

# Évaluation du devenir des organo-chlorés dans les aquifères : les méthodologies MACAOH

## ABSTRACT

### Evaluating the fate of chlorinated solvents in aquifers : the MACAOH protocols.

Forecasting the behaviour of chlorinated solvents in aquifers faces various problems in characterising the source area, evaluating the potential of natural attenuation and numerical modelling. Within such context, ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) started in 2001 a research program (named MACAOH (Modélisation, Atténuation, Caractérisation dans les Aquifères des Composés Organo-Halogénés), 2 M€) that has recently been terminated and which aimed at fill the gap of applied knowledge and edit a methodological protocol on each of the previously cited topic.

Jean-Marie Côme, Directeur R&D,  
Sébastien Kaskassian, Ingénieur de Recherche, BURGÉAP  
Marcel Ropars, Ingénieur de Recherche, IFP  
Gerhard Schäfer, Professeur à l'ULP Strasbourg, IMFS/IFARE  
Michel Quintard, Directeur de Recherche CNRS, IMFT  
Claude Mouton, Ingénieur expert,  
Département Sites et Sols Pollués, ADEME

La prévision du comportement des organo-chlorés dans les aquifères se heurte à des difficultés concernant la caractérisation de la zone source, l'évaluation du potentiel d'atténuation naturelle et la modélisation numérique. Dans ce contexte, l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) a engagé en 2001 un important programme de Recherche & Développement (2 millions d'€) dénommé MACAOH (Modélisation, Atténuation, Caractérisation dans les Aquifères des Composés Organo-Halogénés) qui vient de s'achever, lequel visait à combler des lacunes en matière de compréhension et de connaissances appliquées et à élaborer un guide méthodologique sur chacune des thématiques précitées.

**D**epuis les années 1950, suite à une industrialisation croissante, les cas de pollution de sites par des composés organo-halogénés se sont multipliés en Europe et en Amérique du Nord. Parmi ces composés, la famille la plus souvent rencontrée est celle des composés organo-chlorés aliphatiques (chlorométhanes, chloroéthanes, chloroéthènes).

## Enjeux et objectifs de MACAOH

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). De ce fait, lors d'un déversement d'organo-chlorés sur le sol, les mécanismes de propagation peuvent être décrits en deux processus dis-

tinets et successifs (figure 1):

- un déplacement multiphasique dans le milieu souterrain, au cours duquel la phase organique (phase liquide non aqueuse constituée par un ou plusieurs composés organo-chlorés aliphatiques) se déplace par gravité 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 solubilisation du (ou des) composés présent(s) dans la zone source et le développement d'un panache de composés gazeux dans l'air de la zone non saturée par volatilisation du (ou des) polluant(s) présent(s) dans la zone

source et/ou présent(s) 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 du déplacement multiphasique (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,**

3 guides méthodologiques opérationnels issus du programme MACAOH téléchargeables sur [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr) à partir de mai 2007 sur les thématiques "Caractérisation d'une zone source", "Atténuation Naturelle" et "Modélisation".

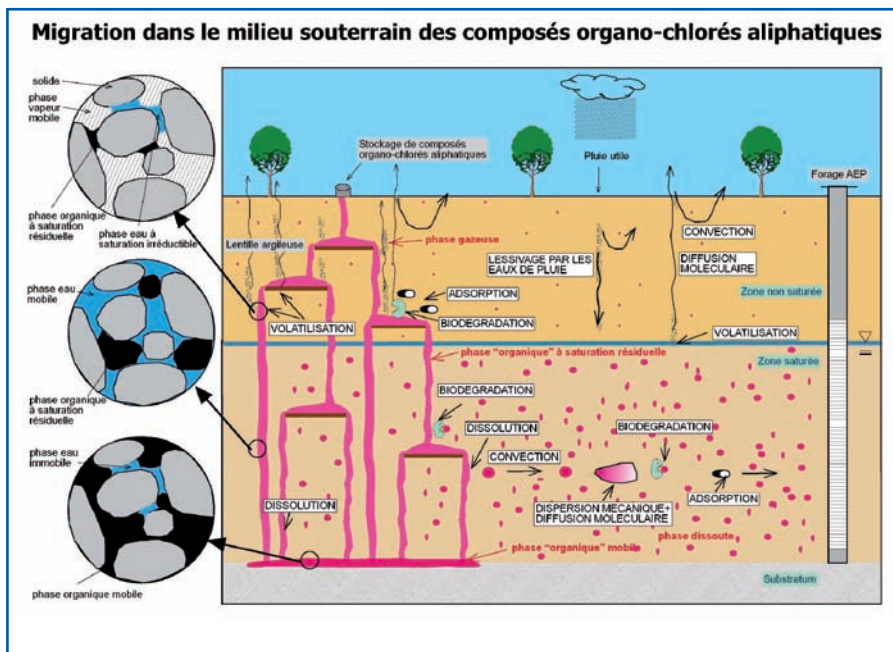


Figure 1: Mécanismes en jeu dans le devenir d'une pollution de type organo-chlorés aliphatiques dans le milieu souterrain.

laquelle comprend formellement la localisation de la zone source, l'estimation du volume de phase organique et la détermination de la composition de cette phase organique. Compte tenu de la répartition fortement dispersée de la phase organique, l'évaluation du volume de la zone source et de sa localisation spatiale sont des questions auxquelles il est particulièrement difficile de répondre;

