristiques et potentiel de dégradation ou être constitué par un inoculum (sol ou eau souterraine) provenant d'un site où la biodégradation complète a été observée.

Durée du traitement par atténuation naturelle irréaliste du point de vue économique. La durée escomptée du traitement pour atteindre les objectifs **de traitement** doit être revue nettement à la hausse sur base des observations faites durant la phase préliminaire de sorte que les délais nécessaires deviennent irréalistes en termes d'occupation et accessibilité du terrain, coûts de la supervision, ... Les solutions correctives passent nécessairement par la mise en œuvre de techniques d'intervention plus actives au niveau du noyau ou au niveau du panache de la contamination.

La vitesse de dégradation des polluants et des produits intermédiaires n'est pas suffisante pour empêcher la migration du panache de pollution vers les cibles sensibles identifiées (limites de la parcelle, cibles sensibles telles que les zones d'habitat, les zones de protection de captage, les zones vertes, ...). Les solutions correctives passent nécessairement par la mise en œuvre de techniques d'intervention plus actives permettant soit, d'intercepter la migration du panache, soit d'augmenter la vitesse de dégradation des polluants, soit les deux les deux modes d'intervention combinés.

Tableau 6 : informations à présenter dans le premier rapport intermédiaire

| Rubrique | Paramètres et quantité à mesurer | Commentaires |
|---|--|---|
| Description de la situation de départ, lors du lancement de la prise en charge | Répartition des teneurs en polluants et en produits intermédiaires (situation 3 D) dans la phase solide et liquide du sol (éventuellement dans la phase gazeuse), niveaux piézométriques et carte des iso-pièzes (sens d'écoulement). Indicateurs géochimiques dans l'eau souterraine : TOC, accepteurs d'électrons : O ₂ , nitrates, sulfates, Fer (II), Mn(II), pH, Eh, conductivité électrique, T°, carbone inorganique . Durée projetée du traitement sur base des données acquises. | Représentation graphique de l'extension du panache de contamination |
| Description du dispositif de supervision mis en œuvre (as built) | Description des éléments du dispositif : piézomètres d'observation (nombre, localisation, description, profondeur, massifs filtrants, bouchons de l'espace annulaire, tête, sonde de t°), points d'échantillonnage du sol (localisation, profondeur), points de prélèvement éventuels des gaz du sol (nombre, localisation, description, profondeur, massifs filtrants, bouchons de l'espace annulaire, tête, sonde de t°) | Plan de localisation |
| Evolution des paramètres à rapporter au cours de la première phase | Répartition (en 3 D) des teneurs en polluants faisant l'objet de l'intervention et des produits de dégradation intermédiaires + polluants secondaires générés (As, ...). Niveaux piézométriques et sens d'écoulement (carte iso-pièzes). Indicateurs géochimiques de l'atténuation : TOC, teneurs en accepteurs d'électrons : O ₂ , Nitrate, sulfate, Fe(II), Mn(II), pH, Eh, conductivité électrique, T°, carbone inorganique dissous | Représentation graphique de l'extension du panache de contamination |
| Paramètres facultatifs à rapporter | Examen par PCR de l'eau souterraine. Teneurs dans l'eau souterraine en H ₂ , acétate et autres acides organiques volatiles, chlorure, nitrite, sulfite, sulfure, éthène, éthane, méthane, indice phénol, CO ₂ | |
| Interprétation des résultats | Simulation de l'extension future du panache de pollution et niveau de risque pour les cibles sensibles. Estimation de la durée du traitement. Analyse de la faisabilité de la prise en charge par atténuation naturelle. | Représentation graphique de l'extension du panache de contamination |



Actions correctives

Modifications à apporter au dispositif de supervision. En cas d'insuffisance avérée de l'atténuation naturelle (durée trop longue, risque pour les cibles sensibles) mise en œuvre d'une technique de prise en charge alternative plus active

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

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

Ces mesures consistent en une dernière campagne d'échantillonnage et d'analyse des couches de sols et de l'eau souterraine impactées. Cette campagne d'analyse portera sur tous les polluants dont la présence a requis une intervention, leurs produits de dégradation intermédiaires à caractère nocif et les autres polluants susceptibles d'avoir été libérés suite à la présence prolongée de la pollution (As, ...).

