



Programme R&D MACAOH (2001-2006)

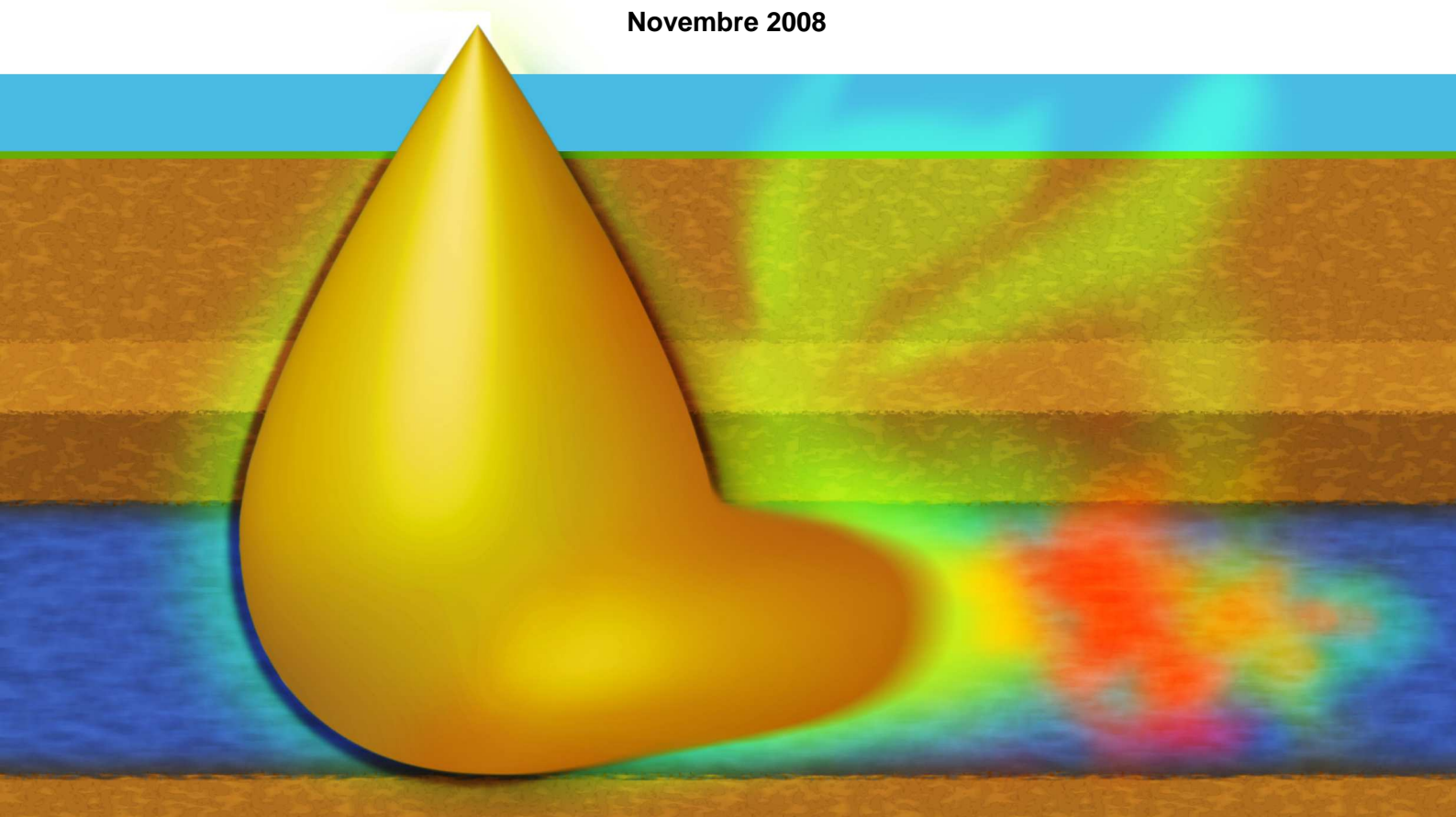
(Modélisation, Atténuation, Caractérisation dans les Aquifères des composés Organo-Halogénés)

ATTÉNUATION NATURELLE DES COMPOSÉS ORGANO-CHLORÉS ALIPHATIQUES DANS LES AQUIFÈRES

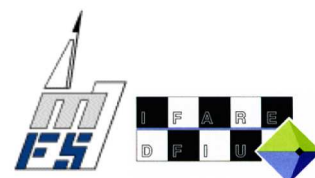
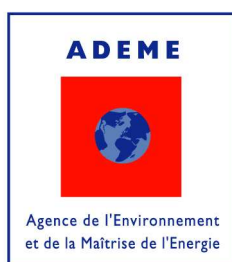
GUIDE MÉTHODOLOGIQUE

Résumé

Novembre 2008



CONNAÎTRE POUR AGIR



Remerciements :

Le présent document a été élaboré par :

Jean-Marie CÔME - BURGEAP, Directeur Recherche & Développement,
Coordonnateur du programme MACAOH

Sébastien KASKASSIAN - BURGEAP, Ingénieur de Recherche

Marcel ROPARS - Institut Français du Pétrole, Ingénieur de Recherche

Michel QUINTARD - Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Directeur de
Recherche CNRS, Expert scientifique du programme MACAOH

Timothy M. VOGEL - Université Claude Bernard Lyon I, Professeur

Olivier RAZAKARISOA - Institut de Mécanique des Fluides et des Solides / Institut
Franco-Allemand de Recherche sur l'Environnement, Ingénieur de Recherche

Fabien NEX - BURGEAP, Ingénieur de Recherche

Gerhard SCHÄFER - Institut de Mécanique des Fluides et des Solides / Institut
Franco-Allemand de Recherche sur l'Environnement, Professeur de l'Université Louis
Pasteur à Strasbourg, Directeur de l'IFARE

Frank HAESELER - Institut Français du Pétrole, Chef du département géochimie,
Chef de Projet Sites Pollués

Claude MOUTON - Responsable du projet MACAOH pour l'ADEME, Ingénieur au
Département Sites et Sols Pollués

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer

et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

<http://www.ademe.fr>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droits ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (Art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (Art. L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

SOMMAIRE

1.	ENJEUX ET OBJECTIFS DU PROJET R&D MACAOH	3
2.	L'ATTENUATION NATURELLE ET L'ATTENUATION NATURELLE SOUS SURVEILLANCE : DEUX CONCEPTS CLES	5
3.	LES MECANISMES D'ATTENUATION NATURELLE A PRENDRE EN COMPTE.....	7
4.	LA METHODOLOGIE MACAOH D'EVALUATION DE LA FAISABILITE DE L'ATTENUATION NATURELLE SOUS SURVEILLANCE	10
5.	L'EVALUATION QUALITATIVE DE LA BIODEGRADATION (ETAPE 2).....	12
6.	L'EVALUATION QUANTITATIVE DES MECANISMES D'ATTENUATION NATURELLE (ETAPE 3)	15
6.1	<i>Dans la zone source</i>	15
6.2	<i>Dans le panache de composés dissous</i>	16
6.3	<i>Exemple d'application (panache de composés dissous)</i>	16
7.	LA MISE EN ŒUVRE DE L'ATTENUATION NATURELLE SOUS SURVEILLANCE : LE CAHIER DES CHARGES DE LA SURVEILLANCE A LONG TERME DES EAUX SOUTERRAINES (ETAPE 5)	17
7.1	<i>Réseau de points de mesure</i>	18
7.2	<i>Paramètres à mesurer et fréquence des campagnes de mesure</i>	18
7.3	<i>Phase I : suivi à court terme</i>	18
7.4	<i>Phase II : suivi à long terme</i>	19
7.5	<i>Interprétation des données</i>	19
8.	L'ACQUISITION ET L'INTERPRETATION DES DONNEES : QUELQUES POINTS D'ATTENTION	20
8.1	<i>Acquisition des données</i>	20
8.2	<i>Interprétation des données</i>	21
9.	BIBLIOGRAPHIE	22

Les 3 guides méthodologiques MACAOH en version française ainsi que les résumés en langue française et anglaise sont téléchargeables sur le site de l'ADEME

Caractérisation dans les aquifères d'une zone source constituée d'organo-chlorés aliphatiques, Guide méthodologique ADEME, Programme R&D MACAOH, 137 p.

<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=51385&p1=00&p2=11&ref=17597>

Atténuation naturelle des composés organo-chlorés aliphatiques dans les aquifères, Guide méthodologique ADEME, Programme R&D MACAOH, 214 p.

<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=51390&p1=00&p2=11&ref=17597>

Modélisation du devenir des composés organo-chlorés aliphatiques dans les aquifères, Guide méthodologique ADEME, Programme R&D MACAOH, 182 p.

<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=51391&p1=00&p2=11&ref=17597>

Ce document est un résumé du guide méthodologique MACAOH/« Atténuation Naturelle des organo-chlorés aliphatiques dans les aquifères ». Après une présentation des enjeux et objectifs du projet R&D MACAOH, il aborde 7 points clés présentant l'essentiel des concepts et spécificités de ce guide vis-à-vis des guides existants concernant l'Atténuation Naturelle :

- deux concepts clés : l'Atténuation Naturelle (AN) et l'Atténuation Naturelle sous Surveillance (ANS)
- les mécanismes d'Atténuation Naturelle à prendre en compte
- la méthodologie MACAOH d'évaluation de la faisabilité de l'Atténuation Naturelle sous Surveillance
- l'évaluation qualitative de la biodégradation
- l'évaluation quantitative des mécanismes d'Atténuation Naturelle
- la mise en œuvre de l'Atténuation Naturelle sous Surveillance : le cahier des charges de la surveillance à long terme des eaux souterraines
- l'acquisition des données nécessaires et leur interprétation.

1. Enjeux et objectifs du projet R&D MACAOH

Depuis les années 1950, les cas de pollution de sites par des composés organo-halogénés se sont multipliés dans les pays industrialisés. Parmi ces composés, la famille la plus souvent rencontrée est celle des **composés organo-chlorés aliphatiques** (chlorométhanes, chloroéthanes, chloroéthènes). Ces composés correspondent à des liquides non miscibles dans l'eau et plus denses que l'eau (à l'exception du chlorure de vinyle, du chlorométhane et du chloroéthane). Ainsi, lors d'un déversement d'organo-chlorés aliphatiques sur le sol, les mécanismes de propagation peuvent être décrits en deux processus distincts et successifs (Figure 1) :

- une infiltration gravitaire de la **phase organique** (liquide constitué par un ou plusieurs composés organo-chlorés aliphatiques) dans le sol, laissant derrière elle une zone à **saturation résiduelle**. Cela conduit au sein du milieu poreux à une **zone source** de dimension limitée par rapport aux dimensions caractéristiques de l'aquifère ;
- le développement d'un **panache de composés dissous** dans l'eau de nappe par dissolution des composés présents dans la zone source et le développement d'un **panache de composés gazeux** dans l'air de la zone non saturée par volatilisation des polluants présents dans la zone source et/ou présents dans l'eau de nappe. Du fait de la lenteur des transferts par dissolution et volatilisation, la disparition de la zone source est un mécanisme très long (plusieurs années voire plusieurs dizaines d'années) en regard de la mise en place de la zone source (quelques jours à quelques semaines dans un milieu sableux).

