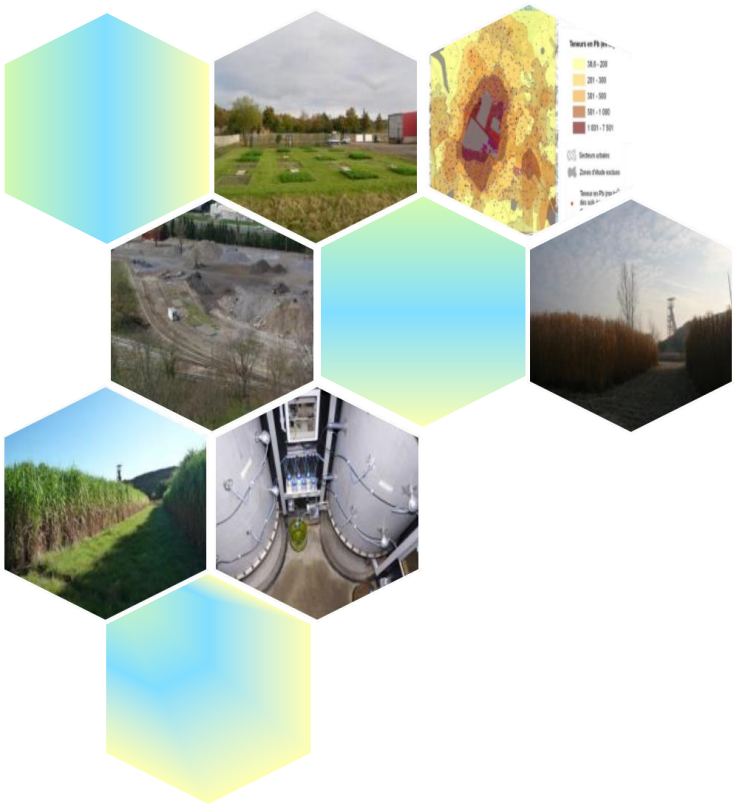
Les cahiers du réseau

n°1 La gestion des pollutions par atténuation naturelle



Edition : mai 2016
Avec le soutien financier de l'ADEME

Table des matières

Introduction 3

I. L'atténuation naturelle : qu'est-ce que c'est, comment ça marche ? 4

Qu'est-ce que l'atténuation naturelle ? 4

Que se passe-t-il en cas de pollution d'un sol ? 4

Quels sont les mécanismes de l'atténuation naturelle ? 7

II. Les bonnes questions à se poser 9

Qui peut être concerné par la mise en place d'une démonstration d'AN ? 9

Y'a-t-il une méthodologie pour la mise en œuvre de l'AN en France? 9

Quelles sont les situations où la question de gestion par l'AN est prématurée ? 10

A partir de quand la gestion par l'AN peut-elle devenir pertinente ? 10

Comment mettre en évidence des phénomènes d'AN ? 11

Lorsque j'ai mis en évidence les phénomènes, comment évaluer la faisabilité de gestion par l'AN ? 11

Que dois-je faire si la gestion par AN s'avère être la bonne option ? 14

Quel est le coût de la gestion par AN ? 15

III. Retours d'expérience sur 2 cas d'études 17

Etude de la faisabilité de l'atténuation naturelle sur une station-service en fonctionnement. 18

Etude de la faisabilité de l'atténuation naturelle sur une ancienne cokerie. 20

Introduction

Ce cahier est le premier numéro d'une collection que SAFIR se propose de lancer sur le thème de la gestion des sites et sols pollués.

La prise en compte de l'atténuation naturelle dans la gestion des sites et sols pollués est prévue dans les textes de 2007

La cadre méthodologique national de gestion des pollutions par atténuation naturelle a été élaboré au travers du projet ATTENA[1]. Un protocole national a été publié à l'issue de ce projet, accompagné par un ensemble de modes opératoires. Ce corpus documentaire est destiné aux spécialistes et professionnels du domaine. Pour cette raison, une brochure de présentation présentant les principes généraux des phénomènes d'atténuation naturelle et les grandes lignes des cas d'application a également été publiée pour un public non averti.

L'objectif de ce cahier est de venir compléter ce corpus documentaire. Il est destiné à des propriétaires ou gestionnaires de sites qui se posent la question du recours à la gestion par atténuation naturelle. Une première partie expose les notions fondamentales des phénomènes d'atténuation naturelle et de la façon de les mettre en évidence et d'y avoir recours. Le lecteur trouvera en deuxième partie un cheminement sous forme de questions qui le guidera dans sa réflexion, en le renvoyant aux chapitres correspondante du protocole national. La troisième partie résume deux études de cas traitées dans le cadre du projet ATTENA.

Ce cahier s'appuie donc sur le *Protocole opérationnel de gestion de sites par atténuation naturelle dans le contexte réglementaire français*. Les figures présentées dans le cahier en sont toutes issues.

Bonne lecture…

Remerciements :

Nous remercions les partenaires du projet ATTENA dont les travaux et les résultats obtenus ont permis d'élaborer ce cahier.

[1] Pour plus d'information sur le projet ATTENA : http://www.safir-network.com/lattenuation-naturelle

I. L’atténuation naturelle : qu’est-ce que c’est, comment ça marche ?

Qu’est-ce que l’atténuation naturelle ?

La littérature scientifique regroupe un grand nombre d'expressions relatives à la notion d'atténuation naturelle.

- Le processus global d’atténuation naturelle (AN) peut être présenté comme « l'ensemble des mécanismes conduisant sans intervention humaine, à une diminution de la masse, la toxicité, la mobilité, le volume, le flux ou la concentration des polluants dans les sols ou les eaux souterraines.»
- Dans le cadre méthodologique français sur lequel nous reviendrons plus loin, on entend par mécanisme d'atténuation naturelle l'ensemble des processus naturels qui concourent à la diminution dans l’espace et dans le temps d’un panache de pollution (composés dissous et/ou vapeurs). Les "processus biologiques", qui peuvent jouer un rôle prépondérant, sont souvent mis en avant.
- La directive OSWER de l’US-EPA (U.S. EPA, 1999) recommande l'usage de « Monitored Natural Attenuation » (MNA). Dans cette notion, il ne s'agit plus seulement d'un phénomène naturel englobant les différents mécanismes qui contribuent à faire diminuer les concentrations en polluants, mais bien du suivi analytique, du contrôle de la pollution à long terme, de la compréhension des mécanismes, et de l'utilisation de la modélisation prédictive justifiant l'utilisation de l’AN dans le cadre de la gestion ou du traitement d'un site.

