



**HAL**  
open science

## Projet ATTENA : Développement de mesures de terrain permettant la mise en évidence de l'atténuation naturelle des polluants organiques

Alain Saada, Jean-Christophe Gourry, Claire Rollin, Valérie Guérin, Eric Proust, Clément Zornig, Stéfan Colombano

### ► To cite this version:

Alain Saada, Jean-Christophe Gourry, Claire Rollin, Valérie Guérin, Eric Proust, et al.. Projet ATTENA : Développement de mesures de terrain permettant la mise en évidence de l'atténuation naturelle des polluants organiques. 2. Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, Oct 2009, Paris, France. pp.NC. ineris-00973358

**HAL Id: ineris-00973358**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00973358>**

Submitted on 4 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Projet ATTENA

## Développement de mesures de terrain permettant la mise en évidence de l'atténuation naturelle des polluants organiques

**Alain Saada<sup>1</sup>; Jean-Christophe Gourry<sup>1</sup>, Claire Rollin<sup>2</sup>, Valérie Guérin<sup>1</sup>,  
Eric Proust<sup>1</sup>, Clément Zornig<sup>1,3</sup>, Stéfan Colombano<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> BRGM, 3 av Claude Guillemin, BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2  
[a.saada@brgm.fr](mailto:a.saada@brgm.fr)

<sup>2</sup> INERIS, Parc technologique Alata, BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

<sup>3</sup> ADEME, 20 avenue du Grésillé, BP 90406 - 49004 Angers Cedex 01

### Résumé

De nombreux acteurs se trouvent actuellement confrontés au problème de la gestion de sites contaminés et à leur réhabilitation. La mise en place de méthodes de traitement dites classiques peut engendrer des investissements importants et se révéler difficile d'un point de vue technique, voire inefficace, notamment dans le cas de pollutions d'aquifères ou de contamination étendue des sols. A partir de ce constat, la gestion des sites pollués peut être abordée différemment en intégrant une approche alternative privilégiant les mécanismes naturels de dégradation et communément appelée atténuation naturelle surveillée (ANS).

A l'heure actuelle, la nouvelle méthodologie française de gestion des sites et sols pollués fait une place à l'ANS dans le plan de gestion. L'ANS apparaît en effet dans les mesures de gestion, au même titre que les actions de dépollution, les mesures constructives, les servitudes, les confinements. Elle peut donc être mise en œuvre consécutivement à la maîtrise de la source et des impacts si la méthode présente un bilan coûts/avantages favorable par rapport aux autres mesures de gestion. Le projet ATTENA vise à élaborer, à travers des actions de recherche et le travail d'un groupe d'utilisateurs dans lequel sont représentés les différents acteurs de la gestion des sites et sols pollués (industriels, BE, société de travaux, DRIRE, MEEDDAT, ...), un guide méthodologique, permettant l'utilisation de l'ANS dans le contexte réglementaire français.

Les actions de recherche du projet ATTENA portent sur le développement d'outils utilisables sur site ou in-situ permettant d'améliorer la compréhension du fonctionnement du site investigué, tout en diminuant les coûts d'investigations, par rapport aux techniques conventionnelles, basées sur des prélèvements d'échantillons d'eau et de sol suivis d'analyses au laboratoire. Des outils géophysique (panneaux de résistivité, polarisation provoquée spectrale), géochimique (sondes in-situ), ou d'analyse de gaz sont déployées pour améliorer la compréhension du fonctionnement du site, et mettre en évidence l'occurrence de processus d'atténuation naturelle. Les outils de caractérisation développés sont mis en application sur 3 sites pilotes mis à disposition par les partenaires du projet. Chacun de ces trois sites est pollué, de façon prédominante, par une famille de polluants organiques : BTEX, HAP ou solvants chlorés. Les travaux présentés ici portent exclusivement sur le site 1 qui présente une pollution majoritaire par les solvants chlorés.