La prévision du comportement des organo-chlorés dans les aquifères se heurte à une triple difficulté : la caractérisation de la zone source (localisation de la zone source, estimation du volume de phase organique et détermination de la composition de cette phase organique), l'évaluation qualitative et quantitative du potentiel d'atténuation naturelle (à la fois dans la zone source et les panaches dissous/gazeux) et la modélisation (quels modèles physiques, quels outils, quelles méthodologies, ...).

A partir de ces constats, l'ADEME a engagé un projet de Recherche & Développement sur le comportement et le devenir des composés organo-chlorés aliphatiques dans les aquifères. Dénommé MACAOH (Modélisation, Atténuation, Caractérisation dans les Aquifères des Organo-Halogénés), ce programme a été réalisé par un groupement composé d'un bureau d'études, BURGEAP, et de trois organismes de recherche, l'IFP (Institut Français du Pétrole), l'IMFS/IFARE (Institut de Mécanique des Fluides et des Solides de Strasbourg / Institut Franco-Allemand de Recherche sur l'Environnement) et l'IMFT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse). Réalisé sur 5 ans (2001-2006), il est structuré autour des trois thèmes précités et

comprend des expérimentations en laboratoire (batch, colonne), sur pilote (bassin SCERES)¹ et sur deux sites industriels, ainsi que des travaux de modélisation (en particulier des tests de performance des outils de calcul dans le cadre d'un programme d'inter-comparaison associant les partenaires de MACAOH et 8 équipes de modélisateurs).

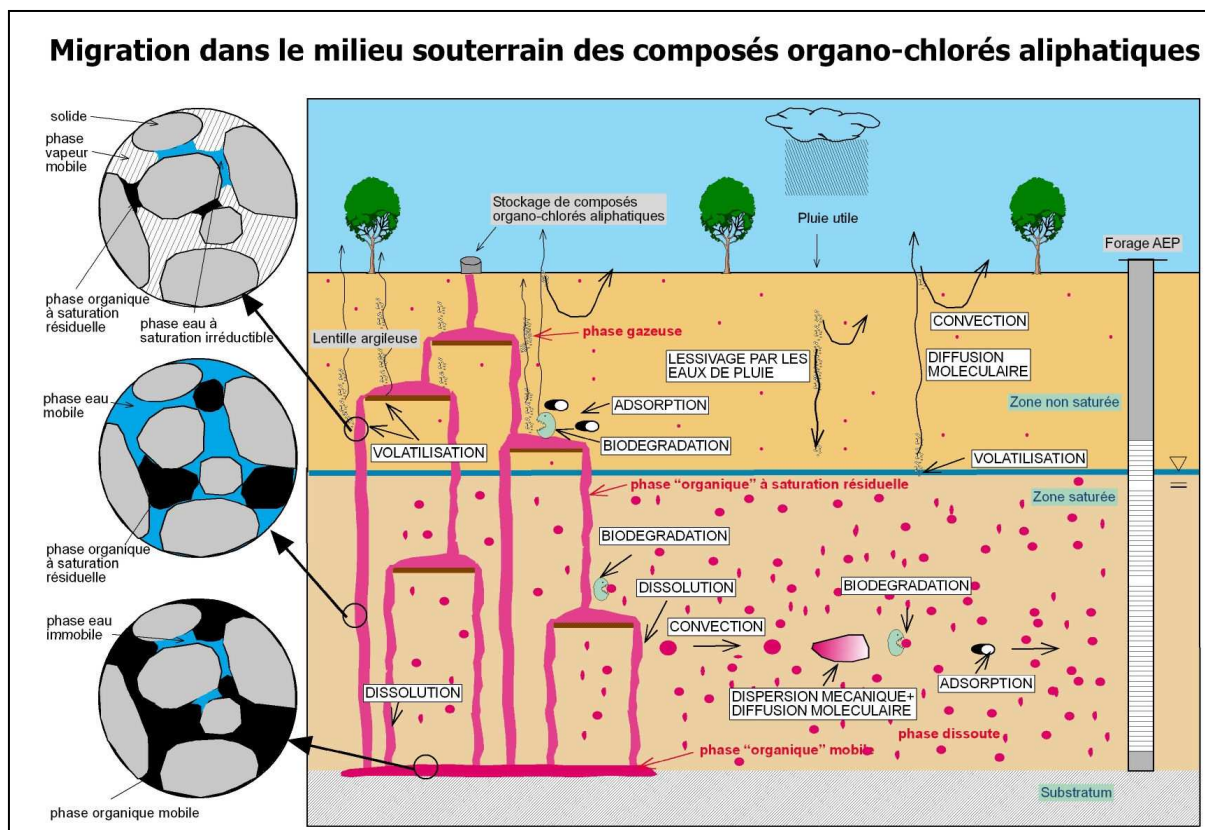


Figure 1 – Mécanismes en jeu dans le devenir d'une pollution de type organo-chlorés aliphatiques dans le milieu souterrain

Les objectifs visés étaient, d'une part, de contribuer à combler des lacunes en matière de compréhension et de connaissances appliquées et, d'autre part, d'élaborer **trois guides méthodologiques** relatifs aux thèmes « **Caractérisation d'une zone source** », « **Atténuation naturelle** » et « **Modélisation** ». Ces guides, téléchargeables sur le site de l'ADEME, sont également référencés parmi les outils techniques de gestion des sites pollués du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire². Les guides méthodologiques MACAOH contiennent à la fois une description des concepts clés, des méthodologies et des protocoles, et des exemples d'application. Ils sont destinés aux prestataires (bureaux d'études, organismes de recherche, etc.) et aux donneurs d'ordre (industriels, aménageurs, collectivités, institutionnels, etc.).

¹ Site Contrôlé Expérimental de Recherche pour la réhabilitation des Eaux et des Sols, situé à l'IFARE à Strasbourg (bassin enterré et instrumenté de dimensions 25 m x 12 m x 3 m reconstituant un aquifère alluvial).

² <http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr/OutilsMethodologiquesMO.html>

2. L'Atténuation Naturelle et L'Atténuation Naturelle sous Surveillance : deux concepts clés

Les concepts d'« Atténuation Naturelle » (AN) et d'« Atténuation Naturelle sous Surveillance » (ANS) revêtent un contenu différent selon les Etats. A l'heure actuelle, la France n'a pas énoncé officiellement de définition concernant ces concepts. Les principaux travaux de recherche concernant l'Atténuation Naturelle des composés organiques dans les aquifères ont été menés aux Etats-Unis. Le document réglementaire de référence en usage est la **Directive OSWER³ n°9200.4-17P de 1999** [5], qui précise en particulier les concepts d'Atténuation Naturelle et d'Atténuation Naturelle sous Surveillance.

Atténuation Naturelle (AN)

L'Atténuation Naturelle englobe une variété de mécanismes physiques, chimiques ou biologiques qui, sous des conditions favorables, réduisent sans intervention humaine la masse, la toxicité, la mobilité, le volume ou la concentration des polluants dans les sols ou les eaux souterraines. Ces mécanismes in situ comprennent la biodégradation, la dispersion, la dilution, la sorption, la volatilisation, ainsi que la stabilisation, la transformation ou la destruction des polluants par voie chimique ou biologique.

Atténuation Naturelle sous Surveillance (ANS), proposition de traduction française du terme anglophone de « *Monitored Natural Attenuation* » (MNA).

Le terme « Atténuation Naturelle sous Surveillance » traduit la capacité des mécanismes d'Atténuation Naturelle (dans le contexte d'une approche de réhabilitation « attentivement » contrôlée et suivie) à atteindre les objectifs de réhabilitation spécifiques du site dans un délai considéré comme raisonnable comparé à ceux des méthodes « actives ».

Dans cette Directive, l'USEPA reconnaît que l'Atténuation Naturelle sous Surveillance est une **méthode de dépollution** qui peut être appropriée sur certains sites. Cette méthode n'est cependant pas synonyme de « *no action* », c'est une **méthode dite « passive »** qui exige des études préalables approfondies pour évaluer la capacité des mécanismes d'Atténuation Naturelle à atteindre les objectifs de dépollution dans le délai fixé. Au terme de ces études, la mise en œuvre de cette méthode se traduit par une **surveillance à long terme du site** pour vérifier l'adéquation des données mesurées aux prévisions. Un critère important pour l'acceptation de l'ANS concerne la **durée maximale octroyée à l'Atténuation Naturelle pour atteindre les objectifs de dépollution**. Cette durée maximale n'est pas fixée par la Directive, elle est à discuter pour chaque site dans l'étape de comparaison de l'ANS avec des techniques « actives ». En pratique, elle est généralement fixée à environ 30 ans.

Compte tenu des incertitudes liées à la capacité de l'ANS à atteindre des objectifs de dépollution, l'USEPA souhaite que le contrôle de la zone source et la surveillance à long terme soient les deux composantes fondamentales de toute démarche ANS.

Les mécanismes d'Atténuation Naturelle cités dans la Directive OSWER sont généralement présents sur un site pollué. Leur mise en évidence qualitative constitue une première étape de la démarche, mais elle n'est pas suffisante pour prouver l'efficacité des mécanismes pour atteindre les objectifs de dépollution dans le délai fixé. Dans la Directive, l'évaluation de cette efficacité nécessite 6 étapes :

1. une caractérisation détaillée 3D du site
2. l'élaboration d'un schéma conceptuel
3. une estimation des cinétiques d'atténuation de la pollution
4. une évaluation des risques pour la santé et l'environnement
5. une prévision du temps nécessaire à l'atteinte des objectifs de dépollution
6. la comparaison de l'ANS avec d'autres solutions de dépollution.

³ Office of Solid Waste and Emergency Response (l'USEPA est constituée d'une quinzaine de Directions, dont l'OSWER). La première version de la Directive a été publiée en 1997.

Parmi les mécanismes précités, la Directive OSWER indique **qu'elle préfère ceux qui détruisent ou dégradent les polluants**, ce qui exige de faire la part entre les mécanismes destructifs et les mécanismes non destructifs.