Des mécanismes d’atténuation naturelle existent pour un certain nombre de composés organiques et pour les métaux et métalloïdes. Ce cahier s’intéresse à trois familles de polluants : les solvants chlorés (COHV[2]), les hydrocarbures pétroliers (BTEX[3] et éthers carburants principalement), et les HAP[4].

Que se passe-t-il en cas de pollution d’un sol ?

Lors de déversements ou de fuites, les polluants peu miscibles à l’eau, tels que les hydrocarbures pétroliers, les produits de la pyrolyse de la houille (HAP et BTEX notamment), et les composés organo-halogénés volatils vont migrer dans le sol et dans les aquifères[5].

La phase organique du polluant (polluant à l’état pur) va se déplacer par gravité dans le milieu souterrain en fonction de sa densité et des conditions du milieu (nature du sol, saturation à l’eau…).

---

[2] Composés Organo-Halogénés Volatils

[3] Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes

[4] Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques constituants des goudrons de houille

[5] Un aquifère est une formation géologique ou une roche, suffisamment poreuse et/ou fissurée et perméable, pour contenir, de façon temporaire, ou permanente une nappe d'eau souterraine mobilisable

Les corps d'imprégnation ainsi formés (volume d'aquifère présentant des composés sous forme de phase organique) constituent des zones **sources** de la pollution.

Ces sources peuvent être le siège de mécanismes de mobilisation conduisant au développement d'émissions polluantes matérialisées par un panache :

- De composés dissous dans l'aquifère,
- De composés gazeux, dans le volume occupé par l'air dans la Zone Non Saturée (ZNS)[6].

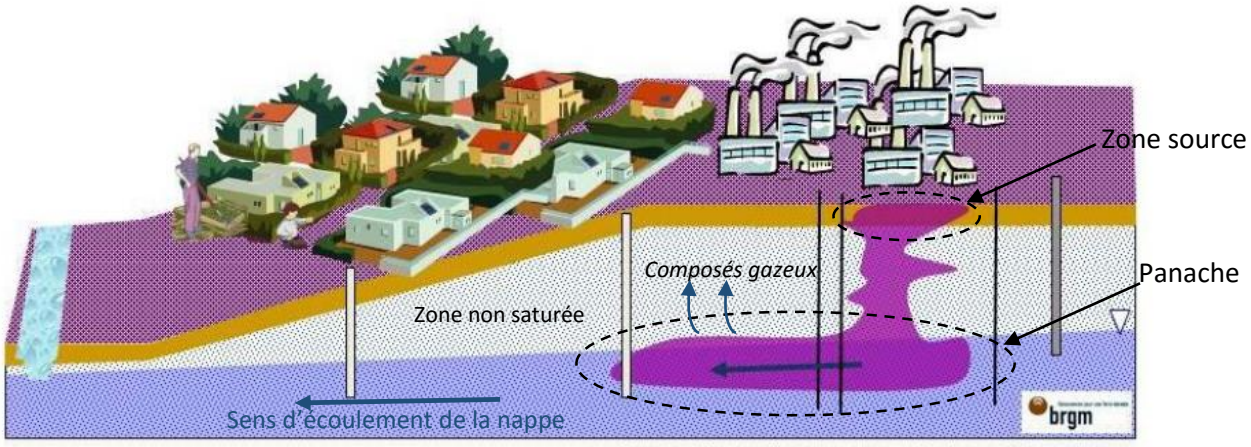


Figure 1 : Mécanismes entrant en jeu dans le cadre d'une pollution (Source : Protocole national – projet ATTENA)

Au sein de l'aquifère, le panache est alimenté par le processus de dissolution des polluants de la zone source vers la phase aqueuse. Il s'agit là du principal mécanisme de pollution d'un aquifère. Tant que la zone source perdure et reste au contact des flux d'écoulement des eaux souterraines, le panache sera alimenté. La longévité de la zone source définit la durée de vie de l'alimentation des panaches induits. Toutefois, ce processus de transfert diminue inexorablement avec l'épuisement progressif de la zone source.

De ce fait, un panache de composés dissous connaît généralement plusieurs phases d'évolution comme l'illustre la Figure 2.

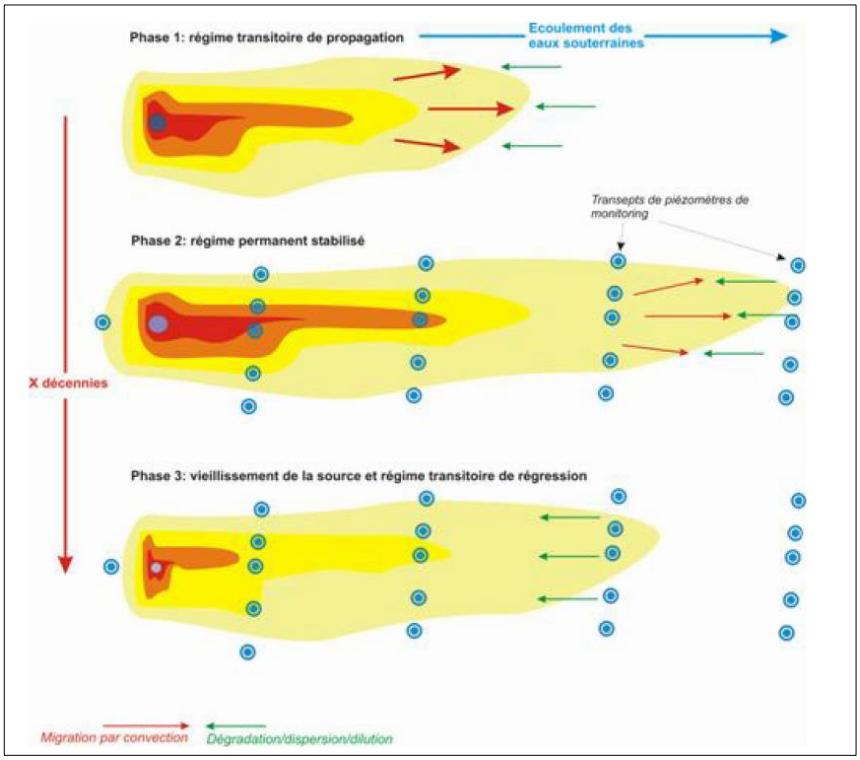


Figure 2 : Evolution d'un panache de polluants en phase aqueuse (adaptée de Sinke et Le Hécho, 1999) - (Source : Protocole national – projet ATTENA)

[6] Zone au-dessus de la nappe

Les longueurs de panaches varient en fonction de chaque famille de polluant :

- Les panaches de COHV sont généralement plus étendus que les panaches d'hydrocarbures et de HAP. Ceci s'explique par la solubilité supérieure pour des COHV ainsi que leur relative récalcitrance à la biodégradation.
- Les BTEX et les HAP légers conduisent à des panaches limités. Bien que ces composés soient relativement solubles, leur dégradation est généralement rapide.