- **l'évaluation du potentiel d'atténuation naturelle.** Des interrogations fortes subsistent quant à la qualification et à la quantification des mécanismes d'échanges entre phases (aspects cinétiques, prise en compte des hétérogénéités) et de biodégradation (dégradation séquentielle fonction des conditions redox, rôle des facteurs limitants,...);

- **la modélisation.** Les approches quantitatives et prospectives exigées par les diagnostics de pollution s'appuient généralement sur la modélisation. Cette démarche nécessite des modélisations plus complexes que les modélisations hydrogéologiques classiques (généralement monophasiques) pratiquées en routine par les bureaux d'études. Ainsi, une clarification des mécanismes en jeu et des fonctionnalités minimales associées en fonction des typologies de problèmes est nécessaire. Par ailleurs, l'adéquation de l'outil de calcul à une problématique donnée constitue l'une des questions majeures du donneur d'ordre qui n'a généralement ni la culture technique spécifique, ni un argumentaire suffisant dans l'offre du prestataire, pour juger de la validité et de la pertinence de l'outil de calcul proposé.

Enfin, face à l'absence de guides de bonnes pratiques et au déficit de traçabilité des travaux effectués, la rédaction d'un guide méthodologique s'avère nécessaire, à la fois pour les donneurs d'ordre mais également pour les prestataires.

Fort de ces constats, l'ADEME a engagé en 2001 un important programme d'études et de recherches 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, BURGÉAP, 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)<sup>1</sup> [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 [2]).

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 des zones sources" [3], "Atténuation naturelle" [4] et "Modélisation" [5]. Ces guides seront prochainement téléchargeables sur le site internet de l'ADEME ([www.ademe.fr](http://www.ademe.fr))<sup>2</sup> et sont d'ores et déjà référencés dans les outils méthodologiques de la nouvelle politique de gestion des sites potentiellement pollués mise en place par le Ministère de l'Écologie et du Développement

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 - Les trois guides sont actuellement disponibles sur simple demande auprès du Service Documentation de l'ADEME.

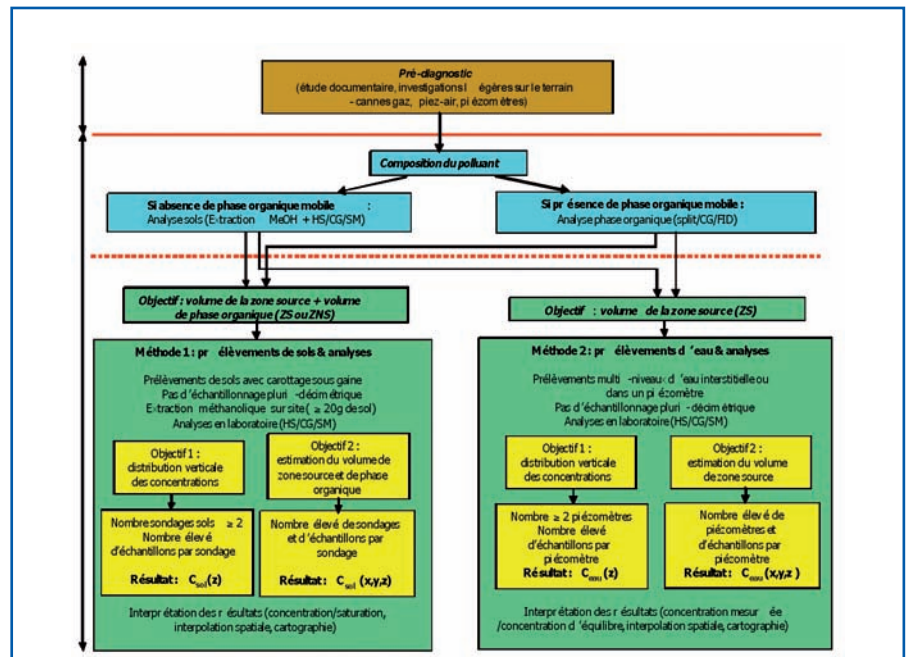


Figure 2: Logigramme de la méthodologie générale de caractérisation d'une zone source.



Figure 3 : Prélèvement de sols à l'aide d'un emporte-pièce (PET à gauche, inox à droite) et extraction au méthanol sur site – Méthode 1.

ment Durable (<http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr/OutilsMethodologiquesMO.html>).

### Localisation et caractérisation d'une zone source

La zone source (volume d'aquifère contenant de la phase organique) est considérée comme étant mise en place (phase organique immobile ou quasi-immobile). Les principaux mécanismes en jeu sont alors les échanges phase organique/eau (dissolution) dans la zone saturée et phase organique/gaz (volatilisation) dans la zone non saturée, ainsi que de façon plus marginale la biodégradation. La caractérisation d'une zone source comprend trois aspects: (1) la détermination de la composition de la phase organique, (2) la localisation de la zone source, qui se traduit a minima par l'identification de concentrations (sol ou eau) révélatrices de la présence d'une phase organique, et au mieux par la géométrie et le volume de la zone source, et (3) la quantification du volume de phase organique, objectif délicat à atteindre.

La méthodologie générale proposée (figure 2) comprend dans une première étape un pré-diagnostic ayant pour objectif de localiser grossièrement la zone source à

l'aide d'une étude documentaire et d'investigations légères sur le terrain (prélèvement d'eau dans des piézomètres de petit diamètre,...). La détermination de la composition de la phase organique est effectuée à partir d'analyses de sols ou de phase organique en fonction de la disponibilité de la phase organique mobile sur site.