Le site 1 est une ancienne décharge au droit de laquelle les eaux sont contaminées par différents types de solvants organiques, chlorés et aromatiques. L'analyse des données acquises jusqu'à ce jour a révélé certains indices qui pourraient supposer la présence d'une décomposition des polluants chlorés. Cependant, des informations manquent pour confirmer cette hypothèse. Certains composés pouvant être issus de la décomposition de solvants chlorés ont été détectés dans plusieurs ouvrages du site, mais ces composés peuvent également être d'origine anthropique.

Les méthodes de terrain employées ont globalement montré leur intérêt, à la fois pour la compréhension des processus biogéochimiques et pour l'optimisation de la surveillance des sites.

### ➤ **Méthodes géophysiques**

Les données permettent d'avoir une vision globale, continue, et non perturbée du milieu, et ont un coût relativement modéré au regard des informations apportées. Les méthodes géophysique ont permis :

- De localiser le panache de chlorures (panneau de résistivité), dû à la déchlorination des solvants chlorés, et par conséquent de localiser les zones de l'aquifère où la dégradation est efficace.
- De localiser les solvants chlorés dans la partie profonde de l'aquifère (polarisation provoquée spectrale).

Lorsque cela a été possible, les résultats de géophysique ont été confrontés avec d'autres mesures (analyses de sols, d'eaux, de gaz) acquises précédemment ou au cours de la phase 1 du projet ATTENA. Les résultats de géophysique ont été largement confirmés par ces analyses complémentaires.

### ➤ **Méthodes géochimiques**

Les méthodes géochimiques ont, elles aussi, permis d'obtenir de précieuses informations sur le fonctionnement du site :

- La sonde à diagraphie IDRONAUT a permis de mesurer in-situ les paramètres physico-chimiques des eaux sur toute la hauteur de la colonne d'eau. La seule limitation à l'usage de ce type de sonde étant i) le diamètre du forage et ii) le fait qu'il s'agisse d'un piézomètre crépiné sur plusieurs mètres. L'utilisation de ce type de sonde permet d'avoir accès à des informations non biaisées par la purge et d'obtenir, pendant la campagne de terrain, des premières mesures indicatrices d'atténuation naturelle. Les informations concernant le potentiel d'oxydoréduction, la conductivité, la température, et la teneur en oxygène dissous sont précieuses pour comprendre le fonctionnement du site et apprécier une éventuelle stratification des eaux. Les diagraphies effectuées avant et après la purge de l'ouvrage permettent également de s'assurer que l'eau se renouvelle bien, et que les grandeurs mesurées sont représentatives du milieu que l'on cherche à échantillonner.

### ➤ **Analyse de gaz**

Les deux analyseurs de gaz testés ont montré leur efficacité et leur complémentarité. L'Ecoprobe 5 permet d'obtenir instantanément une mesure d'un signal PID en tête de piézomètre, qu'il a été possible de corrélérer avec les teneurs en polluants (CAV et solvants chlorés) mesurées dans les eaux au laboratoire.

Le chromatographe de terrain a permis de développer une méthode de mesure des CAV et solvants chlorés sur site donnant des résultats comparables aux analyses de laboratoire, en s'affranchissant du délai entre le prélèvement des échantillons et l'analyse (ceci a été confirmé sur un autre site : site 2). Des corrélations entre les paramètres physicochimiques des eaux (conductivité, Eh) et le signal PID de l'Ecoprobe 5 ont également été mises en évidence. Ainsi, il est possible de mesurer sur site les teneurs en CAV dans les eaux à l'aide du chromatographe de terrain ( $\mu\text{GC}$ ). Les seules limitations identifiées au cours des campagnes de mesure sont i) l'impossibilité de mesurer sur site tous les composés et ii) les seuils de détection relativement élevés du détecteur qui équipe le  $\mu\text{GC}$ .

### ➤ **Mesures de laboratoire**

Les analyses au laboratoire des polluants ainsi que l'établissement du bilan des accepteurs/donneurs d'électrons ont mis en évidence sur le site 1, des indicateurs d'atténuation naturelle de la pollution. Ce type de mesure est indispensable à l'évaluation qualitative de l'atténuation naturelle.