Dès que les polluants sont identifiés (informations issues des études historiques et documentaires), il est nécessaire de prendre en compte leurs caractéristiques physico-chimiques pour pouvoir évaluer leur comportement. Les principales propriétés intrinsèques des polluants organiques qui influent sur leur comportement sont décrites dans le Tableau 1.

Paramètres	Unité	Critères (à 20 – 25°C)	Interprétation	Incidence
SOLUBILISATION				
Solubilité dans l'eau	mg/l	S<150 150<S<10 000 S>10 000	=>insoluble à peu soluble =>peu soluble à soluble =>soluble à très soluble	*Une forte solubilité constitue un facteur aggravant des pollutions.*
VOLATILISATION				
Pression de vapeur (Pv)	[Pa]	P_v<133 P_v>133	=> non volatil => volatil	*Influe sur la manière dont le polluant migre dans la ZNS, dont il se libère par volatilisation naturelle ; cette propriété est notamment importante pour évaluer l'exposition par inhalation de vapeurs issues du sous-sol*
Point d'ébullition (Te)	[°C]	T_e<80 80<T_e<200 T_e>200	Indicatif	
Constante de Henry (kH)	[Pa.m^3/mol]	k_H<100 100<k_H<500 k_H>500	=>faiblement volatil =>volatil =>très volatil	
MIGRATION GRAVITAIRE DES VAPEURS				
Densité par rapport à l'air (dv)	(d_{air}=1)	d_v<1 d_v>1	=>mouvement ascendant => accumulation en surface de nappe ou interface imperméable en ZNS	*Influe sur la manière dont le polluant migre dans la ZNS, dont il se libère par volatilisation naturelle ; cette propriété est notamment importante pour évaluer l'exposition par inhalation de vapeurs issues du sous-sol*
MIGRATION VERTICALE DU FLUIDE				
Densité par rapport à l'eau (d1)	(d_{eau}=1)	d_1<1 d_1>1	=>flottant au toit de la nappe =>écoulement vertical au sein de la nappe	*LNAPL ou DNAPL*
Viscosité (µ)	[cP]	µ<0,9 0,9< µ<2 µ>2	=>plus fluide que l'eau =>fluidité de l'eau =>fluidité de l'huile ou moindre	*Influent sur les vitesses de migration de phase libre et sur le degré de saturation de phase résiduelle*
PIEGEAGE (PAR ADSORPTION) DANS LA PHASE SOLIDE				
Coefficient de partage octanol/eau (Kow) ou carbone organique/eau (Koc)	Log $K_{ow/oc}$	Log $K_{ow/oc}$<2 2>Log$K_{ow/oc}$>4 Log$K_{ow/oc}$>4	=>compose « hydrophile » =>"hydrophile" à "hydrophobe" =>composé « hydrophobe »	*Influe sur la rétention d'un composé par la matière organique des sols, sur sa mobilisation par de l'eau d'infiltration*

Tableau 1 : Critères d'appréciation du comportement des produits organiques (BRGM, 2008, d'après Pellet, 1994) - (Source : Protocole national – projet ATTENA)

L'identification des polluants et la prise en compte de leur mobilité dans les différents milieux permet d'établir un état des lieux de la situation. Cet état des lieux se traduit sous la forme d'un **schéma conceptuel**, constituant les fondations sur lesquelles toute démarche de gestion doit reposer. La Figure 3 ci-dessous donne un exemple d'un tel schéma. Ce schéma doit évoluer en fonction de la connaissance du site.

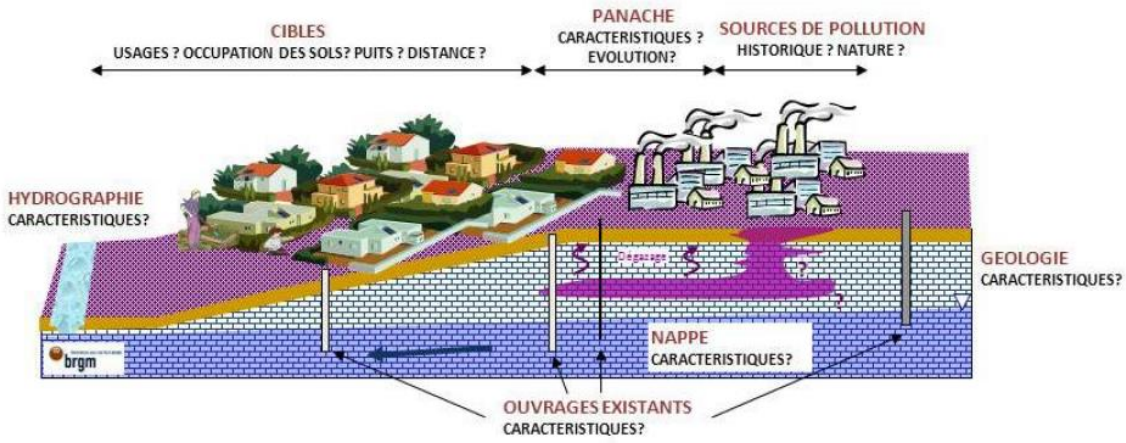


Figure 3 : Exemple de schéma conceptuel (Source : Protocole national – projet ATTENA)

Quels sont les mécanismes de l'atténuation naturelle ?

Dans l'atténuation naturelle, plusieurs mécanismes entrent simultanément en jeu :

- Les mécanismes destructifs (ex. la biodégradation, dégradation chimique),

Ils sont particulièrement intéressants dans la mesure où ils permettent une réduction irréversible de la masse de polluant présent dans les milieux. Notons cependant que :

  - les mécanismes de dégradation peuvent être partiels. Ils font alors faire apparaître des sous-produits (métabolites) inoffensifs ou plus toxiques que les substances de départ,
  - ces mécanismes de dégradation peuvent ne pas être pérennes dans le temps (en cas de modification des conditions biogéochimiques favorables à la dégradation des polluants).

Parmi ces mécanismes, la biodégradation peut prendre plusieurs formes qui se distinguent par le transfert d'électrons. En effet, du point de vue biochimique, la biodégradation est une oxydoréduction dans laquelle un oxydant (accepteur d'électron) va réagir avec un réducteur (donneur d'électrons). Le tableau 2 illustre le fait que les polluants ont un comportement réactionnel prépondérant, qui peut varier suivant les conditions. Ceci explique aussi l'importance de faire un bilan des accepteurs et donneurs d'électrons présents, pour évaluer les chances d'une biodégradation par atténuation.

- Les mécanismes séquestrant (ex. l'adsorption).