Selon l'objectif recherché, deux méthodes d'acquisition/interprétation des données sont ensuite préconisées pour caractériser la zone source. Toutes deux nécessitent un nombre élevé d'échantillons, et le plus souvent un échantillonnage multi-niveaux, lorsque l'objectif est de délimiter le volume de la zone source en 3D.

### Méthode 1: prélèvement/analyse de sols, estimation des saturations en phase organique

Au vu des fortes hétérogénéités de répartition du polluant et des incertitudes liées au prélèvement et à l'analyse des échantillons de sols, un protocole comprenant toute la chaîne de prestations allant du prélèvement sur site au rendu par le laboratoire a été développé. Basé sur la méthode USEPA-5035A [6], il a comme principales caractéristiques l'examen systématique et régulier des sols avec la profondeur, l'échantillonnage

d'un volume important de sols (20 à 50 g selon la granulométrie des sols, figure 3), une extraction méthanolique sur site, l'utilisation d'un SIE (standard interne d'extraction) pour corriger les résultats et un rapport du laboratoire permettant au bureau d'études de contrôler la validité des résultats.

Les concentrations en organo-chlorés dans les sols sont alors interprétées en saturations<sup>3</sup> en phase organique (figure 4). Cette méthode, applicable en zone saturée comme en zone non saturée, permet de déterminer le volume de la zone source et le volume de la phase organique. Cette dernière information est nécessaire pour répondre à différentes problématiques: estimer la durée de vie de la zone source, estimer l'évolution dans le temps des concentrations dans le panache d'eau souterraine, sélectionner et dimensionner un dispositif de dépollution, étudier la faisabilité d'une Atténuation Naturelle sous Surveillance,...

### Méthode 2: prélèvement/analyse d'eau, comparaison aux concentrations d'équilibre

La caractérisation de la pollution de la

<sup>3</sup> - La saturation d'une phase (eau, organique, gaz) est la fraction de la porosité totale occupée par la phase.

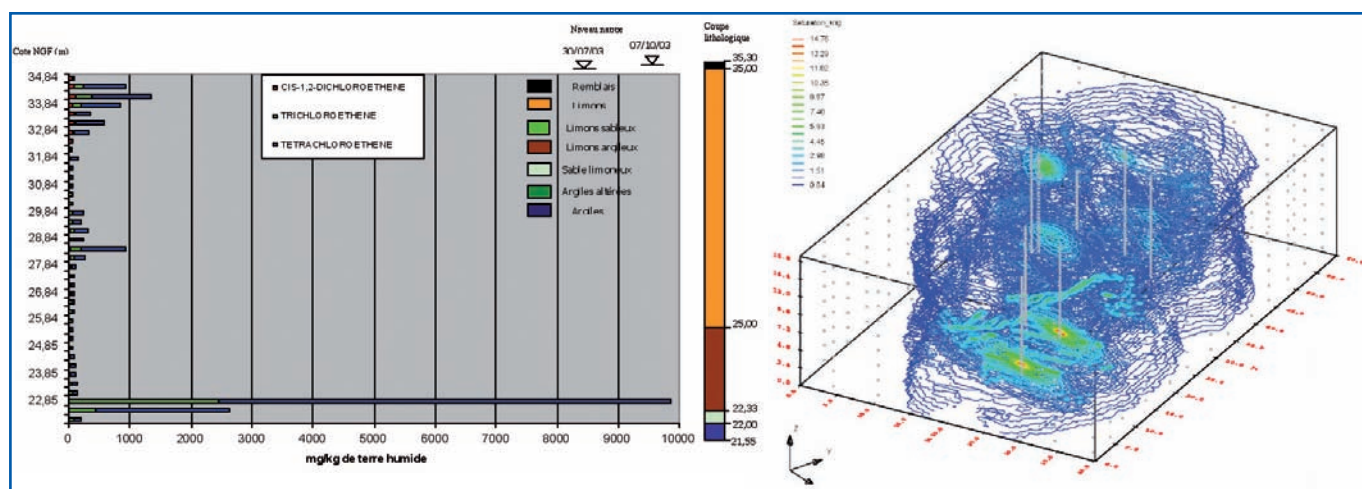


Figure 4 : méthode 1: profil vertical des concentrations dans les sols (à gauche), courbes d'iso-saturation en phase organique dans la zone source (à droite).

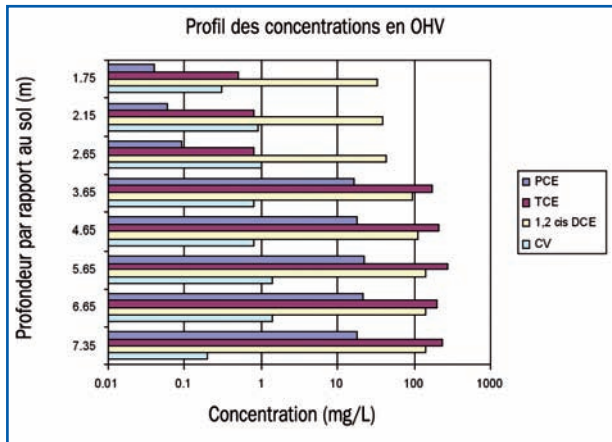


Figure 5: Profil de concentrations dans l'eau mesurées à l'aide de l'échantillonneur multi-niveaux DMLS Margan [7] – Méthode 2.

nappe au droit et à proximité de la zone source nécessite la mise en œuvre d'outils de prélèvement spécifiques en fonction de la discrétisation recherchée: des pompes pour une représentation 2D (concentration moyenne dans le piézomètre), des outils multi-niveaux (préleveurs d'eau interstitielle à l'avancement ou échantillonneurs d'eau multi-niveaux, figure 5) pour une représentation 3D.