Malgré les présomptions fortes d'existence de processus d'AN, le site sera abandonné pour la suite de l'étude, dans la mesure où :

- La source n'est pas maîtrisée et conduit à un impact important (plusieurs piézomètres impactés à l'extérieur du site avec de fortes concentrations en solvants chlorés).
- Le contexte local est difficile, tant du point de vue de l'administration que du voisinage, ne permettant pas la mise à disposition du site pour la durée prévue du projet ATTENA (2 ans).
- Des travaux en cours ou planifiés prochainement sur le site risquent d'interférer avec l'étude de l'atténuation naturelle.

## **1 CONTEXTE ET OBJECTIF**

De nombreux acteurs se trouvent actuellement confrontés au problème de la gestion de sites contaminés et à leur réhabilitation. La mise en place de méthodes de traitement dites classiques peut engendrer des investissements importants et se révéler difficile d'un point de vue technique, voire inefficace, notamment dans le cas de pollutions d'aquifères ou de contamination étendue des sols (et/ou profonde). A partir de ce constat, la gestion des sites pollués peut être abordée différemment en intégrant une approche alternative privilégiant les mécanismes naturels de dégradation et communément appelée atténuation naturelle surveillée (ANS).

A l'heure actuelle, la nouvelle méthodologie française de gestion des sites et sols pollués fait une place à l'ANS dans le plan de gestion. L'ANS apparaît en effet dans les mesures de gestion, au même titre que les actions de dépollution, les mesures constructives, les servitudes, les confinements. Elle peut donc être mise en œuvre consécutivement à la maîtrise de la source et des impacts si la méthode présente un bilan coûts/avantages favorable par rapport aux autres mesures de gestion. Le projet ATTENA vise à élaborer, à travers des actions de recherche et le travail d'un groupe d'utilisateurs dans lequel sont représentés les différents acteurs de la gestion des sites et sols pollués (industriels, BE, société de travaux, DRIRE, MEEDDM, ...), un guide méthodologique, permettant l'utilisation de l'ANS dans le contexte réglementaire français. Enfin, les données acquises permettront de fournir des informations nécessaires au bilan coûts/avantages du plan de gestion.

Les actions de recherche du projet ATTENA portent sur le développement d'outils utilisables sur site ou in-situ permettant d'améliorer la compréhension du fonctionnement du site investigué, tout en diminuant les coûts d'investigations, par rapport aux techniques conventionnelles, basées sur des prélèvements d'échantillons d'eau et de sol suivis d'analyses au laboratoire. Des outils géophysique (panneaux de résistivité, polarisation provoquée spectrale), géochimique (sondes in-situ), et d'analyse de gaz sont déployés pour améliorer la compréhension du fonctionnement du site, et mettre en évidence l'occurrence de processus d'atténuation naturelle. Les outils de caractérisation développés sont mis en application sur 3 sites pilote mis à disposition par les partenaires du projet. Chacun de ces trois sites est pollué, de façon prédominante, par une famille de polluants organiques : BTEX, HAP ou solvants chlorés. Les travaux présentés ici portent exclusivement sur le site 1 qui présente majoritairement une pollution par les solvants chlorés (COHV). L'objectif de l'étude est de faire la démonstration de l'efficacité de mesures de terrain (géophysique et géochimique) pour mettre en évidence les zones du site sur lesquelles les solvants chlorés sont dégradés.

## **2 PRESENTATION DU SITE D'ETUDE**

Le site 1 est une carrière, exploitée pour son calcaire jusqu'en 1949. Le site, d'une superficie de 4,4 hectares, a ensuite été exploité entre 1963 et 1973 comme centre de traitement et de stockage de déchets. La société entreposait des déchets industriels, mais procédait également à des infiltrations d'acides et d'autres produits dans l'aquifère, malgré divers arrêtés préfectoraux qui interdisaient toute activité dans la carrière.

Les premiers indices de pollution n'ont été constatés que vers les années 1981-1982 (via le dépérissement de la végétation en aval de la carrière).

Des travaux d'enlèvement des déchets de surface ont été réalisés de novembre 1987 à avril 1989. Puis, en 1993, une tranchée drainante a été mise en place en aval de la carrière, en pied de coteau. Suite à des problèmes techniques, cette installation de traitement a été abandonnée (tranchée non raccordée au système de collecte).