En Europe, les quelques définitions disponibles de l'Atténuation Naturelle sont voisines de celles de la Directive OSWER (voir en particulier les guides de l'Angleterre/Pays de Galles (Environment Agency, 2000 [1]) et des Pays-Bas (NOBIS, 2001 [3])). Par contre, les traductions du concept d'Atténuation Naturelle sous Surveillance diffèrent parfois de la définition américaine.

L'approche retenue pour MACAOH est fondée sur les définitions de l'OSWER. Elle s'en distingue cependant par les mécanismes d'Atténuation Naturelle pris en compte : en plus de la liste de l'OSWER, sont pris en compte les transferts phase organique/eau (dissolution) et phase organique/gaz (volatilisation).

Le document méthodologique de référence considéré par la plupart des acteurs (et également par le consortium MACAOH) est le **protocole de l'USEPA de 1998 « Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water, EPA/600/R-98/128 »** [4]. Le protocole américain bénéficie d'une abondante documentation technique associée, en particulier le rapport de 2004 « **Performance Monitoring of MNA Remedies for VOCs in Ground Water, EPA/600/R-04/027** » qui précise le contenu de la surveillance à long terme, alors que le protocole de 1998 porte davantage sur les études préalables à la mise en œuvre de l'ANS.

Concernant les retours d'expérience de mise en œuvre de l'ANS sur des sites pollués par des organo-chlorés, il convient de citer Newell et al. (2004), qui ont synthétisé l'application de l'ANS sur environ 200 sites, les données de cette large enquête étant également commentées dans un rapport de la WSRC (2004) [7].

Les auteurs ont montré que dans 77% des cas, l'ANS était mise en œuvre seule ou combinée à des techniques actives (Figure 2). Lorsqu'elle est retenue, l'ANS est appliquée comme seule technique de dépollution sur seulement 30% des sites. Elle est associée à un traitement de la zone source dans 42% des cas et à un traitement du panache dans 13% des cas.

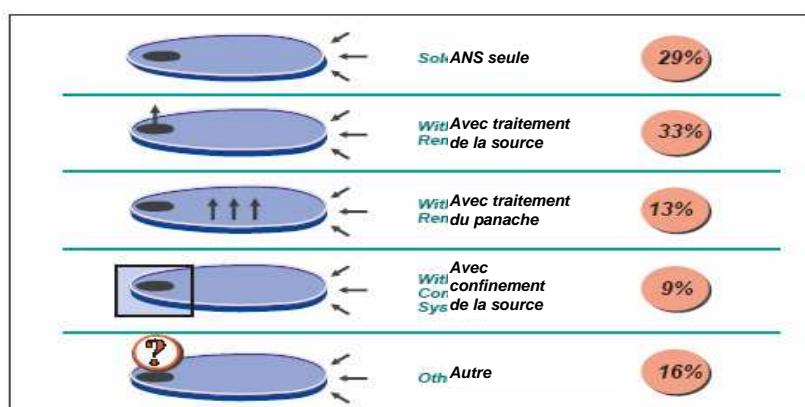


Figure 2 – L'ANS utilisée comme technique de dépollution (d'après WSRC, 2004)

3. Les mécanismes d'Atténuation Naturelle à prendre en compte

Les mécanismes d'Atténuation Naturelle en jeu peuvent être classés en mécanismes non destructifs (qui ne détruisent pas le polluant mais le transfèrent de compartiment ou atténuent sa concentration dans un compartiment) et destructifs (qui détruisent le polluant par réaction chimique ou biologique).

De façon plus détaillée, ces mécanismes peuvent être rangés en quatre catégories :

- des mécanismes non destructifs ne modifiant pas la masse des polluants dans un compartiment (par exemple l'eau souterraine ou la phase gaz) : il s'agit de la **convection, la dispersion, la diffusion moléculaire**. La convection, qui est le « moteur du transport » des composés dissous dans l'eau souterraine, n'engendre cependant pas à lui seul une réduction de la concentration ;
- des mécanismes non destructifs modifiant la masse des polluants dans un compartiment : il s'agit de l'ensemble des mécanismes de transferts entre phases : **dissolution, volatilisation (transfert phase organique/gaz et eau/gaz) et adsorption** ;
- des mécanismes destructifs : il s'agit essentiellement de la **biodégradation** et marginalement de la **dégradation chimique** (en particulier pour le 1, 1,1 TCA) ;
- des phénomènes (non destructifs) regroupés dans le terme « **dilution** ». Ce terme ne correspond pas à un mécanisme tel que ceux décrits précédemment. De façon générale, ce terme décrit le mélange d'une masse d'eau polluée avec une masse d'eau non polluée sous l'action de divers phénomènes (recharge par la pluie, pompage, ...).

Un autre classement de ces mécanismes peut se faire par compartiment (Figure 3) :

- **l'atténuation de la zone source** : les mécanismes principaux sont les échanges phase organique/eau (dissolution) et phase organique/gaz (volatilisation) ainsi que la biodégradation dans certaines situations. Ces mécanismes génèrent deux panaches (composés dissous et gazeux) interagissant l'un avec l'autre ;
- **l'atténuation du panache de composés dissous** par différents mécanismes : convection, dispersion (et éventuellement diffusion), adsorption, volatilisation, dégradation abiotique et biotique, « dilution » ;
- **l'atténuation du panache de composés gazeux** par différents mécanismes : diffusion (et éventuellement convection), dispersion, adsorption, dégradation abiotique et biotique (eau capillaire de la ZNS), « dilution » (en particulier dissolution des vapeurs par la pluie).

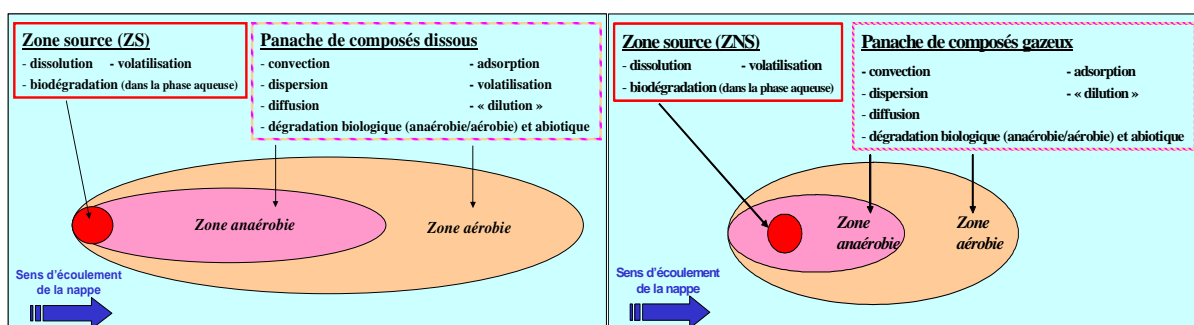


Figure 3 - Mécanismes d'Atténuation Naturelle dans la zone source et le panache de composés dissous dans la nappe (à gauche), dans la zone source et le panache de composés gazeux dans la zone non saturée (à droite)

En termes de mécanismes, la spécificité principale de l'approche MACAOH est la prise en compte explicite de la **zone source**, c'est-à-dire de la portion de sols (en zone non saturée et/ou en zone saturée) contenant de la **phase organique**, ainsi que les mécanismes

d'atténuation qui lui sont associés (dissolution et volatilisation). Ce choix est motivé par deux constats :

- en termes de bilan de masse, la phase organique représente généralement l'essentiel du stock de polluant (Figure 4) ;
- le niveau de concentration en polluant et son évolution à terme dans le panache dissous et gazeux sont largement déterminés par la composition de la phase organique et les mécanismes d'échanges entre la phase organique et l'eau (dissolution, cf. Figure 4) et entre la phase organique et le gaz (volatilisation).

Ces concepts sont décrits de façon détaillée dans le résumé et le guide MACAOH « Caractérisation des zones source ».

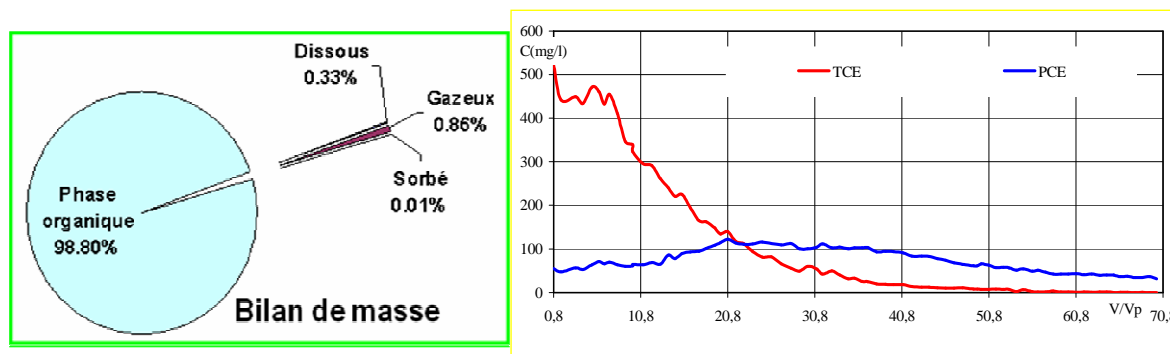


Figure 4 - Répartition du TCE entre les différentes phases (milieu sableux, hypothèse d'équilibre entre les phases, à gauche) – Evolution des concentrations en TCE et PCE dans l'eau en aval d'une zone source constituée par un mélange TCE/PCE (essai en colonne, à droite)

Parmi les autres mécanismes, il est décrit ci-après la biodégradation, compte tenu de son importance majeure dans l'Atténuation Naturelle et de sa double complexité : la biodégradation des organo-chlorés aliphatiques est séquentielle (par exemple, le PCE produit du TCE), et les processus et cinétiques varient en fonction des conditions redox.

La biodégradation

Dans la plupart des cas, la biodégradation des organo-chlorés est une réaction d'oxydo-réduction catalysée par des micro-organismes (en particulier des bactéries), impliquant des donneurs d'électrons et des accepteurs d'électrons. En fonction du composé organo-chloré, de la population bactérienne et des conditions environnementales, le mécanisme actif peut être l'**oxydation** (l'organo-chloré joue le rôle de donneur d'électrons, valable surtout pour les organo-chlorés les moins substitués) ou la **déchloration réductrice** (l'organo-chloré joue le rôle d'accepteur d'électrons, valable surtout pour les organo-chlorés les plus substitués), le métabolisme bactérien pouvant être direct (métabolique) ou cométabolique.