Les concentrations en organo-chlorés dans l'eau de nappe sont ensuite comparées aux concentrations d'équilibre estimées à partir de la composition de la phase organique (figure 6). Un ratio "concentration mesurée/concentration d'équilibre" supérieur ou égal à 1 est révélateur d'une phase organique, par contre une discussion est nécessaire dans les autres cas. Ainsi, cette méthode permet d'estimer le volume de la zone source mais pas de déterminer le volume de phase organique.

### Atténuation naturelle dans les aquifères

Les concepts d'"Atténuation Naturelle" et d'"Atténuation Naturelle sous Surveillance" (proposition de traduction française du terme anglophone de "Monitored Natural Attenuation" (MNA)) revêtent un contenu différent selon les pays, ce qui nécessite de clarifier leur sens. Les principaux travaux de recherche concernant l'atténuation naturelle des composés orga-

niques ont été menés aux États-Unis. Le document de référence est la Directive USEPA/ OSWER n° 9200.4-17P de 1999 [8]. Selon cette directive:

- **"l'Atténuation Naturelle"** (AN) englobe l'ensemble des 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. Les mécanismes pris en compte concernent à la fois l'atténuation de la zone source et des panaches de composés dissous et gazeux (figure 1);
- **"l'Atténuation Naturelle sous Surveillance"** (ANS) traduit la capacité des mécanismes d'Atténuation Naturelle à atteindre les objectifs de réhabilitation spécifiques du site dans un délai considéré comme raisonnable comparé à ceux des méthodes "actives" (méthodes impliquant une action anthropique tels que par exemple le pompage/traitement).

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

Pack analytique	Objectif
Pack "Volatils" : organo-chlorés et hydrocarbures pétroliers	Liste 1 : 15 organo-chlorés aliphatiques
	Liste 2 : 6 BTEX
	Liste 3 : 8 alkyl-benzènes + naphthalène
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 CaCO3)
	Fer ferreux (mg/L)

L'ANS exige des études préalables approfondies pour évaluer l'efficacité de l'AN et 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. La méthodologie proposée pour évaluer les mécanismes d'Atténuation Naturelle comprend quatre étapes successives (figure 7), au terme desquelles les différents acteurs de la gestion d'un site pollué doivent décider si l'ANS peut être retenue comme solution de dépollution (étape 5).

### Étape 1: analyse préliminaire des données

L'objectif de cette étape est de préciser la structure du panache (géométrie, évolution stable/en progression/en régression, figure 8) en fonction des cibles identifiées. À ce stade, le modèle conceptuel du site est

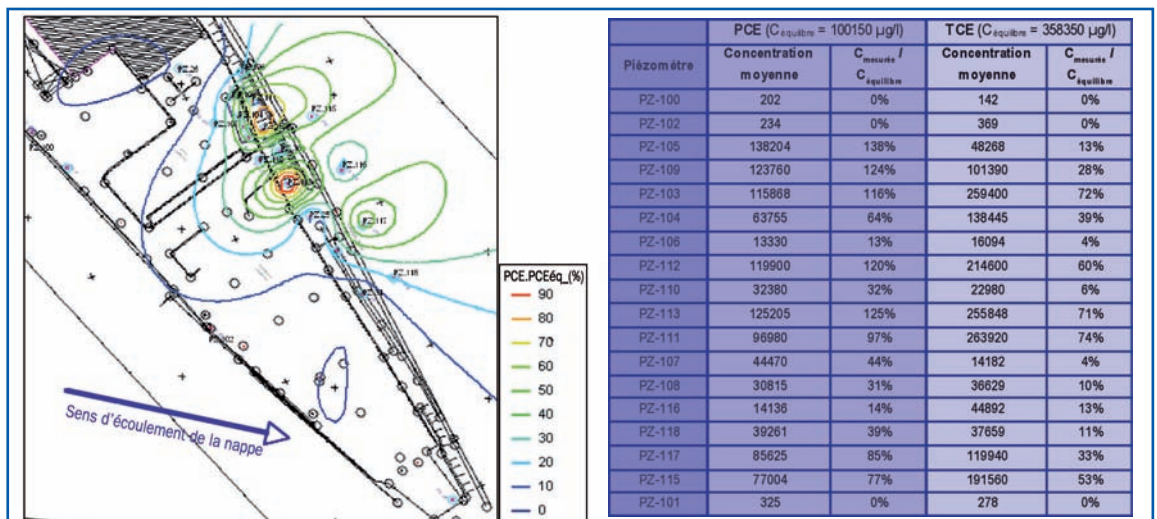


Figure 6: méthode 2: cartographie des ratios Cmesurée/Céquilibre pour le PCE (à gauche) et tableau des ratios en PCE et TCE pour différents piézomètres du site (à droite).

initialisé avant d'être enrichi au fur et à mesure des étapes suivantes.