L'analyse des données historiques [1] acquises jusqu'au jour de l'étude a révélé une zone source importante (la carrière contiendrait encore 18 000 m<sup>3</sup> de déchets proches de la surface, 400 m<sup>3</sup> de déchets à l'état liquide et 7 000 à 21 000 tonnes de déchets infiltrés en

profondeur), de fortes concentrations en solvants chlorés sur site et en aval, ainsi que certains indices qui pourraient laisser supposer la présence d'une dégradation des polluants chlorés, en particulier la détection de métabolites. Cependant, des informations supplémentaires manquent pour confirmer cette hypothèse, ces composés pouvant être issus de la décomposition de solvants chlorés, mais également avoir une origine anthropique.

La lithologie dans la zone étudiée est la suivante :

- couverture limoneuse pouvant atteindre 6 m d'épaisseur
- calcaires du Lutétien, formation d'une vingtaine de mètres d'épaisseur, dont les 10 premiers mètres ont été exploités dans la carrière.
- sables de Cuise (50 mètres d'épaisseur en moyenne)
- sables et argiles du Sparnacien (20 mètres d'épaisseur)
- sables du Thanétien (30 mètres d'épaisseur)
- craie blanche à silex du Sénonien.

### **3 MATERIELS ET METHODES**

#### **3.1. Mesures géophysique**

D'après plusieurs études récentes [2 ; 3], les produits organochlorés sont détectables par la méthode de la polarisation provoquée (PP) et la mesure de la résistivité électrique. Les mesures de résistivité en courant continu ont été acquises avec un résistivimètre de type Syscal Pro (Iris Instruments) suivant la configuration gradient. Les mesures de polarisation provoquée spectrale ont été acquises avec un résistivimètre fréquentiel GDP32 II de Zonge, suivant la configuration dipôle-dipôle.

La figure 1 présente une vue aérienne du site, ainsi que la localisation des profils de géophysique qui ont été réalisés. Les piézomètres existant sur le site permettent de repérer la zone source (carrière : F8 ; F17) ; la zone amont (F2 ; F15) ; et la zone aval (ensemble de piézomètres alignés entre F10 et Pz4a qui sont localisés à la limite du site et permettent de contrôler la qualité des eaux qui sortent du site). Le réseau de surveillance est complété par le piézomètre F5, localisé à mi-pente, à mi-chemin entre la zone source et la limite du site.

Le premier profil (P1) est transverse au sens d'écoulement du panache de pollution parallèlement à la limite aval du site. La longueur du profil est de 475 m, soit 96 électrodes espacées de 5 m. Des mesures de résistivité et de polarisation provoquée (PP) y ont été menées afin d'avoir une profondeur d'investigation de 70 m pour la résistivité et de 30 m pour la PP.

Le second profil (P2) est orienté Sud-Nord, passe par le forage F5, situé à mi chemin entre la zone source et la limite aval du site, et se termine au niveau de la limite aval du site. Sa longueur est de 350 m, soit 71 électrodes espacées de 5 m. Seules des mesures de résistivité ont été réalisées sur P2 car le dispositif de mesure n'était pas adapté à des mesures de PP, la profondeur d'investigation nécessaire pour pouvoir observer l'intégralité de la nappe en PP n'étant pas compatible avec l'équipement mis en œuvre.

Ces 2 profils ont été implantés de cette manière afin qu'ils recoupent ou passent à proximité de forages existants, en tenant compte des problèmes liés aux chantiers en cours sur le site, à la ligne de chemin de fer, et à la route en contrebas du secteur d'étude.