Dans un aquifère pollué par des organo-chlorés, les conditions redox sont modifiées le long du panache. En théorie, la zone proche de la zone source est une zone méthanogène, suivie par une zone sulfato-réductrice, une zone de réduction du fer, une zone de réduction des nitrates, et, enfin, une zone aérobie. Dans chacune de ces zones, les cinétiques de dégradation des polluants sont généralement très différentes.

Les donneurs d'électrons typiques (espèces chimiques qui subissent des réactions d'oxydation en produisant des électrons et d'autres produits tels que par exemple le CO₂) sont principalement les hydrocarbures pétroliers, l'acétate, le méthanol, les acides humiques et les organo-chlorés les moins substitués (DCE, CV pour les chloroéthènes).

Il est possible de schématiser les différents mécanismes dominants de biodégradation en fonction des zones redox (Figure 5) :

- la déchloration réductrice, dans les zones propices aux bactéries méthanogènes et sulfato-réductrices (déchloration réductrice efficace des chloroéthènes, production des intermédiaires métaboliques chlorés ou totalement déchlorés comme l'éthène et l'éthane) ;

- l'oxydation anaérobie, en conditions permettant la réduction des nitrates, du fer, voire même des sulfates. Ce mécanisme très mineur concerne les monochlorés et peut être les dichlorés comme le cis-1,2-DCE ;
- l'oxydation aérobie, oxydation directe pour le CV, voire les DCE, oxydation directe efficace pour le DCM et le 1,2-DCA. S'il y a présence d'oxygène dissous et de substrats de croissance (méthane, toluène, phénol, ...), oxydation par cométabolisme des CV, DCE et TCE et autres organo-chlorés non totalement substitués (mécanisme certainement mineur).

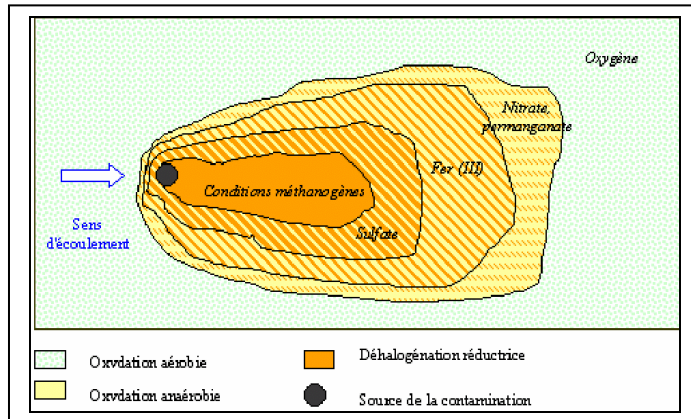
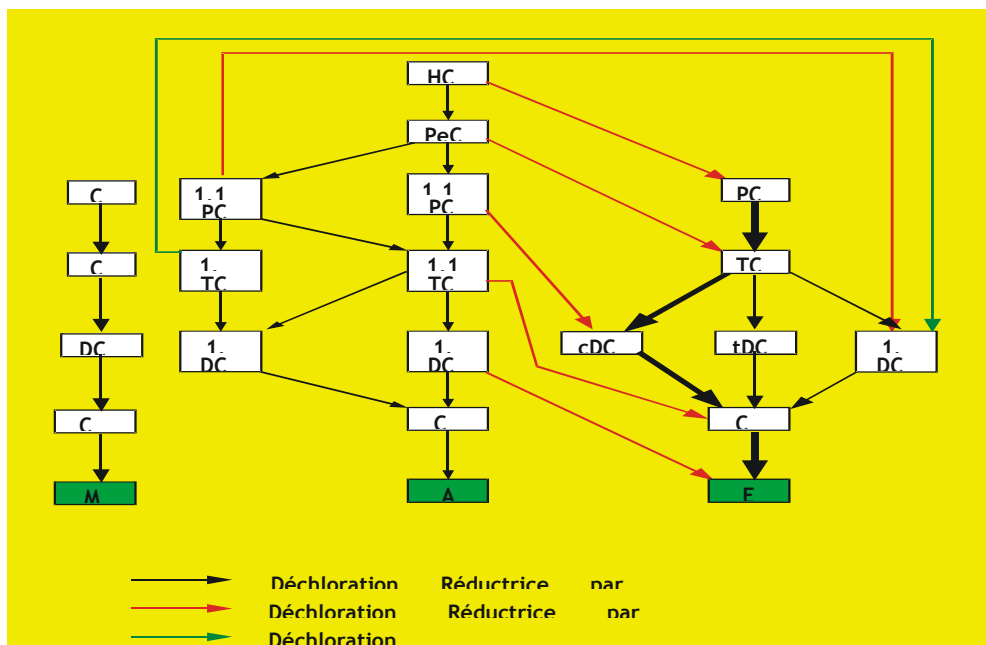


Figure 5 - Répartition des accepteurs d'électrons et des principaux mécanismes de biodégradation des organo-chlorés aliphatiques dans une nappe polluée par une matière organique accessible

La Figure 6 présente les déchloration séquentielles pour les trois familles d'organo-chlorés aliphatiques et les connexions possibles entre les chloroéthènes, chloroéthanes et chlorométhane.



(CT Tétrachlorométhane, CF Trichlorométhane, DCM Dichlorométhane, CM Chlorométhane, M Méthane, HCA Hexachloroéthane, PeCA Pentachloroéthane, 1112-PCA 1,1,1,2-tétrachloroéthane, 1122-PCA 1,1,2,2-tétrachloroéthane, 111-TCA 1,1,1-trichloroéthane, 112-TCA 1,1,2-trichloroéthane, 11-DCA 1,1-dichloroéthane, 12-DCA 1,2-dichloroéthane, CA Chloroéthane, A Ethane, PCE Tétrachloroéthène, TCE Trichloroéthène, 11-DCE 1,1-dichloroéthène, c-DCE Cis-1,2-dichloroéthène, t-DCE Trans-1,2-dichloroéthène, CV Chlorure de vinyle, E Ethène)

Figure 6 - Dégradation des composés organo-chlorés aliphatiques par voie biologique et abiotique

4. La méthodologie MACAOH d'évaluation de la faisabilité de l'Atténuation Naturelle sous Surveillance

La méthodologie MACAOH s'est appuyée sur des travaux en laboratoire, sur le bassin SCERES et sur deux sites industriels, ainsi que sur le guide de l'USEPA de 1998 [4]. Il s'en distingue cependant sur 4 aspects :

- **la prise en compte de façon couplée de la zone source, du panache dissous et du panache gazeux**, ce qui se traduit en termes de mécanismes par la prise en compte de la dissolution et de la volatilisation à partir de la phase organique ;
- **la non prise en compte d'une méthode des « scores »** pour l'évaluation qualitative de la biodégradation, méthode jugée trop réductrice de la complexité d'un site (USEPA [4], NOBIS [3]) ;
- **l'estimation quantitative des mécanismes en jeu** : pour chacun des trois compartiments (zone source et panaches), une méthode analytique de type bilan de masse a été élaborée pour quantifier les flux associés aux différents mécanismes ;
- **la prévision des saturations en phase organique et des concentrations aqueuses et gazeuses** : des propositions méthodologiques sont formulées pour les travaux de modélisation, en particulier pour les approches polyphasiques prenant en compte la phase organique, sans laquelle il n'est formellement pas possible de rendre compte de la diminution des concentrations dans le temps en limite amont du panache de composés dissous ou gazeux.

La méthodologie proposée pour évaluer la faisabilité de l'Atténuation Naturelle sous Surveillance comprend quatre étapes successives (Figure 7):

- **étape 1** : analyse préliminaire des données, en particulier pour préciser la structure spatiale et l'évolution de la pollution en fonction des cibles identifiées ;
- **étape 2** : évaluation qualitative de la biodégradation dans les panaches de composés dissous et gazeux ;
- **étape 3** : évaluation quantitative des mécanismes d'Atténuation Naturelle dans la zone source et les panaches, sur la base de bilans de masse ;
- **étape 4** : prévision de l'évolution des saturations en phase organique (zone source) et des concentrations dans les panaches dissous et gazeux. Le Guide MACAOH « Modélisation » propose un certain nombre de recommandations concernant le choix des outils de calcul, les données nécessaires, la mise en œuvre des codes numériques ainsi que les informations à restituer dans le rapport d'étude.

Au terme de ces quatre étapes, les acteurs de la gestion du site pollué (prestataire, donneur d'ordre, administrations) doivent décider si l'ANS peut être retenue comme solution de dépollution, seule ou en complément d'une technique « active ». Un bilan coût/avantages est réalisé pour chaque solution de réhabilitation (seule ou combinée avec une autre technique) en tenant compte des contraintes techniques, réglementaires, de protection de la santé et de l'environnement (évaluation des risques) ainsi que de l'impact social (riverains, ...). Dans l'hypothèse d'une acceptation de l'ANS, la surveillance du site est alors mise en œuvre jusqu'à atteinte des objectifs de dépollution (**étape 5**).