### Étape 2 : évaluation qualitative de la biodégradation

Cette étape comprend l'identification des mécanismes biologiques en jeu à partir d'une liste de paramètres organisée sous forme de packs analytiques (2 packs "terrain" et 4 packs "laboratoire", tableau 1). Ces paramètres sont mesurés dans des piézomètres représentatifs de l'amont hydraulique du site, de la zone source et du panache. En alternative aux méthodes des scores (USEPA [10], NOBIS [11]) jugées trop réductrices de la complexité d'un site, l'évaluation 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. Mentionnons que cette évaluation est limitée à la déchloration réductrice des chlo-

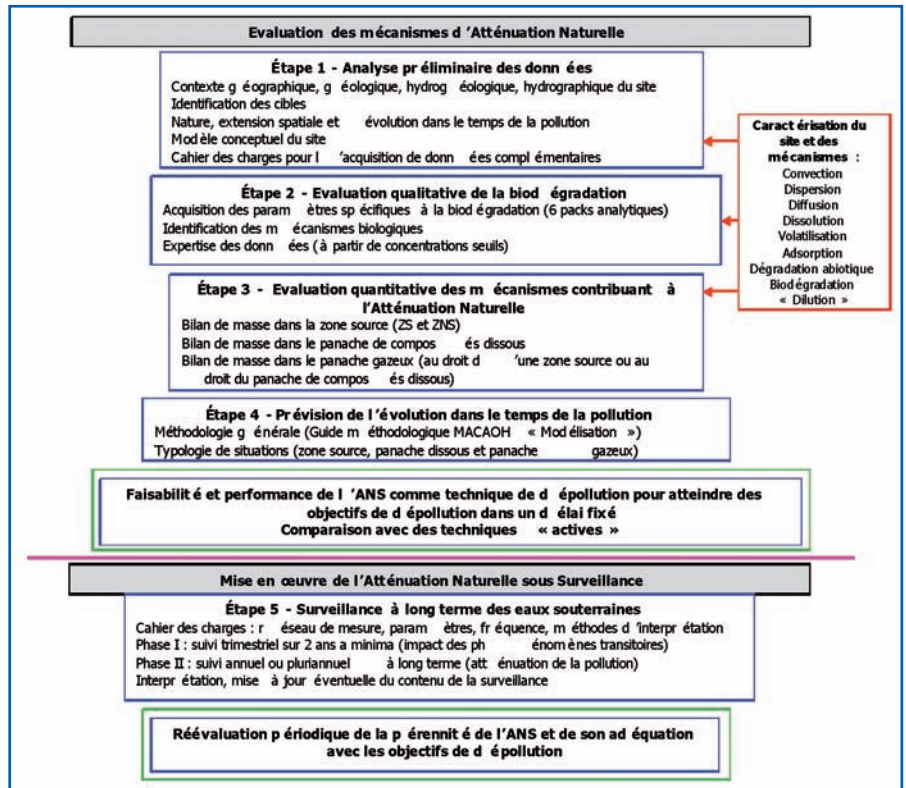


Figure 7 : Logigramme méthodologique pour l'évaluation de l'AN et la mise en œuvre de l'ANS.

tions en composés dissous et/ou gazeux. Dans le panache de composés dissous (zone

déduire la part de la dispersion hydrodynamique, de la "dilution" et de la biodégradation dans la diminution des concentrations. Cette méthode permet en particulier de calculer des taux de biodégradation à partir des seules données acquises sur site.

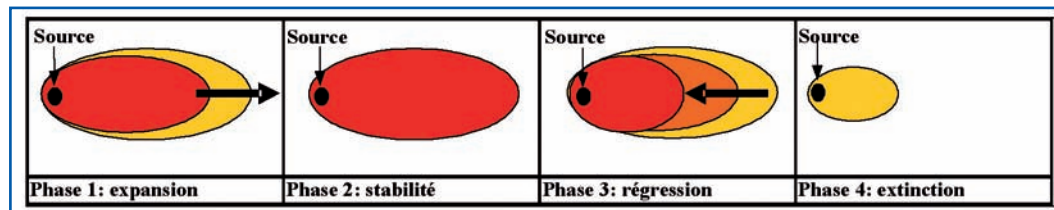


Figure 8 : Évolution idéale des panaches d'organo-chlorés aliphatiques dissous dans une nappe ([9]).

roéthènes (figure 9). Une liste équivalente est également proposée pour l'évaluation dans la zone non saturée.

### Étape 3 : évaluation quantitative des mécanismes contribuant à l'Atténuation Naturelle

Une approche de type bilan de masse a été développée pour estimer la part de chacun des mécanismes impliqués dans l'Atténuation Naturelle (zone source, panache de composés dissous, panache de composés gazeux). Cette étape clé est à la fois nécessaire pour préciser quels sont, quantitativement, les mécanismes principaux en jeu (sachant par exemple que l'Atténuation par "dilution" n'est généralement pas admise) et pour la schématisation du modèle (étape 4). 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 utilisées sont la composition de la phase organique, les concentra-

tionnés, un bilan de flux est calculé entre deux sections d'aquifère délimitées par des isopièzes et représentées par une ligne de piézomètres perpendiculaire à l'écoulement (figure 10). L'approche est 2D, pour quantifier la dispersion hydrodynamique transversale, et éventuellement 3D (si les données sont disponibles) pour quantifier la dispersion hydrodynamique verticale. Le principe consiste à évaluer de manière analytique la part des mécanismes de convection, volatilisation et lessivage, puis à