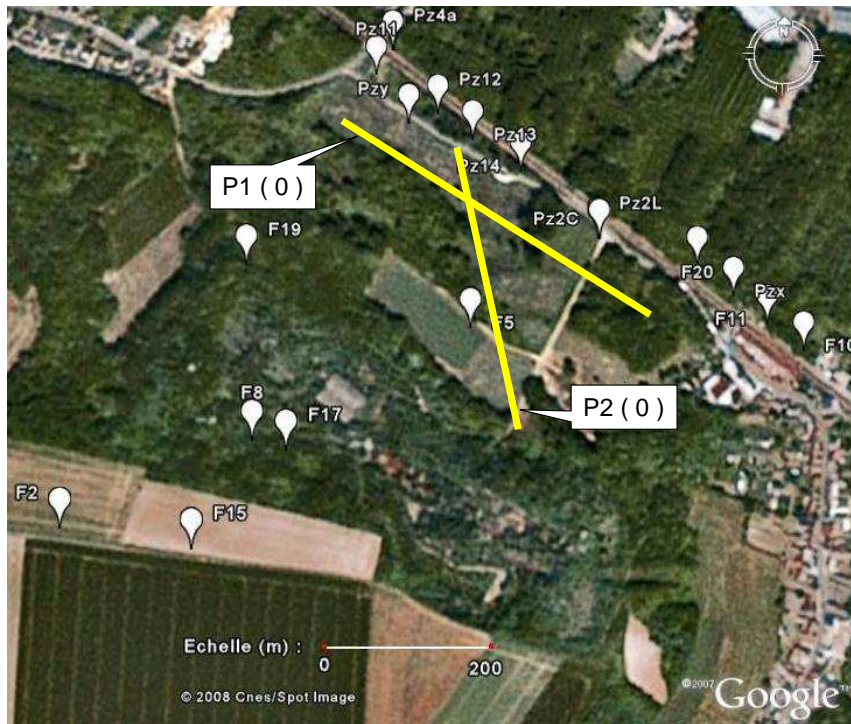


Figure 1: Implantation des panneaux de géophysique sur le site.

### **3.2. Analyse de gaz**

L'analyse de gaz peut être utilisée pour répondre à divers questionnements comme la délimitation d'un panache de COHV par mesure de gaz du sol, ou la détermination de zones de dégradation par la mesure d'indicateurs de dégradation (CO<sub>2</sub> par exemple). Dans notre étude, nous avons choisi de mesurer les vapeurs gazeuses contenues dans la tête du piézomètre afin d'évaluer la possibilité d'utiliser cette méthode en screening, pour orienter une campagne de prélèvement sur site. Deux analyseurs de gaz ont été utilisés au cours de cette étude sur plusieurs piézomètres situés sur le site à l'aval de la zone source (PZ2C, PZ2L, PZ4bis, PZ4C, PZ11, PZ12, PZ13, PZ14, F5) à savoir :

- L'Ecoprobe 5 (RS DYNAMICS) : Analyseur multi paramètres équipé d'une canne de prélèvement, d'une pompe intégrée, ainsi que d'un détecteur PID permettant la mesure des molécules ionisables telles que les BTEX ou Composés Aromatiques Volatils (CAV) ou les COHV ; et d'un détecteur Infra Rouge permettant la mesure séparée du méthane, CO<sub>2</sub>, et des vapeurs d'hydrocarbures totaux.
- Un chromatographe de terrain Micro GC SRA P200, équipé avec une micro colonne OV1 de 6 mètres (bloc compact comprenant la vanne d'injection, la colonne et le détecteur) couplé avec un catharomètre permettant la détection du CO<sub>2</sub>, des CAV, et des COHV. L'avantage du chromatographe de terrain (appelé µGC dans la suite du rapport) est la possibilité de séparer et de quantifier les différentes molécules recherchées.

#### **3.2.1 Inter-comparaison des deux analyseurs de gaz**

L'inter-comparaison a été réalisée en comparant le signal du PID mesuré en tête de piézomètre avec l'Ecoprobe, aux teneurs en COHV et CAV dans la phase gaz données par µGC, sur plusieurs piézomètres localisés sur la friche. Les prélèvements de gaz sont effectués à l'aide de la pompe de l'Ecoprobe 5. Un sac à gaz en tedlar de 1 L est rempli à la sortie de l'Ecoprobe. Le contenu du sac est ensuite injecté dans le µGC. La distance du point de prélèvement au toit de la nappe est un paramètre prépondérant pour pouvoir comparer les mesures. De ce fait, l'extrémité du tube de prélèvement de gaz a été systématiquement placée à 20 cm au-dessus de la surface de l'eau, sauf pour le forage F5, qui présente une épaisse zone non saturée. Pour ce piézomètre, le tube de prélèvement a été descendu environ 10 m au-dessus du toit de la nappe.