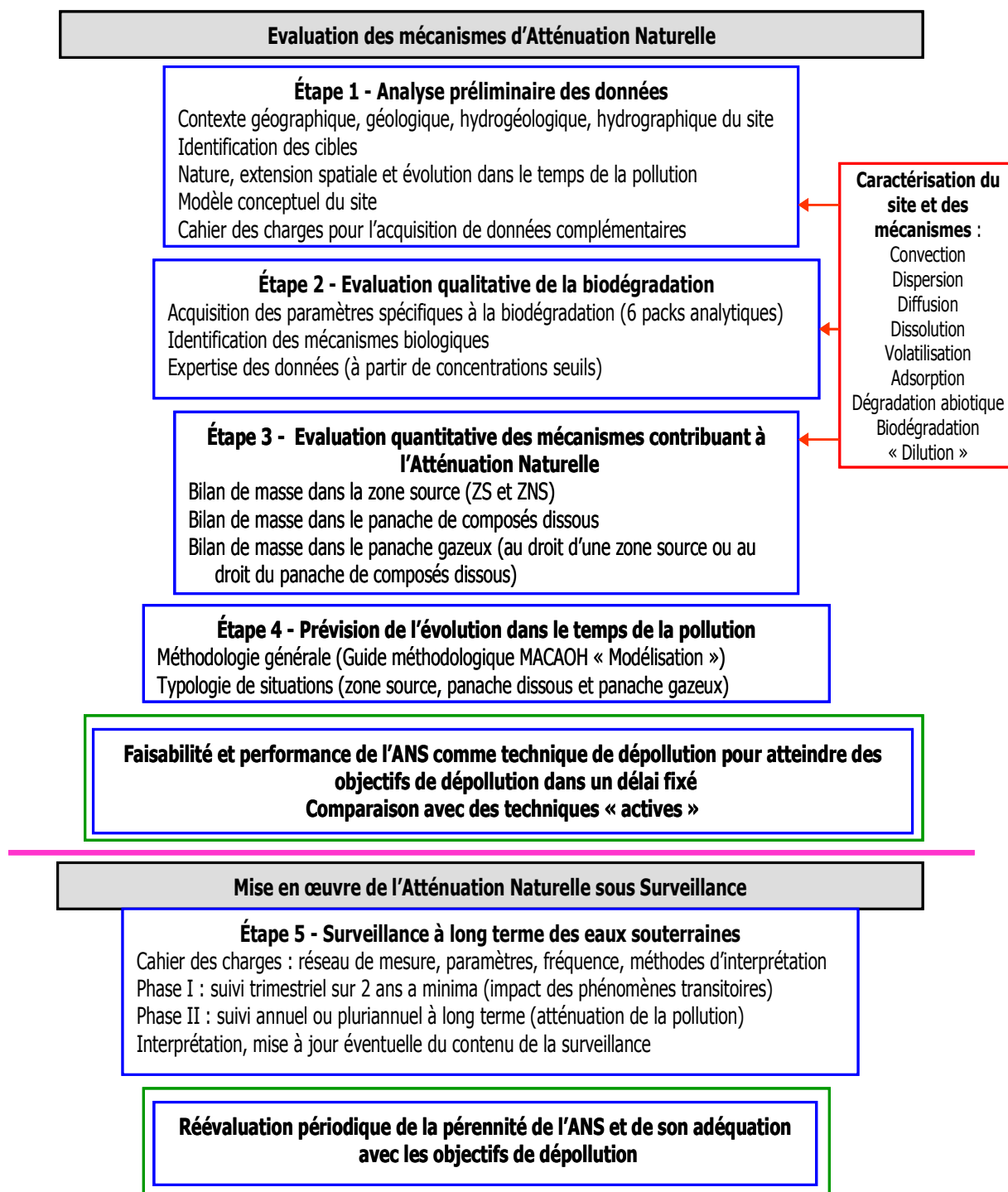


Figure 7 - Logigramme méthodologique pour l'évaluation de l'AN et la mise en œuvre de l'ANS (en bleu : étapes réalisées par le prestataire (bureau d'études, ...), en vert : étapes réalisées par le donneur d'ordre et l'administration)

5. L'évaluation qualitative de la biodégradation (étape 2)

L'objectif de l'étape 2 de la méthodologie est de préciser si la biodégradation des organo-chlorés aliphatiques est active.

La méthode consiste à mesurer une liste de paramètres organisée sous forme de packs analytiques (Tableau 1) dans **au moins 7 piézomètres** (1 en amont de la zone source, 2 dans la zone source et 4 dans le panache de composés dissous, sur deux sections d'écoulement différentes). Les paramètres recherchés ont pour objectif de caractériser les organo-chlorés aliphatiques et les produits de leur dégradation, les conditions redox dominantes de la nappe, les sources de carbone et les conditions géochimiques de l'aquifère.

L'évaluation, focalisée sur la déchloration réductrice des chloroéthènes, est conduite sous forme d'**expertise sur les données**, en s'appuyant notamment sur le calcul d'un « taux de déchloration » et sur la comparaison de la concentration de chaque paramètre à une **valeur seuil proposée** (Tableau 2).

Pack analytique	Objectif
Pack "Volatils" : organo-chlorés et hydrocarbures pétroliers	Chloroéthènes, chloréthanés, chlorométhanés, BTEX et dérivés
Pack "Anions"	Chlorures
	Nitrates
	Sulfates
Pack "M-E-E"	Méthane, éthène et éthane
Pack "COD-NPOC"	Carbone Organique Dissous (sans prise en compte des COV, mesurés au moyen du Pack "Volatils")
Pack "Electrochimie" (mesure sur site)	Oxygène dissous (mg/L)
	pH
	Potentiel d'oxydo-réduction (mV)
	Température (°C)
	Conductivité (µS/cm)
Pack "Colorimétrie" (mesure sur site)	Alcalinité (mg/L de CaCO ₃)
	Fer ferreux (mg/L)

Tableau 1 - Description des « packs analytiques » nécessaires à l'évaluation qualitative de la biodégradation des organo-chlorés dans les nappes

Exemple d'application

Le site considéré est un site industriel en activité sis sur un aquifère constitué d'alluvions sableuses sur une épaisseur moyenne de 5 à 7 m reposant sur un substratum marneux. Le niveau de la nappe se situe à environ 2 m de profondeur. La conductivité hydraulique moyenne de l'aquifère est de $3 \cdot 10^{-4}$ m/s et la vitesse interstitielle moyenne de la nappe environ 1 m/j. La nappe est exploitée en aval du site par des particuliers pour l'arrosage de jardins privés et l'abreuvement d'animaux (puits les plus proches situés à 300 m en aval de la zone source).

La pollution en organo-chlorés est ancienne (environ 30 ans, débordements d'une cuve située dans une cave en sous-sol des ateliers). L'extension latérale de la zone source principale est de 25 m² environ (Figure 8). De la phase organique, constituée d'un mélange PCE/TCE (environ 60/40 en fraction molaire), a été identifiée au contact alluvions/marnes (concentration totale maximale de l'ordre de 60 g/kg de MS). Le panache d'organo-chlorés dissous issu de la source principale s'étend longitudinalement sur 650 m avec un exutoire constitué par un cours d'eau, et présente une largeur importante, environ 300 m à proximité de la rivière.

Les données concernant l'évaluation qualitative de la biodégradation sont présentées Tableau 22, et commentées au moyen des valeurs seuils préconisées.

Comment se caractérise la pollution organo-chlorée dans la zone la plus polluée ?

Le TCE est le principal organo-chloré du site en phase aqueuse (PzA9 et PzA11), même si le principal polluant sous forme de phase organique est le PCE. La concentration aqueuse « initiale » en PCE ne peut être mesurée, car la déchloration réductrice est particulièrement efficace et ce dès la zone source. La déchloration réductrice aboutit rapidement à une production élevée de tous les intermédiaires métaboliques et en particulier de cis-DCE (PzA11). Le cis-DCE ne constitue apparemment pas en zone source un goulot d'étranglement car les productions de CV et d'éthène sont importantes. Les taux de déchloration calculés sont donc assez élevés : respectivement 24 et 53% pour PzA9 et PzA11. Ces valeurs sont une moyenne des taux de déchloration du PCE et du TCE.

Il convient d'insister sur les productions très importantes d'éthène et d'éthane (PzA11, 1100 µg/L d'éthène) qui traduisent une déchloration réductrice efficace et aboutie.

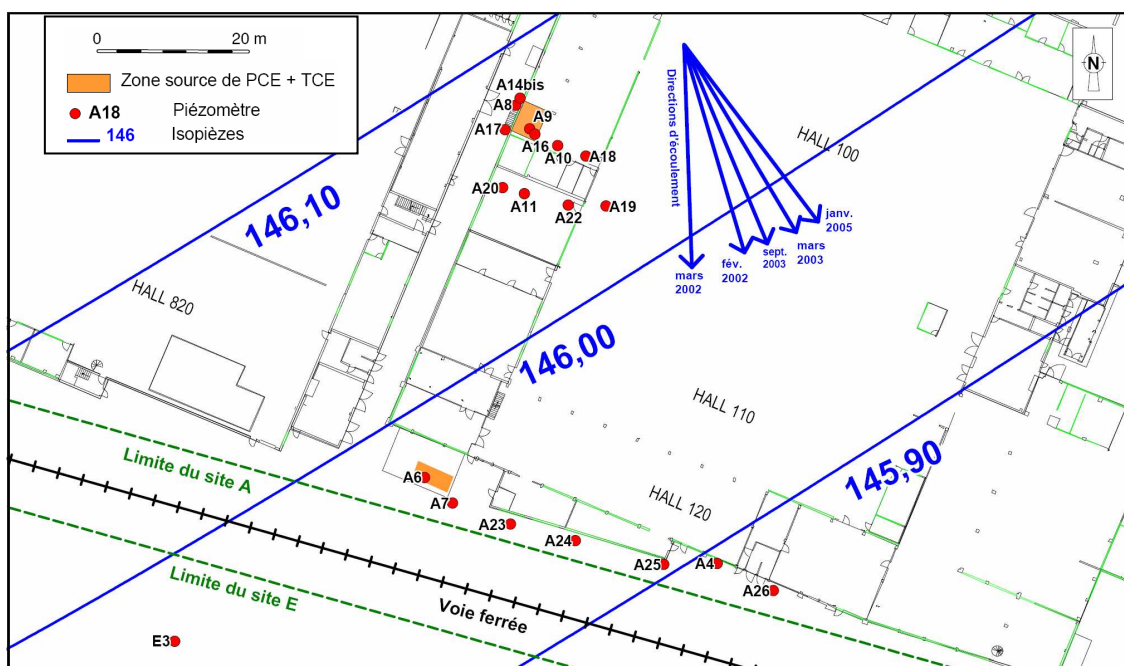


Figure 8 - Contexte local et piézométrie au droit du site en Janvier 2005 - Site A de MACAOH

Pourquoi cette déchloration réductrice biologique est-elle efficace ?

Elle est efficace car les conditions redox sont celles de la méthanogénèse et ceci au droit présumé de la zone source (PzA9). Sur ce piézomètre, la concentration est légèrement inférieure à la valeur seuil, mais les piézomètres situés à l'aval proche de PzA9 (PzA11, puis PzA25) indiquent des productions considérables de méthane (17 à 21 mg/L), confirmées par des POR très négatives (-186 à -265 mV), conditions favorables à la déchloration réductrice.

La réduction des sulfates n'est pas correctement démontrée (concentrations élevées dans la zone la plus fortement polluée). Il est possible que les concentrations très élevées en sulfates nuisent à une déchloration encore plus aboutie (compétition forte entre sulfato-réducteurs et halorespirateurs pour la disponibilité des électrons).

La mesure du fer ferreux (6 à 18 mg/L sur PzA9, PzA11 et PzA25) ne vient que confirmer la réduction du milieu, les nitrates et l'oxygène dissous étant par ailleurs absents ou quasiment absents à l'amont de la zone source. Enfin, l'alcalinité vient confirmer une production importante de CO₂ sur PzA25 (début du panache).

Sur ce site, et principalement dans la zone la plus fortement polluée, un faisceau d'indices particulièrement concordants traduit l'existence d'une dégradation biologique active.