Dans le panache de composés gazeux (zone non saturée), l'approche est similaire à celle proposée pour le

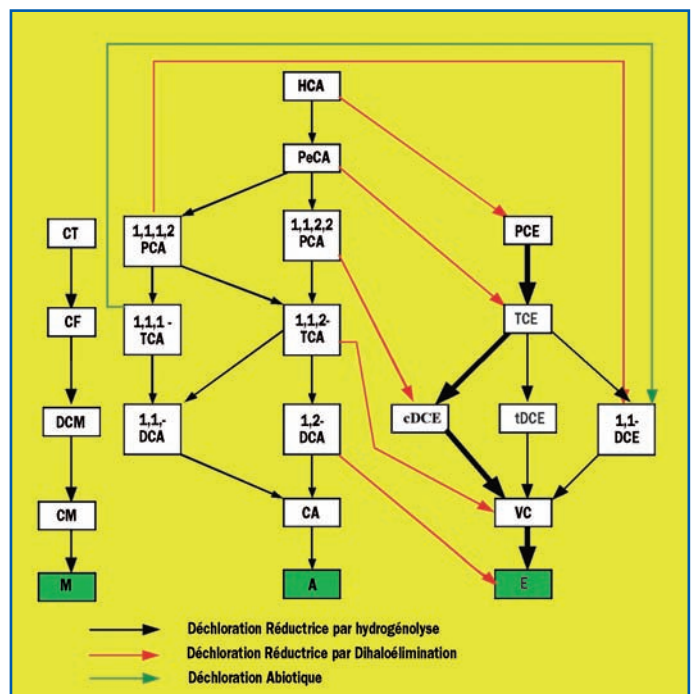


Figure 9 : Dégradation des composés organo-chlorés aliphatiques par voie biologique et abiotique.

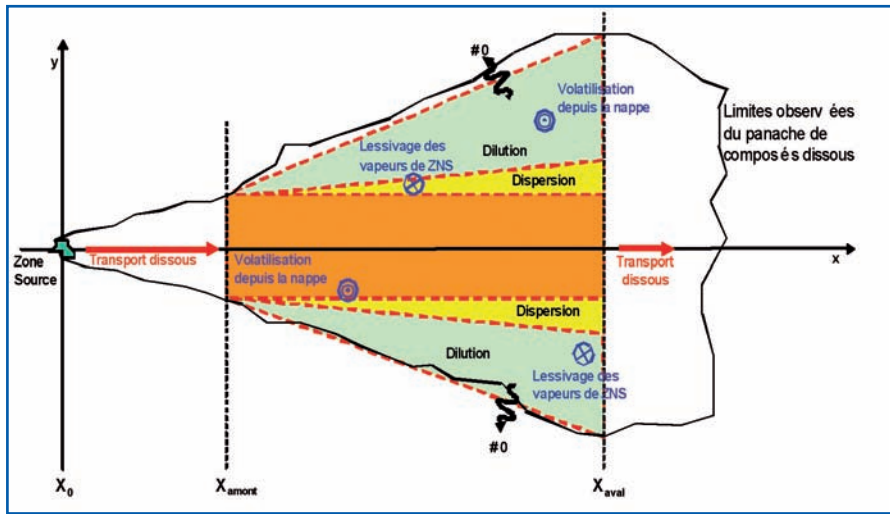


Figure 10: Principe de l'évaluation quantitative des mécanismes d'atténuation naturelle dans le panache de composés dissous – étape 3, bilan de masse.

panache de composés dissous, en postulant que le panache de composés gazeux est lié uniquement aux concentrations dans la nappe.

**Étape 4: prévision de l'évolution des saturations en phase organique (zone source) et des concentrations dans les panaches de composés dissous et gazeux**

En fonction de la situation à modéliser, les données nécessaires et les outils de calcul sont différents. Le Guide "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. Une attention particulière est portée sur les approches 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.

**Étape 5: surveillance à long terme des eaux souterraines (Atténuation Naturelle sous Surveillance)**

Les recommandations concernant la surveillance du site sont dédiées aux eaux souterraines car les cibles

sont généralement dans ce compartiment et elles constituent le principal vecteur de transfert de la pollution hors site.

Le cahier des charges de la surveillance comprend le réseau des points de mesures, les protocoles d'échantillonnage, les paramètres à analyser et les techniques analytiques, la fréquence des mesures ainsi que les méthodologies d'interprétation des données.

Les données mesurées sont périodiquement confrontées aux simulations prévisionnelles. En fonction des situations, une mise à jour du modèle est effectuée et le contenu de la surveillance modifié.

Si le résultat du suivi montre que l'ANS ne permet pas d'atteindre les objectifs de dépollution dans les délais fixés, une tech-

2 formations animées par Jean-Marie Côme et Sébastien Kaskassian (Burgéap) sur l'Atténuation Naturelle des composés organo-chlorés dans les aquifères :  
 • session pour les bureaux d'études les 20 & 21/09/2007  
 • session pour les donneurs d'ordre et inspecteurs de l'Administration les 15 & 16 novembre 2007  
 Pour plus de précisions : [www.burgeap.fr](http://www.burgeap.fr)

nique alternative ou complémentaire devra être mise en œuvre.

**Modélisation du comportement et du devenir des organo-chlorés**

La modélisation numérique est un outil permettant de comprendre le comportement des polluants dans le milieu souterrain et de prédire leur devenir dans l'espace et dans le temps.