Ces mécanismes, en immobilisant la pollution empêchent son transfert vers des récepteurs. Ces mécanismes peuvent également ne pas être pérennes (adsorption réversible).

- Les mécanismes de dilution ou de transfert d'une partie ou de toute la pollution d'un milieu à un autre (ex : la convection, dilution, diffusion).

La dilution est inéluctable dès lors que des substances atteignent la nappe (qui généralement montre des concentrations quasi-nulles en amont du site, ce qui génère une des origines de l'effet de dilution).

De la même manière, le transfert de polluant d'un compartiment vers un autre (du sol vers l'atmosphère ou la nappe, de la nappe vers l'atmosphère ou la rivière, de la rivière vers l'atmosphère ou la nappe etc.) est souvent présent.

Les mécanismes prépondérants de l'atténuation naturelle sont repris dans le **Erreur ! Source du envoi introuvable.**.

Famille de polluants	Type de polluant	Mécanismes d'atténuation non destructifs		Mécanismes d'atténuation destructifs					
		Sorption et liaison	Volatilisation	Biodégradation aérobie (polluant comme donneur d'électron)	Biodégradation anaérobie (polluant comme donneur d'électron)	Biodégradation anaérobie (polluant comme accepteur d'électron)	Fermentation	Co-métabolisme	Oxydation/réduction chimique
Solvants chlorés	≥ 3 atomes de chlore	•	•		•	••		•	•(*)
	≤ 2 atomes de chlore	•	•	••	•	•	•	•	
Hydrocarbures pétroliers	BTEX	•	•	••	•		•	•	
	HCT C5-C10	•	••	••	•				
	HCT C10-C40	••	•	••	•				
Composés oxygénés	MTBE, TAME, ETBE TBA		•	••				•	
HAP	Naphtalène	•	•	••	•			• ?	
	3 cycles	••		•	•			• ?	
	4 et +	••		•	•			• ?	

•• importance primaire • importance secondaire ? doute sur le processus

(*) : uniquement pour le TCA et le tétrachlorure de carbone

Tableau 2 : Mécanismes prépondérants pour l'AN des polluants organiques (d'après LABO, 2010 et Carey 2010) - (Source : Protocole national – projet ATTENA)

⇨ C'est en utilisant de façon combinée les connaissances sur les conditions du milieu, le comportement des polluants et les mécanismes d'AN que l'on peut mettre en œuvre une étude de démonstration du phénomène d'atténuation naturelle. Cette mise en œuvre suppose de se poser les bonnes questions. C'est ce que nous allons voir dans le chapitre suivant.

II. Les bonnes questions à se poser

Ce chapitre vous guide dans le questionnement qu'il faut conduire pour la mise en place d'une gestion par AN.

Qui peut être concerné par la mise en place d'une démonstration d'AN ?

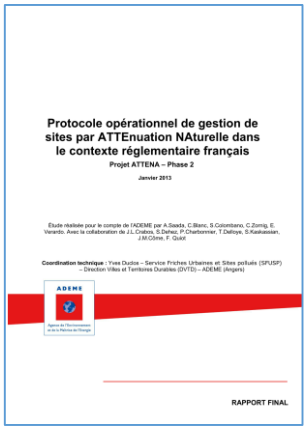
Si j'ai en responsabilité un site, je peux être amené à me poser la question de la mise en place d'une démonstration d'AN, dans plusieurs situations :

- Je suis exploitant d'une ICPE qui a mis en place une surveillance suite à une pollution ancienne,
- Je suis exploitant d'une ICPE, je viens juste de détecter une pollution au niveau de mon réseau de piézomètres,
- Je suis un aménageur, promoteur. Je dois dépolluer mon terrain avant redéploiement.

Y'a-t-il une méthodologie pour la mise en œuvre de l'AN en France?

Oui !

Un « protocole opérationnel de gestion des sites par atténuation naturelle dans le contexte réglementaire français » a été élaboré dans le cadre du Projet ATTENA et publié en 2013. Dans ce cahier, des renvois aux chapitres correspondant du protocole vous permettront d'approfondir les sujets abordés.



Pour aller encore plus loin dans la technique, ce protocole est complété par quatre modes opératoires :

Quelles sont les situations où la question de gestion par l'AN est prématurée ?

L'atténuation naturelle nécessite du temps pour se mettre en place. Cette contrainte de temps conduit à exclure de son champ d'application deux situations :

- Lorsque des mesures rapides s'imposent en raison de risques sur la santé publique, tant que ces risques ne sont pas ramenés à un niveau jugé acceptable,
- Lorsqu'il y a une volonté de valoriser rapidement le foncier.

Dans ces deux cas, le propriétaire/gestionnaire du site doit se placer dans une **logique de réparation**, et répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les caractéristiques de la source de pollution (délimitation, nature et quantité des polluants) ?
- Comment puis-je maîtriser et traiter la source ?
- Y a-t-il des enjeux à préserver (§3.4.2 du protocole) ? Si oui, quelles mesures dois-je prendre ?
- Quelles sont les limites de l'extension du panache et sa dynamique ?

A partir de quand la gestion par l'AN peut-elle devenir pertinente ?

Lorsque toutes les mesures de maîtrise et de traitement des sources ont été réalisées (voir question précédente) et que la suppression totale des sources n'est pas possible, il convient de réaliser un **bilan coûts-avantages** des meilleures techniques disponibles à un coût acceptable. C'est dans le cadre de la réalisation de ce bilan coûts-avantages que l'option reposant sur l'atténuation naturelle peut être envisagée lorsqu'elle reste compatible avec les usages et les délais envisagés.

Pour établir mon bilan coûts-avantages (§ 3.4 du protocole), je dois me poser les questions suivantes :

- Y-a-t-il des enjeux à protéger (§ 3.4.2 du protocole) ?

⇨ Pour les sites à forts enjeux et à la caractérisation complexe, l'analyse des enjeux sur la ressource en eau peut être accompagnée d'une modélisation prédictive (§2.5 du protocole).

- Comment va se propager mon panache ?

⇨ Il convient de vérifier que mon panache n'est pas en phase d'extension et qu'il n'y a pas de risque vis-à-vis des enjeux identifiés (**Erreur ! Source du renvoi ntrouvable.**).