Pourquoi les conditions redox sont-elles si réduites ?

La pollution par les organo-chlorés aliphatiques est accompagnée d'autres pollutions carbonées, dont témoignent les teneurs élevées en carbone organique dissous, lequel constitue le « carburant » des réactions biologiques. Tant que du carbone accessible sera disponible, la méthanogénèse perdurera et la production très élevée d'éthène et d'éthane atteste que les déshalorespirateurs les plus performants (*Dehalococcoides ethenogenes* a par ailleurs été identifié) sont présents et disposent de conditions physico-chimiques adéquates.

Les conditions réduites sont-elles suffisantes pour satisfaire les exigences de protection des cibles ?

Non, car, d'une part, les dimensions de la zone très « réduite » (en terme de redox) sont insuffisantes pour que le temps de séjour des organo-chlorés permette une déchloration réductrice aboutie (éthène et éthane, produits finaux inoffensifs). Par ailleurs, le cis-DCE et surtout le CV atteignent les cibles identifiées. Par ailleurs, la dégradation biologique du TCE, du cis-DCE et du CV dans le panache « éloigné » (au-delà de 400 m de la zone source), en conditions devenues aérobies, se révèle parfaitement inefficace (résultats non présentés).

SITEA		AMONT	ZONESOURCE	PANACHE			
			PzA9	PzA11	PzA25	PzA	PzC
Distance au centre de la zone source (m)		-250	0	10	65	190	470
Paramètres	Seuil	Mesure ou moyenne	Mesure	Mesure	Mesure	Mesure	Mesure
CARACTERISATION DE LA DEGRADATION BIOLOGIQUE DES ORGANO-CHLORES ALIPHATIQUES							
Chloroéthènes et intermédiaires métaboliques (µg/L)	PCE	0	129	537	26	18	114
	TCE	0	22 153	147	71	55	313
	cis-DCE	0	8 734	21 665	265	281	990
	trans-DCE	0	51	59	0	15	0
	11-DCE	0	18	0	0	0	0
	CV	0	172	3 207	96	202	3
	Ethène	0	58	1 026	18	24	0
	Ethane	0	3	84	135	4	27
Taux de déchloration (%)	> 60%				74 (3)		
	de 40 à 60 %			53 (2)		59 (3)	
	de 20 à 40 %		24 (1)				39 (3)
	de 5 à 20 %						
	< 5%						
Ethène + Ethane (µg/L)	20 à 200	0	61	1110	153	28	27
Chlorures (mg/L)	> 2 fois concentration amont (mg/L)	198 et 469	323	237	162	279	174
CARACTERISATION DU REDOX IN SITU							
Méthane (mg/L)	> 1 mg/L	0	0,85	17	21,1	0,66	1,01
Sulfates (mg/L)	< 20 mg/L	55 et 100	95,2	73,2	22,7	128	36
Fer II (mg/L)	> 2 mg/L	1,2	6,3	10,2	18,1	2,08	0,14
Nitrates (mg/L)	< 1 mg/L	2	0	0	0	0	9,3
Oxygène dissous (mg/L)	< 0,5 mg/L	0,2 et 0,8	0,07	0	0,1	0,1	1,29
Potentiel Oxydo réduction (mV)	Eh < + 100 mV	225	2	-54	25	274	298
	POR < -100 mV	11	-212	-265	-186	60	81
Alcalinité (mg/L)	> 2 fois concentration amont (mg/L)	160	200	260	1260	280	260
CARACTERISATION DES SOURCES DE CARBONE							
COD-NPOC (mg/L)	> 10 mg/L	7	10	16	180	4,9	9,5
COV (BTEX + Alkyl-benzènes + naphthalène) (mg/L)	> 2 mg/L	0,001	0	0,036	0,034	0,001	0,005

(1) Moyenne PCE/TCE. Calcul sur le PCE, 35%, calcul sur le TCE, 13%

(2) Moyenne PCE/TCE. Calcul sur le PCE, 60%, calcul sur le TCE, 47%

(3) Moyennes données à titre indicatif, résultats n'ayant aucune pertinence (ne sont pas situés dans la zone la plus polluée, métabolites susceptibles d'avoir été transportés par la nappe et dégradés par oxydation aérobie pour PzC)

Les concentrations « 0 » correspondent à des concentrations inférieures à la limite de quantification

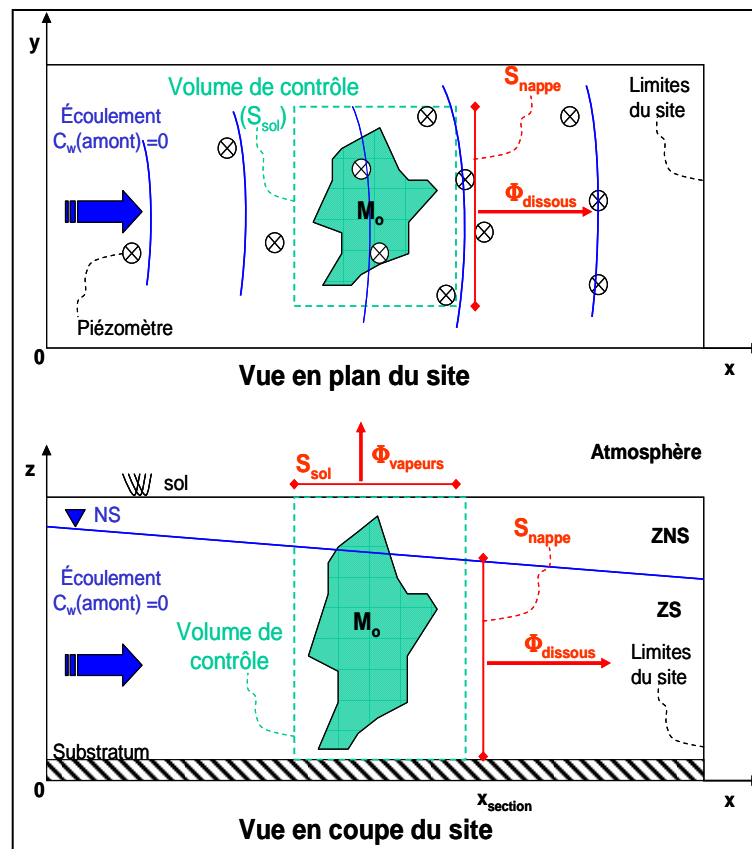
Tableau 2 – Evaluation qualitative de la dégradation biologique, méthodologie MACAOH, site A

6. L'évaluation quantitative des mécanismes d'Atténuation Naturelle (étape 3)

La méthode développée permet de **quantifier au temps t de l'étude la part de chacun des mécanismes** impliqués dans l'Atténuation Naturelle (sachant par exemple que l'Atténuation par « dilution » n'est généralement pas admise) ainsi que **les taux de (bio)dégradation des organo-chlorés dans les panaches**. Les résultats de cette étape clé seront également valorisés pour la schématisation de la modélisation (étape 4).

6.1. Dans la zone source

Dans la zone source, les flux de composés dissous (pour la zone saturée) et gazeux (zone non saturée) sont estimés par une approche analytique à travers des sections représentatives des dimensions de la zone source. Les données nécessaires sont la composition de la phase organique, les concentrations en composés dissous et/ou gazeux ou les flux gazeux à l'interface sol/atmosphère (cf. Figure 9).



C_w : concentration dans la nappe ; M_o : masse de phase organique dans la zone source ; NS : niveau statique de la nappe ;

S_{sol} : section de contrôle à l'interface ZNS/atmosphère ; S_{nappe} : section de contrôle dans la nappe en aval de la source ;
 ZNS : Zone Non Saturée ; ZS : Zone Saturée ; $\Phi_{dissous}$: flux massique de composés dissous dans la nappe issus de la source et transportés par celle-ci ; $\Phi_{vapeurs}$: flux massique de composés gazeux émis par la source vers l'atmosphère

Figure 9- Schématisation du bilan de masse de la zone source

6.2. Dans le panache de composés dissous

Dans le panache de composés dissous, un bilan de flux est calculé entre deux sections d'aquifère délimitées par des isopièzes et représentées par des lignes de piézomètres perpendiculaires à l'écoulement (Figure 10). Le principe consiste à évaluer de manière analytique, entre deux sections du panache, la part des mécanismes de convection, volatilisation et lessivage, puis à déduire la part de la dispersion hydrodynamique, de la « dilution » et de la biodégradation dans la diminution des concentrations. Cette méthode permet également de calculer des taux de biodégradation à partir des seules données acquises sur site.

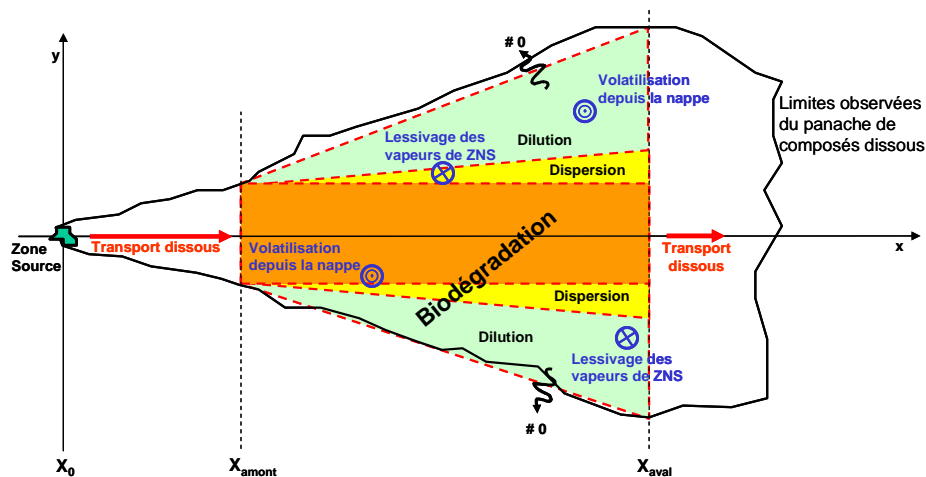


Figure 10 – Principe de l'évaluation quantitative des mécanismes d'atténuation naturelle dans le panache de composés dissous

6.3. Exemple d'application (panache de composés dissous)

L'évaluation qualitative des mécanismes de biodégradation (étape 2) mettant en évidence des conditions méthanogènes de la zone source jusqu'à $x = 120$ m, puis de conditions aérobies jusqu'au cours d'eau, 3 sections perpendiculaires à l'écoulement ont été retenues pour les bilans de masse, respectivement à 8 m (limite aval de la zone source), 120 m et 650 m de la zone source