Le choix de l'outil de calcul (solution analytique ou plus généralement code numérique) et la mise en œuvre du modèle sont les deux étapes clés des travaux de modélisation, quel que soit l'objet de l'étude.

Le guide méthodologique "modélisation" est un "outil d'aide à la décision" destiné d'une part aux prestataires (bureaux d'études,..) et d'autre part aux donneurs d'ordre (industriels, aménageurs,..) qui a deux objectifs :

- proposer une aide à la décision pour le choix de l'outil de calcul (figure 11). À partir des objectifs définis (cahier des charges) par le donneur d'ordre, des recommandations

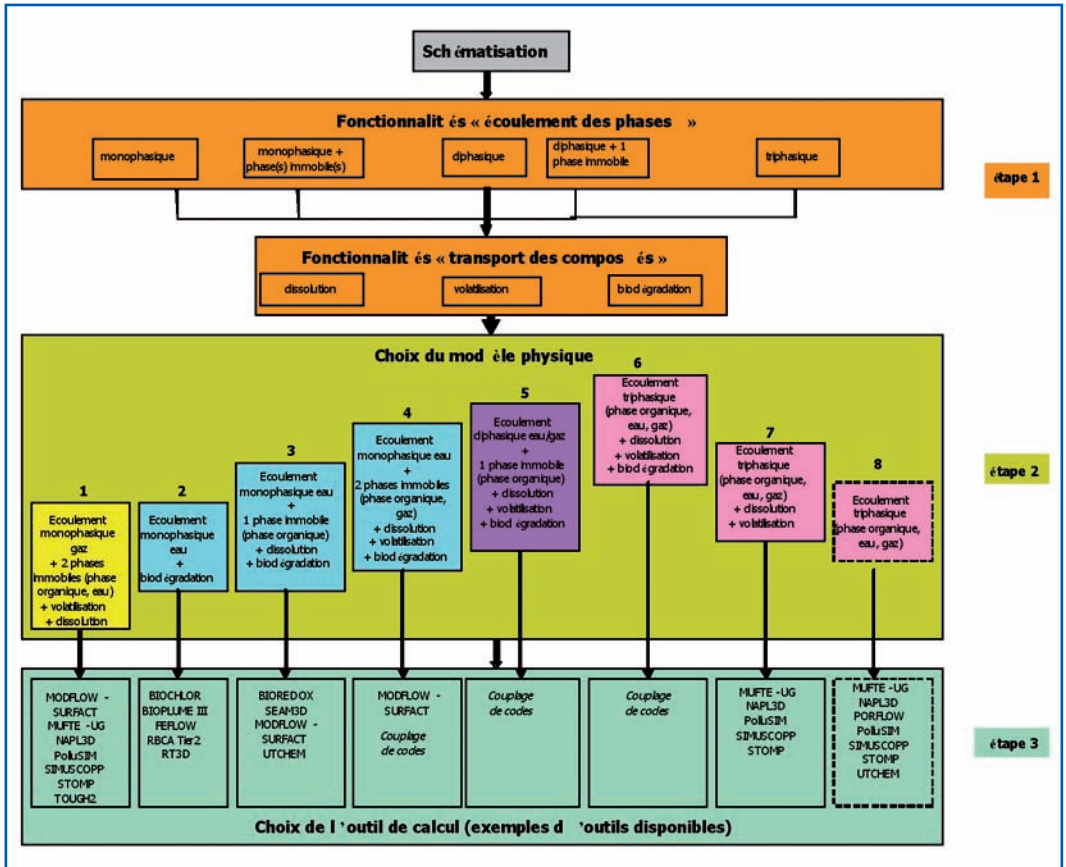


Figure 11: Logigramme "choix de l'outil de calcul".

sont proposées pour aider le prestataire à sélectionner les mécanismes, les fonctionnalités, les formalismes mathématiques, les schémas numériques et in fine l'outil (ou les outils) de calcul en vue de l'établissement de son offre technique. En corollaire, ce processus permet au donneur d'ordre de juger de la pertinence des choix effectués par le prestataire dans son offre.

- préciser la démarche à suivre pour qu'une prestation de modélisation réponde aux objectifs fixés (cahier des charges) par un donneur d'ordre.

Cette démarche est motivée par l'absence de référentiel pour la modélisation dans un contexte où les incertitudes et les enjeux sont forts et la traçabilité de la démarche généralement faible.

Le processus décisionnel (figure 12) va des objectifs fixés par le donneur d'ordre jusqu'au rapport d'étude élaboré par le prestataire (étapes 1 à 6). Les recommandations relatives aux conditions de réalisation d'une prestation de modélisation concernent plus particulièrement les points suivants: l'acquisition des données, la description de la schématisation, le calage du modèle, l'étude de sensibilité et les simulations prévisionnelles. ■