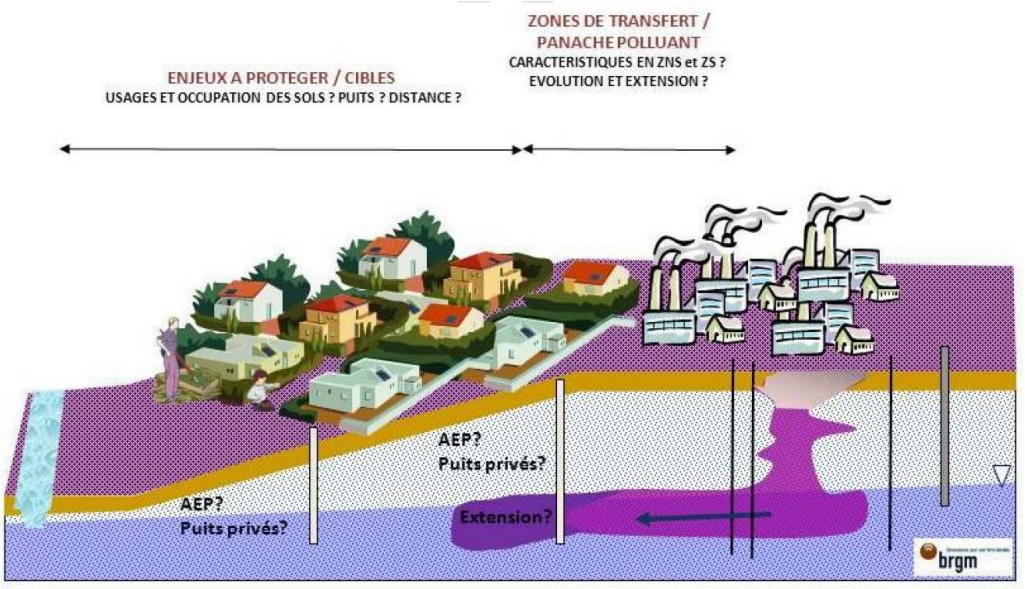


Figure 4 : Eléments à regarder pour l'élaboration du bilan coût-avantage (Source : Protocole national – projet ATTENA)

Comment mettre en évidence des phénomènes d'AN ?

Pour pouvoir évaluer la gestion par AN dans les options du bilan coûts-avantages, plusieurs questions doivent être abordées :

- Est-ce que j'ai bien quantifié la source et le panache (§ 3.2 et 3.3 du protocole) ?

⇨ Ce dimensionnement est primordial, car il permet de connaître les « stocks » de pollution. Sans la connaissance des « stocks » l'estimation de la disparition du panache est compromise.

- Le comportement potentiel des polluants a-t-il été bien évalué (§ 2.2 du protocole) ?
- Quel est le bilan des accepteurs et des donneurs d'électrons présents et quel est leur comportement (§ 2.3.1 et 2.3.2 du protocole) ?
- Est-il nécessaire / possible d'avoir des preuves complémentaires (§ 2.3.3 du protocole) ?

Lorsque j'ai mis en évidence les phénomènes, comment évaluer la faisabilité de gestion par l'AN ?

L'évaluation de la faisabilité est un processus itératif qui peut être mis en œuvre plusieurs fois au cours de la démonstration de l'AN sur un site (suivant ainsi l'évolution de la mise à jour du schéma conceptuel et du bilan coût / avantage) :

1) Suite à la collecte des données historiques et à la mise en évidence de processus de dégradation actifs évalués a minima sur la base d'un bilan qualitatif des Accepteurs/Donneurs d'électrons,

2) Suite aux acquisitions de nouvelles données, à l'issue des différentes phases de diagnostic (quantification de la source et du panache) d'un site et de traitabilité de gestion par AN (quantification des mécanismes d'AN et en particulier de la biodégradation).

Le Tableau 3 fournit des critères permettant d'évaluer ou non la faisabilité de l'AN pour l'étude considérée.

Ces critères ne sont pas figés et peuvent évoluer en fonction des contextes de gestion.

Ils permettent d'orienter la prise de décision des différentes parties prenantes d'envisager un recours à l'AN.

Critères	Faisabilité		
	Elevée	Intermédiaire	Faible
Facteurs techniques			
Source de pollution des eaux souterraines	Source maitrisée ou épuisée – pas de source résiduelle	Source maîtrisée - source résiduelle encore active	Source non maîtrisée*
Définition du panache	Bien défini		Mal défini
Etat du panache	Rétrécissement	Stable	En extension
Compatibilité du panache avec les usages	compatible (usages compatibles avec caractéristiques du panache)	compatible (usages constatés à proximité du panache) – possibilité de rétablir la compatibilité par des mesures simples (ventilation mécanique, …)	non compatible* (usages non compatibles avec caractéristiques du panache) - impossibilité de rétablir la compatibilité par des mesures simples
Hétérogénéité et isotropie de l'aquifère	Homogène et isotrope		Hétérogène et anisotrope
Persistance du polluant dans l'environnement	Aisément atténué (dégradé) dans les conditions présentes sur le site	Pas aisément dégradé dans des conditions présentes sur le site	Les procédés d'atténuation sont mal compris
Potentiel de pollution des produits dérivés	Pas toxique ou moins toxique que le parent	Même toxicité	Plus toxique que le parent
Données de surveillance	Haut (Données de surveillance cohérentes et acquisition sur une durée de plus de 2 ans à une fréquence semestrielle)		Faible (peu ou pas de données de surveillance historiques)
Conditions bio-géochimiques (sur la base du bilan des AE/DE)	Favorable pour le polluant considéré	possible	Défavorable pour le polluant considéré
Praticabilité et contraintes économiques			
Surveillance dans la zone d'impact	Accès disponible	Accès possible	Accès limité/impossible
Objectifs du propriétaire foncier	Intérêt à long terme	Intérêt à moyen terme	Propriété à court terme
Estimation globale			
***Critère limitant**	Critères élevés ou intermédiaires mais absence de critère limitant*	Critères élevés, intermédiaires ou faibles mais absence de critère limitant*	Un ou plusieurs critère(s) limitant(s)* ou absence de critère élevé

Tableau 3 : Critères nécessaires pour déterminer la faisabilité de l'atténuation naturelle (d'après Carey et al. 2000) - (Source : Protocole national – projet ATTENA)

Que dois-je faire si la gestion par AN s'avère être la bonne option ?

Lorsque le bilan coûts-avantages conclut que la mise en place de l'atténuation naturelle est la solution de gestion la plus favorable, celle si doit s'accompagner :

- d'une surveillance appropriée des milieux (§ 3.6 du protocole),
- d'une vigilance pérenne sur les changements d'usage et d'une information systématique des acquéreurs par le biais des documents d'urbanisme ou fonciers (conservation des hypothèques).

La surveillance appropriée des milieux s'accompagne :

- de la mise en place d'un **réseau d'alerte** si des cibles sensibles ont été mises en évidence (AEP, puits privés,...),
- de la mise en place d'un **plan de surveillance de l'AN** : les objectifs d'un programme de surveillance à long terme des eaux souterraines sont de vérifier qu'il n'existe aucune altération à l'efficacité de l'AN et que les objectifs de dépollution définis dans le plan de gestion sont atteints (Figure 5).