### **3.2.2 Mesure sur site des COHV et des CAV dans les eaux souterraines**

Un prélèvement des 40 premiers cm d'eau en surface de la colonne d'eau a été effectué au tube bailer. Une première série d'échantillons est analysée sur site avec le  $\mu$ GC immédiatement après la collecte. Une deuxième série est destinée à être analysée après retour au laboratoire, dans les conditions et avec l'équipement de terrain, enfin, la troisième série sera analysée avec le dispositif de laboratoire (purge and trap - GC/MS). La comparaison entre la première et la deuxième série permettra d'évaluer les pertes en composés volatils pendant le transport des échantillons jusqu'au laboratoire. La comparaison entre la deuxième et la troisième série permettra de comparer le  $\mu$ GC de terrain par rapport à l'équipement de laboratoire.

Pour les mesures sur site, 30 ml d'eau à analyser est introduite dans des flacons de 40 ml bouchés hermétiquement. Les échantillons d'eau sont chauffés sur site à 80°C, pendant 30 minutes, à l'aide d'un système thermostatique Digi Probe, SCP Science, pour réaliser la mesure en espace de tête. L'analyse par chromatographie en phase gazeuse des composés volatils en équilibre avec l'eau dans les flacons, est effectuée en injectant la phase gaz de l'espace de tête par pompage vers une colonne capillaire appropriée. Les composés recherchés sont entraînés puis détectés par un catharomètre. La quantification est réalisée par étalonnage externe sur la base des aires de pics et l'identification par comparaison des temps de rétention avec des standards

### **3.3. Prélèvement d'échantillons d'eaux / analyses au laboratoire**

Les échantillons ont été collectés par la société CAR, au cours de la campagne de surveillance trimestrielle du site. La pompe utilisée est une pompe immergée équipée d'un tubage en polyéthylène jetable. Le protocole d'échantillonnage fait référence aux recommandations des normes FDX 31-615, FD T 90-112 et T 90-210.

Plusieurs échantillons provenant de la zone aval proche (F5), de l'aval et de l'aval lointain ont été collectés pour analyse des teneurs en polluants organiques et en éléments minéraux, potentiellement indicateurs d'atténuation naturelle (bilan des accepteurs / donneurs d'électrons). Parallèlement à la collecte d'échantillons d'eau les paramètres globaux des eaux (pH, Eh, conductivité, oxygène dissous) qui sont également des indicateurs d'ANS ont été mesurés in-situ, lorsque cela était possible, à l'aide d'une sonde IDRONAUT, ou à défaut sur site lorsque le diamètre des piézomètres ne permettait pas l'introduction de la sonde.

## **4 RESULTATS ET DISCUSSION**

### **4.1 Mesures géophysique**

Les deux panneaux de résistivité montrent l'existence d'un niveau fortement conducteur (Figure 2). Le toit de ce conducteur se situe au toit de la nappe phréatique ; sa base se situe au sein des sables du Cuisien, à la cote 30 m NGF. Ce niveau conducteur peut être indicatif d'un panache de chlorures circulant au sein des sables Cuisiens consécutivement à la dégradation des COHV. Sur le profil transverse, on observe que le panache est le plus conducteur autour du piézomètre Pz14, la résistivité allant croissant de part et d'autre de cette zone.

L'interprétation de la polarisation provoquée est plus délicate (phase à 8 Hz). On distingue une anomalie de phase entre les points métriques 120 et 350 m, à une cote inférieure à 25 m NGF, mais dont on ne voit pas la base car la profondeur d'investigation est réduite avec la configuration de mesure PP choisie. Cette anomalie de phase peut être attribuée soit à la présence dans ce secteur de composés organiques à la base de l'aquifère du Cuisien, soit aux sables argileux à la base de l'aquifère du Cuisien, les argiles étant également à l'origine d'effet PP.