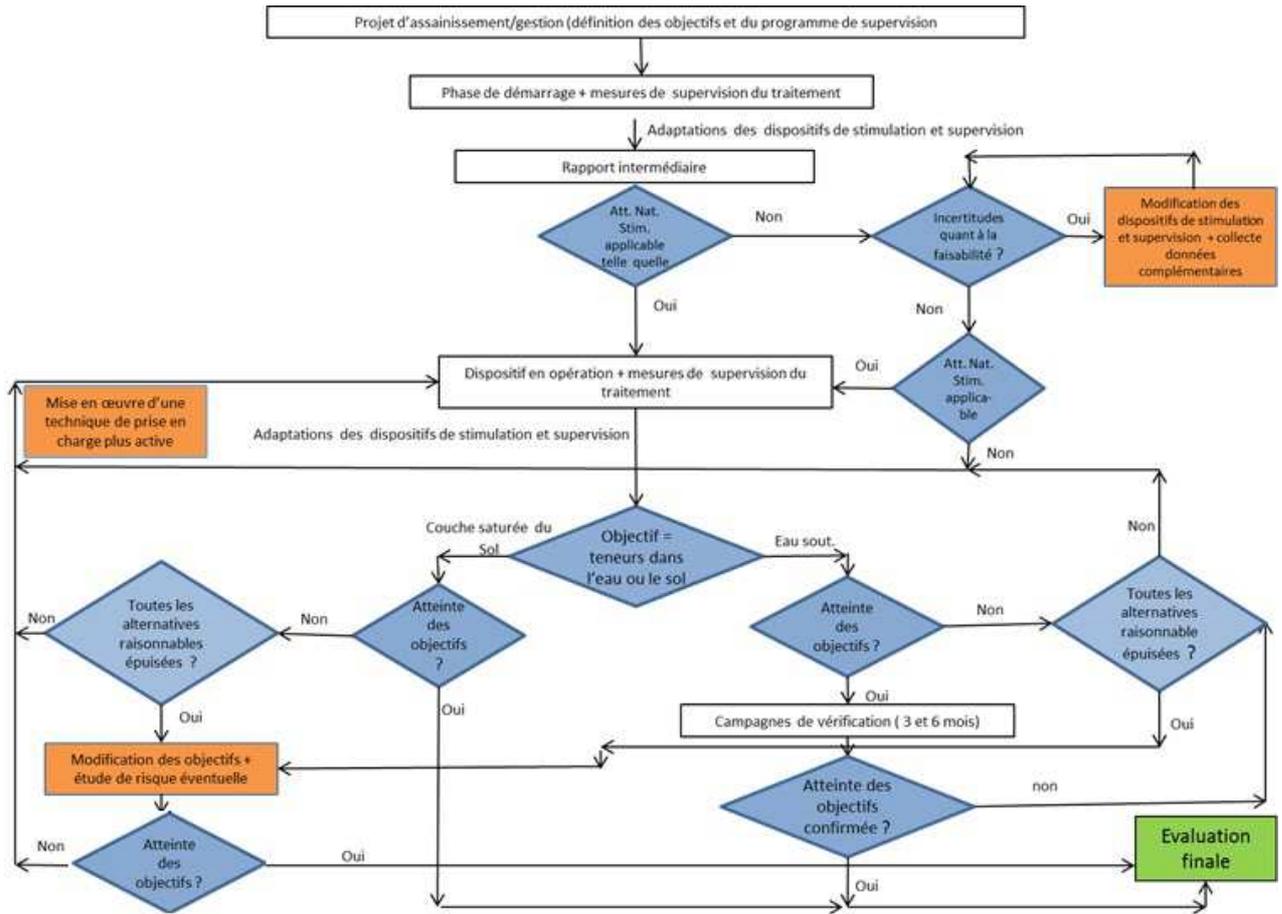
En cas d'atteinte des objectifs **de traitement** au sein de la tache de pollution, deux autres campagnes d'échantillonnage de l'eau souterraine successives seront effectuées, à respectivement 3 mois et 6 mois de manière à vérifier la durabilité des résultats acquis.

En cas de maintien des niveaux de teneurs en équilibre sous les valeurs objectif, **le traitement** peut être considéré comme accompli, le dispositif de supervision peut alors être démantelé (à moins qu'une validation à long terme ne doive être réalisée) et un rapport d'évaluation finale introduit.

En cas de non atteinte permanente des objectifs de teneurs, le dispositif de supervision est maintenu en activité après mise en place de mesures correctives éventuelles : mise en œuvre de méthodes d'intervention « plus actives » : atténuation stimulées par infiltration/injection de composés modifiant les conditions de pH, de T°, modifiant la disponibilité de donneurs ou accepteurs d'électrons, injection d'agent surfactants, excavation du noyau, ...

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

Le schéma décisionnel lors de l'étape de validation du traitement est le suivant.



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

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

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

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

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

Les paramètres qui seront relevés seront :

- Les teneurs résiduelles en polluants dans l'eau souterraine (polluants dont la présence a justifié l'intervention sont analysés + produits de dégradation intermédiaires à pouvoir délétère sur la santé humaine et l'environnement, métaux et autres polluants sensibles aux conditions redox du sol) ;
- Les paramètres influençant la poursuite de l'atténuation naturelle de la contamination: pH, O₂, CO₂, TOC, nitrate, sulfate, nutriments, Fe(II), Mn(II), ... selon les processus responsables de l'atténuation naturelle escomptée.

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

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

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

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

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

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

14. Recommandation en matière de santé, sécurité et organisation

Les seuls risques à prendre en compte sont ceux liés à la présence prolongée du polluant dans le sol, compte tenu de la durée de la prise en charge, ainsi que les risques d'impact des cibles sensibles si l'efficacité de l'atténuation naturelle n'est pas à même de compenser la migration du panache de pollution.



15. Sources bibliographiques

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

- Code van goede praktijk : Natuurlijke attenuatie, OVAM, Januari 2003
- Natural Attenuation of MTBE in the Subsurface under Methanogenic Conditions, John T. Wilson et al., EPA/600/R-00/006, January 2000
- Guidance on the Assessment and Monitoring of Natural Attenuation of Contaminants in Groundwater, M.A. Carey et al., Environment Agency 2000, R&D Publication 1995
- Achilles, Veiligheid, gezondheid en milieuzorgsysteem voor on-site bodemsanering werken, OVAM 2001.
- Standaardprocedure Bodemsaneringwerken, Eindevaluatieonderzoek en Nazorg, versie oktober 2011, OVAM