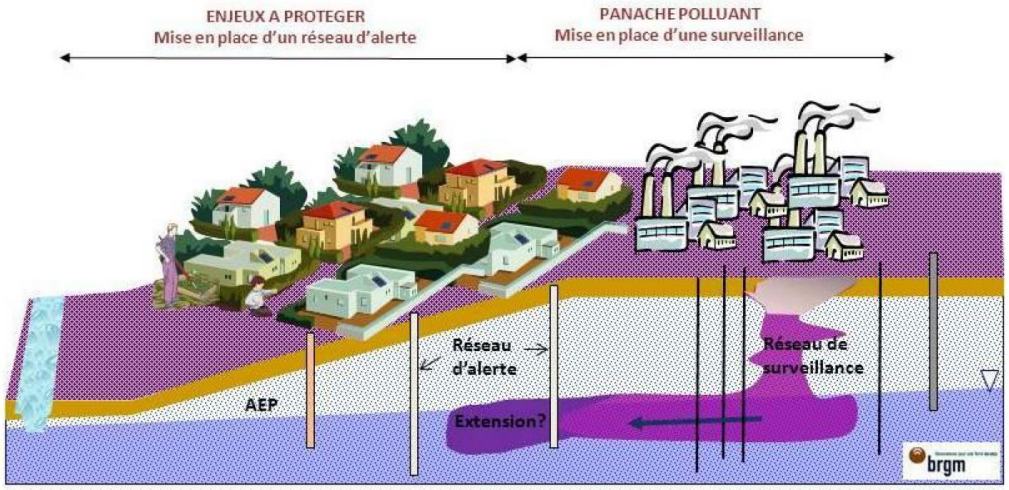


Figure 5 : Suivi à mettre en place : réseau d'alerte et réseau de surveillance (Source : Protocole national – projet ATTENA)

La représentation schématique de la définition du plan de surveillance est présentée en Figure 6.

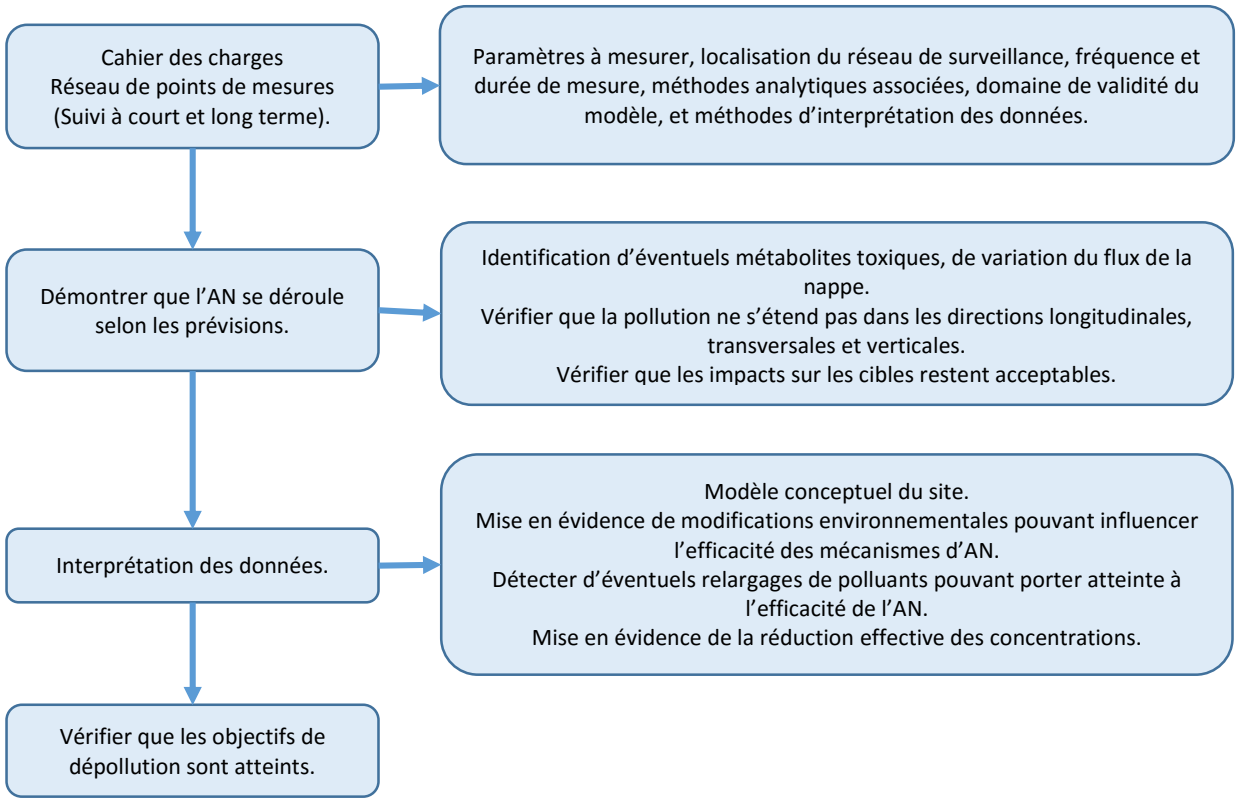


Figure 6 : Représentation schématique de la définition du plan de surveillance

Quel est le coût de la gestion par AN ?

Des investigations spécifiques à l'AN sont nécessaires au moment du diagnostic. Les coûts associés peuvent cependant être optimisés s'ils sont intégrés au diagnostic général.

Le poste de coût essentiel correspondra à la mise en œuvre du plan de surveillance, conformément à la représentation faite en figure 6 (mise en place du réseau piézométrique, coût des analyses…).

Comme nous l'avons vu l'AN peut prendre du temps, plusieurs décennies, ce qui peut engendrer des coûts de suivi non négligeable. Il est donc important de traiter cette composante économique dans le bilan coûts-avantages.

En tout état de cause, on le voit bien : l'AN, ce n'est pas « ne rien faire » et ce n'est pas sans coût. Sa mise en œuvre relève donc bien d'une stratégie de gestion proactive visant à une dépollution, accompagnée d'un coût associé qui peut être significatif.

L'atténuation naturelle peut constituer une option de gestion dans le contexte français. Loin de d'être un recours au « ne rien faire », elle nécessite la mise en place d'une démonstration qui valide sa faisabilité. Gérer une situation par atténuation naturelle, c'est enfin mettre en place un plan de surveillance dont le coût dépendra de la complexité de la situation et du temps

III. Retours d'expérience sur 2 cas d'études

Le projet ATTENA a permis de mettre en application le protocole sur deux cas :

- Une station-service en fonctionnement,
- Une ancienne cokerie.