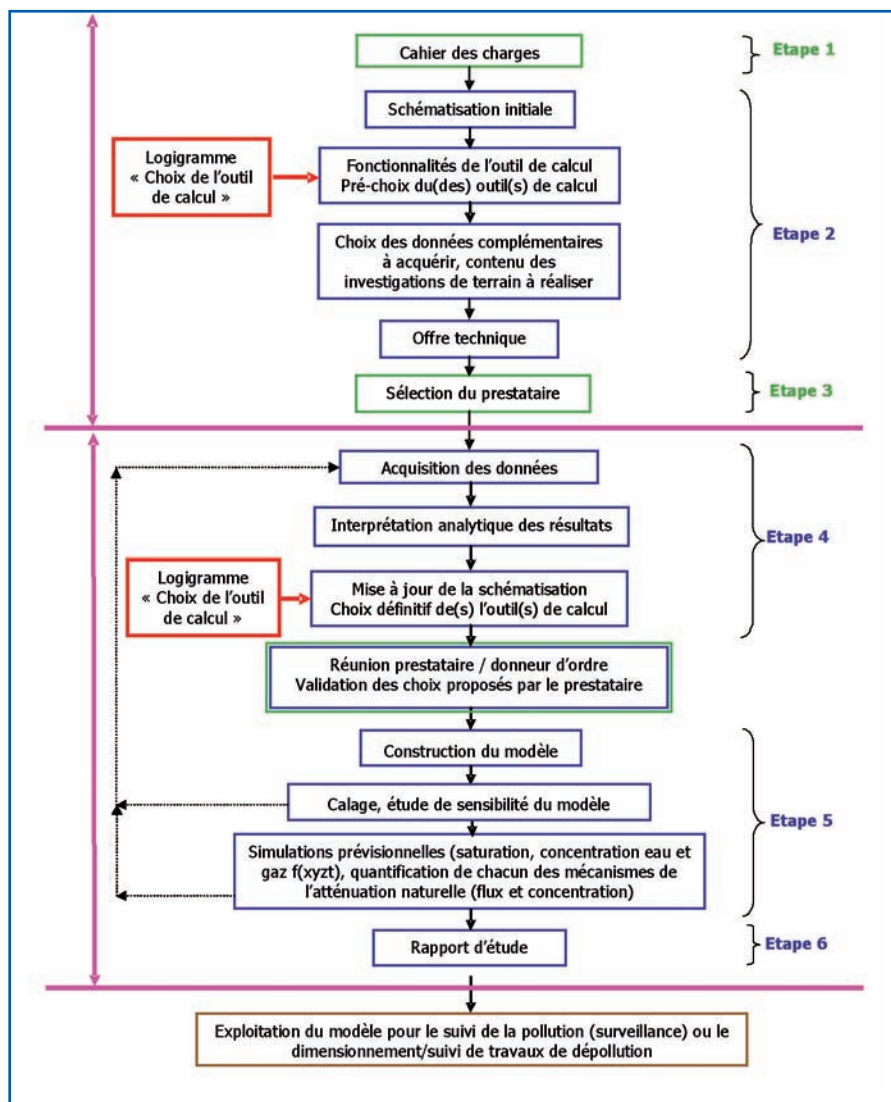


Figure 12: Logigramme "conditions de réalisation d'une prestation de modélisation".

## Références bibliographiques

[1] Caractérisation de la zone source et transfert de la pollution - Expérimentations menées en laboratoire et sur le site contrôlé Sceres à Strasbourg. Rapport final ADEME, Volume I, Programme R&D MACAOH, Razakarisoa O., Schäfer G., Ropars M., Côme J.M., Quintard M., 2006, 262 p.

[2] Modélisation du devenir des composés organochlorés aliphatiques dans les aquifères: situations à modéliser, analyse critique des outils de calcul disponibles, programme d'inter-comparaison. Rapport final ADEME, Volume II, Programme R&D MACAOH, Quintard M., Schäfer G., Côme J.M., Mosé R., Kaskassian S., Delaplace P., Nex. F., Haeseler F., 2006, 144 p.

[3] Caractérisation dans les aquifères d'une zone source constituée d'organo-chlorés aliphatiques, Guide méthodologique ADEME, Programme R&D MACAOH, Côme J.M., Ropars M., Kaskassian S., Razakarisoa O., Quintard M., Schäfer G.,

Haeseler F., 2006, 145 p.

[4] Atténuation naturelle des composés organochlorés aliphatiques dans les aquifères, Guide méthodologique ADEME, Programme R&D MACAOH, Côme J.M., Kaskassian S., Ropars M., Quintard M., Vogel T., Razakarisoa O., Nex F., Schäfer G., Haeseler F., 2006, 216 p.

[5] Modélisation du devenir des composés organochlorés aliphatiques dans les aquifères, Guide méthodologique ADEME, Programme R&D MACAOH, Côme J.M., Quintard M., Schäfer G., Mosé R., Delaplace P., Haeseler F., 2006, 182 p.

[6] USEPA - Method 5035A, July 2002. Closed-system purge-and-trap and extraction for volatile organics in soil and waste samples (première version 12/1996, dernière version 07/2002), dans Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, EPA Publication SW-846

[7] Ronen D., Magaritz M., Levy I., 1987. An in situ

multilevel sampler for preventive monitoring and study of hydrochemical profiles in aquifers. Ground Water Monitoring Review, 7:69-74.

[8] USEPA, 1999. Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites, Directive OSWER 9200.4-17P.

[9] Newell C. J., Connor J. A., 1998. Characteristics of dissolved petroleum hydrocarbon plumes, results from four studies. API Soil/groundwater technical task force.

[10] USEPA, 1998. Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water, EPA/600/R-98/128.

[11] NOBIS, 2001. A decision support system for acceptance of natural attenuation as remediation strategy, Draft final v2.0. Prep. by Sinke A.J.C., Heimoaara T., Tonnaer H., Ter Meer J. (TNO-MEP, IWACO bv, TAUW bv).