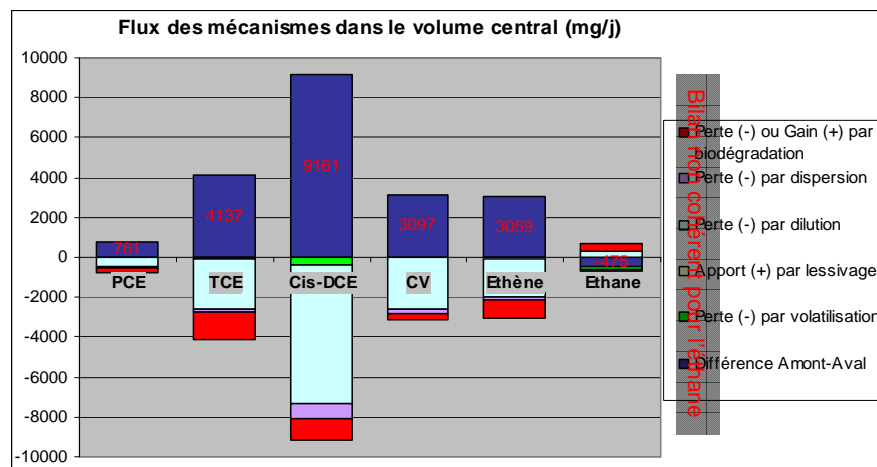


Figure 11 - Evaluation quantitative des mécanismes d'Atténuation Naturelle pour chaque composé dans le bilan de masse n°1 (volume central) – hypothèse n°1

L'application de la méthode, en faisant l'hypothèse d'un taux de biodégradation homogène sur les 3 volumes de contrôle (Figure 10), montrent les résultats suivants (Figure 11) :

- tous les polluants montrent une diminution du flux de composés dissous transportés par la nappe entre la section 1 et la section 2, sauf l'éthane (résultat incohérent),
- pour tous les composés, sauf l'éthane, la « dilution » est le mécanisme prépondérant dans le volume central puisqu'elle explique 61 à 82 % (selon les composés) de la différence de flux entre les sections amont et aval. Le second mécanisme prépondérant est la biodégradation (9 à 35 % selon les composés) sauf pour l'éthane,
- la dispersion, même en considérant une hypothèse haute, apporte une contribution faible à la diminution du flux (4 à 8% selon les composés),
- la contribution de la volatilisation est très faible, la contribution du lessivage étant quant à elle nulle ou quasi-nulle (dû en bonne part à la présence de bâtiments industriels et d'enrobés routiers),
- les constantes de biodégradation du 1^{er} ordre déduites du bilan de masse varient de 0,26 an⁻¹ pour le Cis-DCE à 1,8 an⁻¹ pour l'éthène.

Les résultats des étapes 3 et 4 sont ensuite utilisés pour prévoir par modélisation l'évolution des saturations en phase organique et des concentrations dans les panaches de composés dissous et gazeux (Etape 4). Des recommandations concernant la mise en œuvre des travaux de modélisation sont proposées dans le guide MACAOH « Modélisation ».

7. La mise en œuvre de l'Atténuation Naturelle sous Surveillance : le cahier des charges de la surveillance à long terme des eaux souterraines (étape 5)

La surveillance d'un site concerne les eaux souterraines car les cibles sont généralement dans ce compartiment. La mise en œuvre de l'Atténuation Naturelle sous Surveillance (ANS) comme technique de dépollution se traduit par la surveillance à long terme du site, en principe jusqu'à atteinte des objectifs de dépollution.

La méthode s'appuie sur la Directive OSWER 9200.4-17P [5], laquelle a défini 7 objectifs d'un programme de surveillance à long terme des eaux souterraines :

- démontrer que l'Atténuation Naturelle se déroule selon les prévisions,
- mettre en évidence des modifications des conditions environnementales (hydrogéologiques, géochimiques, ...) pouvant porter atteinte à l'efficacité des mécanismes d'Atténuation Naturelle,
- identifier d'éventuels métabolites toxiques,
- vérifier que le panache ne s'étende pas dans les directions longitudinale, transversale ou verticale,
- vérifier que les impacts sur les cibles demeurent acceptables,
- détecter d'éventuels relargages de polluants pouvant remettre en cause l'efficacité de l'Atténuation Naturelle,
- vérifier que les objectifs de dépollution sont atteints.

Dans cette perspective, le cahier des charges de la surveillance comprend le réseau de points de mesure dans la nappe, les paramètres à mesurer ainsi que les techniques analytiques associées, les fréquences de mesure et les méthodes d'interprétation des données. Le cahier des charges est défini à partir d'un modèle conceptuel du site développé sur la base de l'ensemble des données et interprétations réalisées au cours des étapes 1 à 4.

7.1. Réseau de points de mesure

Le nombre minimum de points de mesure ne peut pas être défini a priori. De façon générique, le type, le nombre et l'emplacement des points de mesure dans la nappe doivent permettre de caractériser la géométrie du panache, avec en particulier des points de mesure en amont de la zone source, au droit et en aval de la zone source (Figure 12). En fonction des incertitudes sur les données et les hétérogénéités de l'aquifère et de la pollution, le réseau de mesures peut également comprendre des dispositifs de caractérisation 3D du panache (prélèvements d'eau multi-niveaux, ...).

Le réseau de points de mesures comprend à la fois des cibles sur lesquelles sont définies les objectifs de dépollution et des points de contrôle permettant d'évaluer l'évolution des mécanismes d'Atténuation Naturelle.

7.2. Paramètres à mesurer et fréquence des campagnes de mesure

La surveillance des eaux souterraines dans le cadre d'une ANS comprend deux phases :

- **une phase initiale de courte durée** visant à étudier l'impact des phénomènes transitoires sur les caractéristiques du panache et de la zone source,
- **une seconde phase de suivi à long terme** visant à évaluer l'évolution des mécanismes d'Atténuation Naturelle et la réduction des concentrations jusqu'à atteinte des objectifs de dépollution.

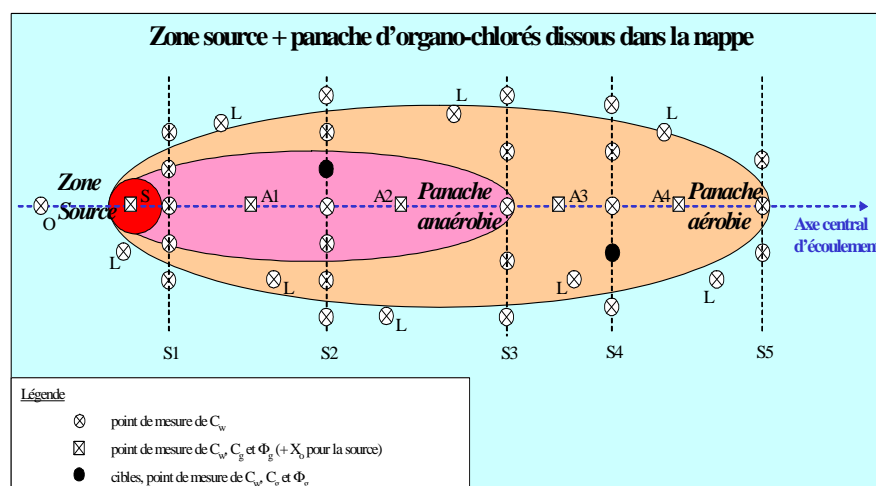


Figure 12 - Réseau de surveillance dans le cadre d'une ANS (vue dans le plan XY)

7.3. Phase I : suivi à court terme

La liste des paramètres recommandés est la suivante : piézométrie, débits de pompage, débits d'injection et d'infiltration, niveau d'eau dans les cours d'eau et plans d'eau voisins du site, conditions météorologiques (en particulier la pluie utile), concentrations dans la nappe en organo-chlorés et indicateurs de la biodégradation (6 packs MACAOH : Volatils, Anions, M-E-E, COD, Electrochimie et Colorimétrie).

La fréquence de mesure est fonction du contexte du site et du type de paramètres. Dans tous les cas, il est recommandé de conduire cette surveillance à une fréquence trimestrielle au minimum pendant les deux premières années de l'ANS. A partir de ces résultats, un état de référence des panaches sera défini et le mois de réalisation des mesures de la phase II sera fixé.

7.4. Phase II : suivi à long terme

Suivi à long terme de la zone source

La liste des paramètres recommandés est la suivante : paramètres physiques (piézométrie, niveau d'eau dans les cours d'eau et plans d'eau, débits de pompage et d'injection/infiltration, pluie utile), composition de la phase organique, concentrations en organo-chlorés dissous dans la nappe en aval immédiat de la zone source.

Selon les situations, des données optionnelles seront à collecter : flux gazeux d'organo-chlorés à l'interface sol/atmosphère au droit de la zone source, champ de saturation en phase organique, paramètres liés à la biodégradation dans la nappe au droit de la zone source.

Etant donné la lenteur des mécanismes d'évolution de la zone source, il est recommandé une **fréquence de mesure tous les 5 ans environ**.

Suivi à long terme du panache de composés dissous

La liste des paramètres recommandés est la suivante : paramètres physiques (piézométrie, niveau d'eau dans les cours d'eau et plans d'eau, débits de pompage et d'injection/infiltration, pluie utile), concentrations dans la nappe en organo-chlorés et indicateurs de la biodégradation (6 packs MACAOH : Volatils, Anions, M-E-E, COD, Electrochimie et Colorimétrie). Les données optionnelles comprennent les concentrations en organo-chlorés gazeux dans la zone non saturée et les flux en organo-chlorés gazeux à l'interface sol/atmosphère.

Ce suivi à long terme est effectué à une **fréquence annuelle ou éventuellement pluriannuelle**.

7.5. Interprétation des données

Les données brutes seront visualisées dans un premier temps sous formes de **cartographies** (piézométrie et concentrations) et de **graphes d'évolution** des différents paramètres mesurés. Les objectifs principaux sont de préciser la géométrie du panache, mettre en évidence des tendances d'évolution des concentrations, et confronter les données mesurées aux prévisions.

Le point le plus délicat de l'interprétation des données concerne généralement la **mise en évidence de la diminution effective des concentrations**, différents facteurs pouvant générer une forte variabilité des données mesurées, en particulier les hétérogénéités du milieu et de la pollution, et les variations temporelles des conditions hydrauliques ou géochimiques du milieu. Ces différents phénomènes, qui modifient potentiellement les concentrations mesurées de **plusieurs ordres de grandeur entre deux campagnes** de mesures, peuvent masquer la baisse effective (généralement lente) de la pollution induite par les mécanismes d'Atténuation Naturelle.