Ces cas vous sont restitués dans les deux fiches qui suivent. Le développement de la gestion par l'AN se nourrira du retour d'expérience. Aussi nous mettons à votre disposition à la fin de ce cahier, une fiche vierge vous permettant de nous faire remonter votre expérience en la matière.

Etude de la faisabilité de l'atténuation naturelle sur une station-service en fonctionnement.

Sur ce site encore en activité, les études réalisées font état de sols contaminés par les hydrocarbures et d'eaux souterraines présentant des teneurs en hydrocarbures totaux (HCT) et en BTEX élevées. Ces teneurs importantes (environ 10 mg/l de BTEX) sont principalement retrouvées au droit d'un piézomètre, situé à proximité de l'ancien parc à cuves (aval du site). Les variations des concentrations en BTEX se font en corrélation avec le niveau piézométrique, traduisant ainsi une pollution dans la zone de battement de la nappe.

L'exploitant de cette station-service entre dans le cas « je suis exploitant d'une ICPE, j'ai mis en place une surveillance suite à une pollution ».

L'étude de faisabilité issue des données historiques et documentaire n'a pas suffi pour statuer quant à la faisabilité de l'atténuation naturelle sur le site. Il a fallu mener des investigations complémentaires pour déterminer notamment l'extension du panache de composés dissous, les phénomènes de transfert gazeux des polluants.

Pour se faire, en complément des études antérieures, de nouveaux piézomètres ont étés installés en aval du piézomètre impacté en BTEX, des sondages complémentaires ont été réalisés.

Suite à ses investigations complémentaires :

- Le sens d'écoulement a été approfondi,
- La dynamique du panache de composés organiques gazeux a été établie (prélèvements de gaz du sol dans la zone non saturée),
- La dynamique des composés organiques dissous a été étudiée (BTEX, accepteurs et donneurs d'électrons…),
- Les mécanismes d'atténuation naturelle ont été quantifiés (convection, diffusion, dissolution, dispersion…). La biodégradation est qualifiée comme étant le mécanisme prépondérant dans l'atténuation naturelle. Le second étant celui de la dilution.
- La dégradation a été modélisée,
- Le modèle prédictif d'évolution de l'atténuation naturelle a été dressé. Ce modèle a notamment été établit sur les observations faites depuis le début de la surveillance : pour le piézomètre fortement impacté en BTEX en aval de la zone de parc à cuves, les teneurs en benzène ont diminuées.

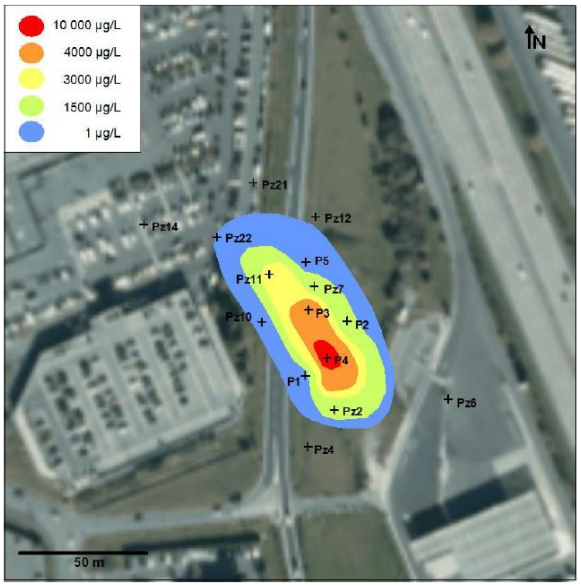


Figure 7 : panache de benzène au droit de l'ancien parc à cuves.

- La zone source de pollution n'alimentera plus le panache de benzène d'ici 2028. Soit 15 ans après T0 = 2012.
- Les concentrations en benzène seront inférieures à 1µg/l en P3 en 2037 et en 2041 pour PZ11 soit respectivement 25 et 29 ans après T0.

La synthèse de cette étude de faisabilité est placée dans le tableau suivant.

Critères	Facteurs techniques, praticabilité et contraintes économiques	Faisabilité élevée	Faisabilité intermédiaire	Faisabilité faible
Source de pollution des eaux souterraines	Source maitrisée, source résiduelle encore active		X	
Définition du panache	Bien défini (nombreux piézomètres)	X		
Etat du panache	Rétrécissement (les teneurs en benzène au droit du Pz fortement impacté en BTEX diminuent) /Stable		X	
Compatibilité du panache avec les usages	Pas d'utilisation de la nappe en aval immédiat, composés volatils dilués dans l'air extérieur	X		
Hétérogénéité et isotropie de l'aquifère	Hétérogène et anisotrope		X	
Persistance du polluant dans l'environnement	Aisément atténué, dégradé dans les conditions présentes sur le site	X		
Potentiel de pollution des produits dérivés	Pas toxique (moins toxique que le parent). Le CO_2 produit suite à la dégradation des BTEX peut être mortel, or les concentrations mesurées sont largement inférieures à la valeur moyenne d'exposition	X		
Données de surveillance	Haut (données de surveillance cohérentes et acquisition sur une durée de plus de deux ans à une fréquence semestrielle)	X		
Conditions biogéochimique sur la base du bilan d'accepteur / donneur d'électrons	Favorable pour les polluants considérés	X		
Surveillance dans la zone d'impact	Accès disponible	X		
Objectifs du propriétaire	Intérêt à long terme	X		

Ces observations ont permises de statuer en faveur de la faisabilité de l'atténuation naturelle.

Un plan de surveillance a alors été proposé. Celui-ci est dimensionné afin de mettre en avant une phase de régression du panache de pollution. Les protocoles de prélèvement, d'échantillonnage et d'analyse sont établis.

Il convient par la suite de confronter cette mesure de gestion à d'autres options via un bilan coûts / avantages.

Etude de la faisabilité de l'atténuation naturelle sur une ancienne cokerie.

Sur cette ancienne cokerie, les études réalisées font état d'une pollution des eaux (et des sols) aux HAP. La zone saturée et la zone insaturée seraient contaminées jusqu'à une profondeur de 50 m. Les eaux présentent également des concentrations en ammonium, sulfates, chlorures, potassium, cyanures, phénols ou encore hydrocarbures importantes.

Les différentes études ne montrent pas d'amélioration de la qualité des eaux avec le temps.

Le propriétaire de ce site entre dans le cas « je suis exploitant d'une ICPE, j'ai mis en place une surveillance suite à une pollution ».

L'étude de faisabilité issue des données historiques et documentaire n'a pas suffi pour statuer quant à la faisabilité de l'atténuation naturelle sur le site. Il a fallu mener des investigations complémentaires pour quantifier notamment la source de pollution et mettre en évidence les masses mises en jeu ainsi que pour quantifier le panache de pollution afin de vérifier la compatibilité d'usage avec le milieu.