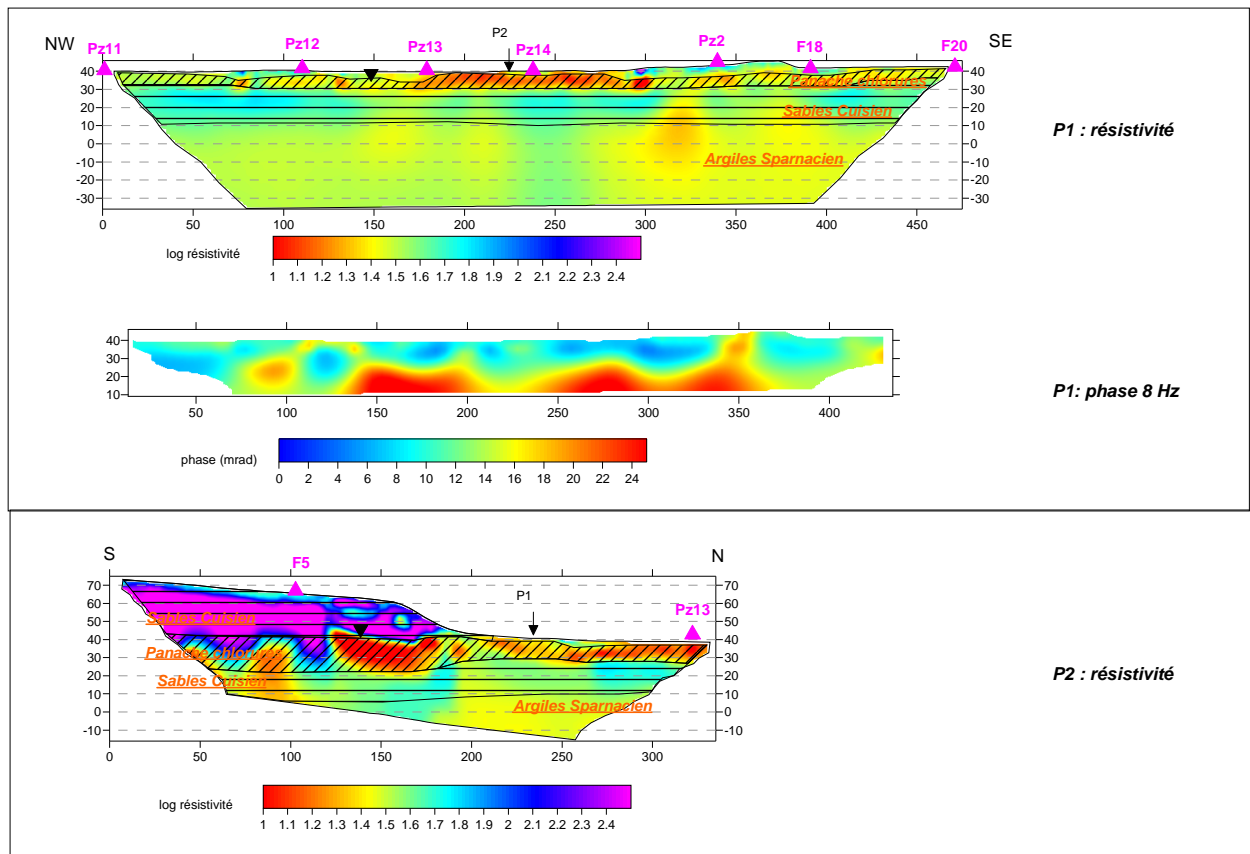


Figure 2 : Panneaux électriques inversés sur le site 1

## 4.2. Analyse de gaz

### 4.2.1 Inter comparaison des analyseurs de terrain

Le signal PID de l'Ecoprobe et la somme des CAV et COHV détectés par  $\mu$ GC montrent une bonne corrélation (Figure 3). Ainsi, il semble possible d'utiliser l'Ecoprobe en screening, afin d'analyser à l'aide du  $\mu$ GC, uniquement les échantillons pour lesquels un signal est détecté sur le PID. Ceci peut permettre d'alléger significativement et de mieux cibler les campagnes de mesures, si l'on considère que l'Ecoprobe permet d'avoir un résultat immédiat, alors que le  $\mu$ GC nécessite une installation du matériel et un temps d'analyse de l'ordre de 15 minutes par échantillon.