D'autres difficultés concernent la prise en compte de panaches multiples générés par la présence de plusieurs zones sources, l'identification de relargages de polluants durant la surveillance, ou encore l'évaluation du temps nécessaire à l'épuisement de la zone source, qui conditionne largement la réduction des concentrations dans la nappe.

En conséquence, il est recommandé de mettre en œuvre **d'autres stratégies d'interprétation des données, plus robustes** que les évaluations graphiques décrites précédemment : bilans de masse par compartiment (zone saturée, zone non saturée, eaux de surface) ou par forme physique (phase organique, eau, gaz, phase adsorbée), estimations de flux sur une section dans le panache, évaluation des cinétiques d'atténuation de la pollution ou encore modélisation numérique.

L'interprétation des données devra conclure périodiquement sur la pertinence de la poursuite de l'ANS comme technique de dépollution des eaux souterraines. En cas de réponse négative, une technique de dépollution complémentaire ou alternative à l'ANS devra être mise en œuvre.

8. L'acquisition et l'interprétation des données : quelques points d'attention

L'acquisition des données et leur première interprétation (en amont des interprétations spécifiques proposées dans le guide) sont des étapes clés pour garantir la qualité de l'étude de faisabilité de l'ANS ou de sa mise en œuvre. Quelques points d'attention concernant ces aspects sont décrits ci-après.

8.1. Acquisition des données

- **La réalisation des piézomètres** : étant donné la possibilité que de la phase organique soit présente à l'interface aquifère/substratum (Figure 1), il est recommandé d'ancrer de quelques décimètres les piézomètres dans le substratum.
- **L'échantillonnage d'eau multi-niveaux** : il est fréquent d'observer sur un profil vertical des écarts de plusieurs ordres de grandeurs de concentrations en organo-chlorés sur deux échantillons d'eau distants de quelques décimètres. En conséquence, il est recommandé la mise en œuvre d'échantillonneurs d'eau multi-niveaux (exemples en Figure 13). Rappelons que la concentration est fortement dépendante des techniques d'échantillonnage, le prélèvement introduisant un biais vis-à-vis d'une concentration mesurée localement dans le milieu poreux.
- **L'évaluation des transferts gazeux** : étant donné les problèmes de représentativité des données gazeuses, il est recommandé la mise en œuvre en parallèle de chambres à flux à l'interface sol/atmosphère (mesures de flux gazeux) et de piezair à différentes profondeurs (mesures de concentrations gazeuses).
- **L'évaluation des cinétiques de biodégradation** montre généralement une faible représentativité des données de laboratoire. En conséquence, il est recommandé d'acquérir ces cinétiques à partir de données du site.

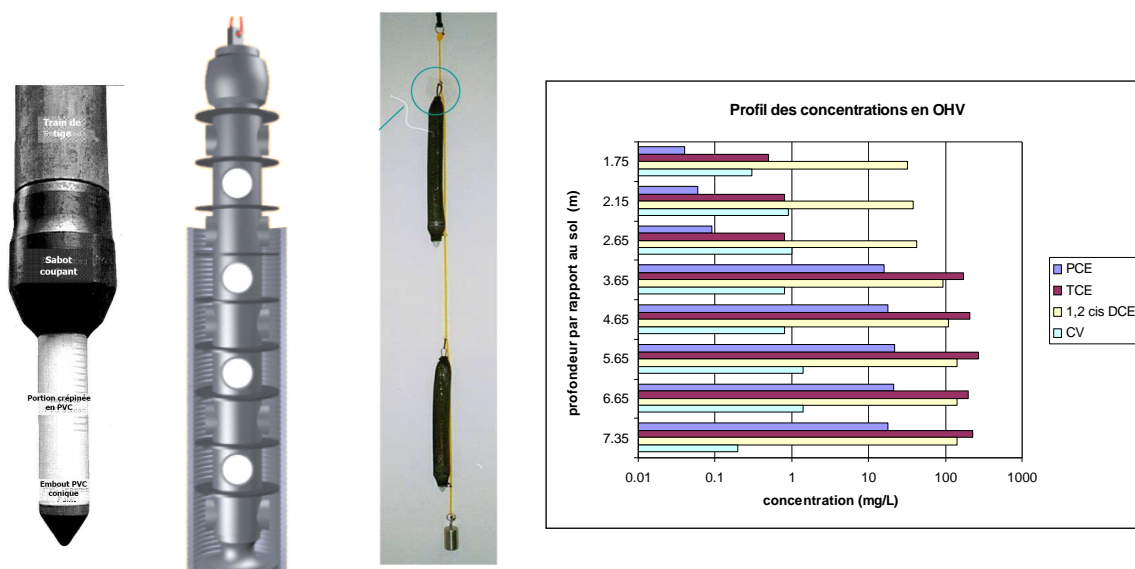


Figure 13 – Exemples d'échantillonneurs d'eau multi-niveaux (de gauche à droite : Groudwater Profiler de GEOPROBE, Passive Diffusion Bags (PDB) de EON Products, Discrete level Multi-Layer Sampler (DMLS) de MARGAN) et exemple de profil vertical de concentrations mesuré sur site à l'aide du DMLS

8.2. Interprétation des données

- Les concentrations dans les sols sont à interpréter en termes de **saturation en phase organique** (cf. Guide méthodologie «Caractérisation des zones source »).
- Les concentrations dans l'eau et dans le gaz sont à comparer dans un premier temps aux **concentrations d'équilibre** (i.e., la solubilité si le polluant est constitué d'un composé unique, le produit de la solubilité par la fraction molaire de chacun des composés dans la phase organique dans le cas d'un mélange de plusieurs polluants).
- Les propriétés physiques des composés permettent de décrire les échanges entre phases à **l'équilibre thermodynamique** : la solubilité pour l'échange phase organique/eau, la pression de vapeur pour l'échange phase organique/gaz, la constante de Henry pour l'échange eau/gaz, le coefficient de partage K_d pour l'échange solide/eau. Cependant, dans les situations réelles, l'interprétation des données conduit souvent à décrire les situations à l'aide de **cinétiques d'échange**, lesquelles ont pour effet de générer des concentrations plus faibles et des transferts plus longs (la Figure 14 montre, par exemple, des concentrations inférieures à la concentration d'équilibre (24 400 ppmV) au droit de la zone source, dans un milieu pourtant réputé homogène).
- La prise en compte des **hétérogénéités à différentes échelles** est précieuse pour interpréter les données de pollution mais également les propriétés du milieu poreux. Par exemple, une donnée de conductivité hydraulique en laboratoire mesurée à l'échelle décimétrique peut être très différente d'une conductivité hydraulique déduite d'un essai de pompage, représentative d'une échelle plurimétrique ou davantage.

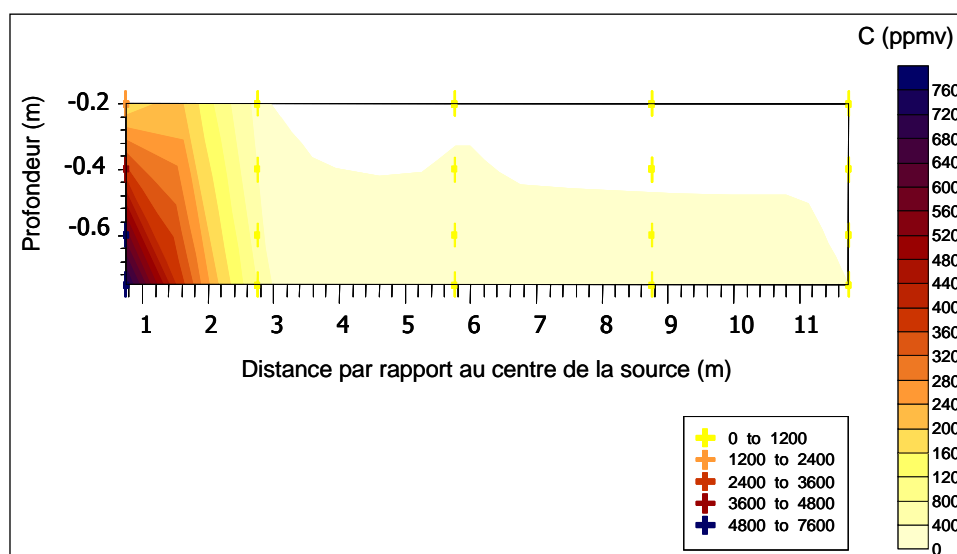


Figure 14 – Géométrie du panache de TCE gazeux dans le bassin SCERES 10 j après la mise en place de la source

9. Bibliographie

- [1] Environment Agency, 2000. Guidance on the Assessment and Monitoring of Natural Attenuation of Contaminants in Groundwater. R&D Publication 95, Environment Agency, UK, 143 p.
<http://publications.environment-agency.gov.uk/pdf/SR-DPUB95-e-e.pdf>
- [2] Newell C.J., McGuire T.M., Looney B.B., Vangelas K.M., Sink C.H., 2004. Trends in Monitored Natural Attenuation Application at Chlorinated Solvent Sites. Paper 3E-08, in : A.R. Gavaskar and A.S.C. Chen (Eds.), *Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds* (Monterey, CA; May 2004), Battelle Press, Columbus, OH, 14 p.
http://www.gsi-net.com/Publications/McGuire_HistoricalMNA_pa.pdf
- [3] NOBIS, 2001. A decision support system for acceptance of natural attenuation as remediation strategy, Draft final v2.0. Prep. by Sinke A.J.C., Heimovaara T., Tonnaer H., Ter Meer J. (TNO-MEP, IWACO bv, TAUW bv), 8 p.
<http://www.nicole.org/nicole2/news/ann137k.pdf>
- [4] USEPA, 1998. Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water, EPA/600/R-98/128, 248 p.
<http://www.epa.gov/ada/download/reports/protocol.pdf>
- [5] USEPA, 1999. Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites, Directive OSWER 9200.4-17P, 41 p.
<http://www.epa.gov/OUST/directiv/d9200417.htm>
- [6] USEPA, 2004. Performance Monitoring of MNA Remedies for VOCs in Ground Water, EPA/600/R-04/027, 78 p.
http://www.epa.gov/ada/download/reports/600R04027/600R04027_fm.pdf
- [7] WSRC, 2004. Natural and Passive Remediation of Chlorinated Solvents : Critical Evaluation of Science and Technology Targets, Report WSRC-TR-2003-00328. Westinghouse Savannah River Company. Savannah River Site, Aiken SC, 150 p.
<http://sti.srs.gov/fulltext/tr2003328/tr2003328.pdf>