Pour se faire, en complément des études antérieures, les anciens piézomètres ont été remis en état, de nouveaux ont étés installés. Des piézairs ont également été implantés sur le site.

Suite à ses investigations complémentaires :

- la source a été partiellement quantifiée. La consommation a pu être quantifiée, en revanche, des incertitudes subsistent quant à la quantité de goudron toujours présent dans le milieu,
- De nouveaux piézomètres ont été installés,
- La dynamique du panache a été modélisée (prélèvements de gaz du sol dans la zone non saturée, cartographie géophysique),
- La dynamique des composés organiques dissous a été étudiée (polluants inorganiques, organiques, accepteurs et donneurs d'électrons…),
- Les mécanismes d'atténuation naturelle ont été quantifiés (convection, diffusion, dissolution, dispersion…). La dilution est qualifiée comme étant le mécanisme prépondérant dans l'atténuation naturelle. Le second étant celui de la biodégradation.
- La biodégradation a été modélisée,
- Le modèle prédictif d'évolution de l'atténuation naturelle a été dressé. Le modèle prédictif a notamment été établit sur le bilan de masse effectué avec les incertitudes concernant la quantité de goudron présent dans les différents milieux.
    - La source de pollution aura disparu en 150 ans pour les composés solubles (benzène), en 3000 ans pour les moins solubles (naphtalène).
    - La source de pollution ne devrait plus alimenter le panache de pollution vers les années 2190.
- La présence de transferts de composés volatils sur site (et à l'extérieur) a été mise en avant.

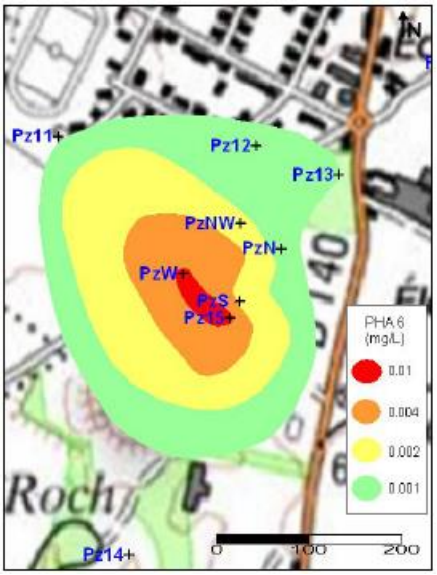


Figure 8 : panache de BTEX

La synthèse de cette étude de faisabilité est placée dans le tableau suivant.

Critères	Facteurs techniques, praticabilité et contraintes économiques	Faisabilité élevée	Faisabilité intermédiaire	Faisabilité faible
Source de pollution des eaux souterraines	Source résiduelle non maitrisée (financièrement et techniquement impossible à supprimer).	Critère limitant		
Définition du panache	Bien défini	X		
Etat du panache	Stable		X	
Compatibilité du panache avec les usages	Exposition des riverains à des vapeurs de polluants issus du site (gaz du sol) – consommation d'eau de la nappe (si présence de puits à usage privé)	Critère limitant		
Hétérogénéité et isotropie de l'aquifère	Hétérogène et anisotrope			X
Persistance du polluant dans l'environnement	Pas aisément dégradé dans les conditions présentes sur le site (cas du benzène)		X	
Potentiel de pollution des produits dérivés	Pas toxique (moins toxique que le parent)	X		
Données de surveillance	Haut (données de surveillance cohérentes et acquisition sur une durée de plus de deux ans à une fréquence semestrielle)	X		
Conditions biogéochimique sur la base du bilan d'accepteur / donneur d'électrons	Favorable pour les polluants considérés	X		
Surveillance dans la zone d'impact	Accès disponible	X		
Objectifs du propriétaire	Intérêt à long terme	X		

Ces observations n'ont pas permis de statuer en faveur de la faisabilité de l'atténuation naturelle.

Il conviendrait d'effectuer des mesures complémentaires afin de vérifier les compatibilités d'usage ou encore pour étudier la possibilité d'extraire la source résiduelle de pollution.

Retour d'expérience sur l'atténuation naturelle

Si vous souhaitez partager votre expérience sur l'atténuation naturelle, remplissez le document ci-dessous et retournez le à l'adresse suivante :

Jean Louis CRABOS, coordinateur du réseau SAFIR :

jlcrabos@prismenv.fr

Etude de la faisabilité de l'atténuation naturelle sur

.....

Description de la situation (type de site, polluants rencontrés, en quelle concentration ?) .....
.....
.....
.....

Dans quel contexte êtes-vous ?

☐ Je suis exploitant d'une ICPE qui a mis en place une surveillance suite à une pollution ancienne,
☐ Je suis exploitant d'une ICPE, je viens juste de détecter une pollution au niveau de mon réseau de piézomètres,
☐ Je suis un aménageur, promoteur. Je dois dépolluer mon terrain avant redéploiement.

L'étude de faisabilité à t'elle suffit à statuer quant à la faisabilité de l'AN ? Pour quelles raisons ? Que faut-il faire de plus ? .....
.....
.....
.....

De nouveaux piézo – piézaires, sondages ont-ils été faits ? .....
.....
.....

Suite à ses investigations complémentaires : **(Lister ici tout ce qui a pu être établi. Exemple : approfondissement du sens d'écoulement, étude de la dynamique du panache, quantification du mécanisme d'atténuation naturelle, modélisation de la dégradation, réalisation du modèle prédictif de l'atténuation naturelle….)** :

- .....
- .....
- .....

Illustration ?

- .....
- .....

.....

- .....

.....

- .....

.....

- .....

La synthèse de cette étude de faisabilité est placée dans le tableau suivant.

Critères	Facteurs techniques, praticabilité et contraintes économiques	Faisabilité élevée	Faisabilité intermédiaire	Faisabilité faible
Source de pollution des eaux souterraines				
Définition du panache				
Etat du panache				
Compatibilité du panache avec les usages				
Hétérogénéité et isotropie de l'aquifère				
Persistance du polluant dans l'environnement				
Potentiel de pollution des produits dérivés				
Données de surveillance				
Conditions biogéochimique sur la base du bilan d'accepteur / donneur d'électrons				
Surveillance dans la zone d'impact				
Objectifs du propriétaire				

Les observations sont-elles favorables à l'atténuation naturelle ? .....
.....

Recommandations pour la suite ? Si l'atténuation naturelle a été appliquée : les prévisions ont-elles été respectées ? En combien de temps des concentrations acceptables ont été retrouvées ?.....
.....
.....