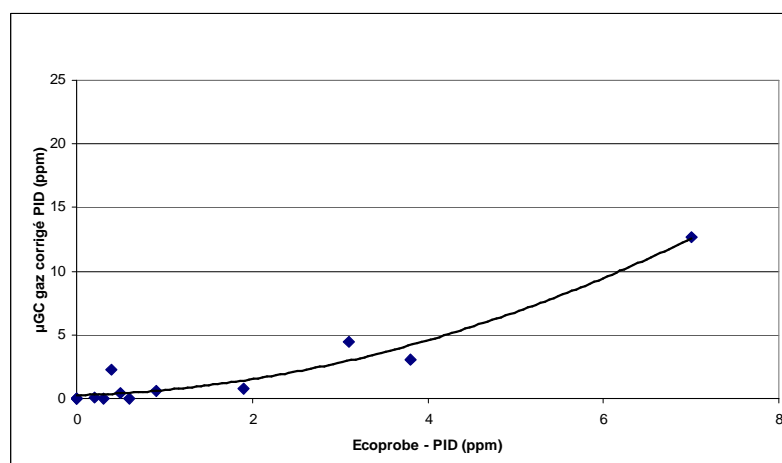
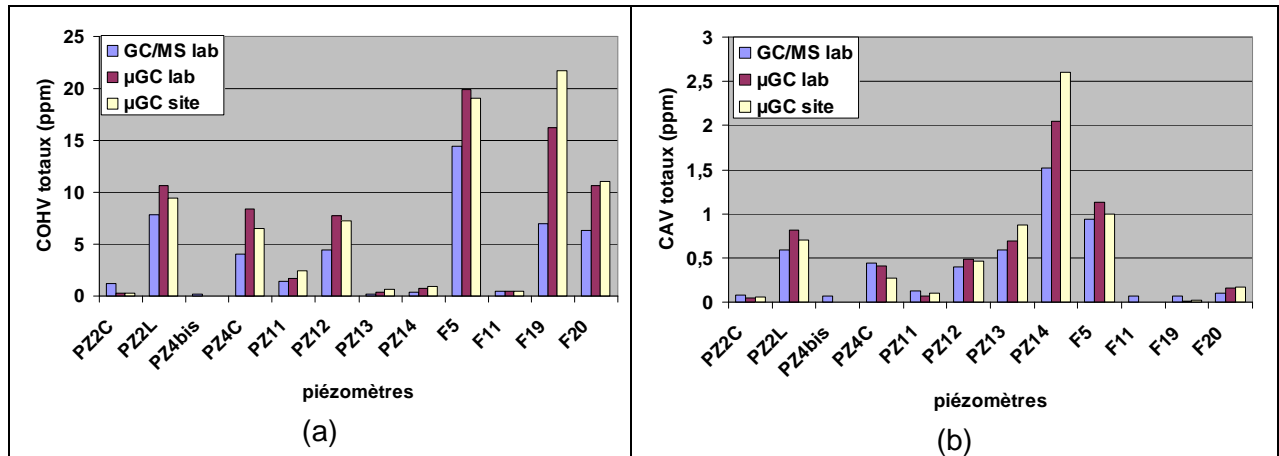


Figure 3 : Comparaison des résultats des deux analyseurs de gaz : en abscisse : PID (Ecoprobe) ; en ordonnée somme CAV + COHV ( $\mu$ GC)



#### 4.2.2. Mesure sur site des BTEX et des COHV dans les eaux souterraines

La Figure 4 donne les teneurs en COHV totaux (a) et en CAV (b) mesurées dans les eaux souterraines avec les équipements de laboratoire et de terrain.



**Figure 4 : Teneurs en COHV totaux et en CAV totaux déterminées sur les différents échantillons d'eaux souterraines sur site et au laboratoire**

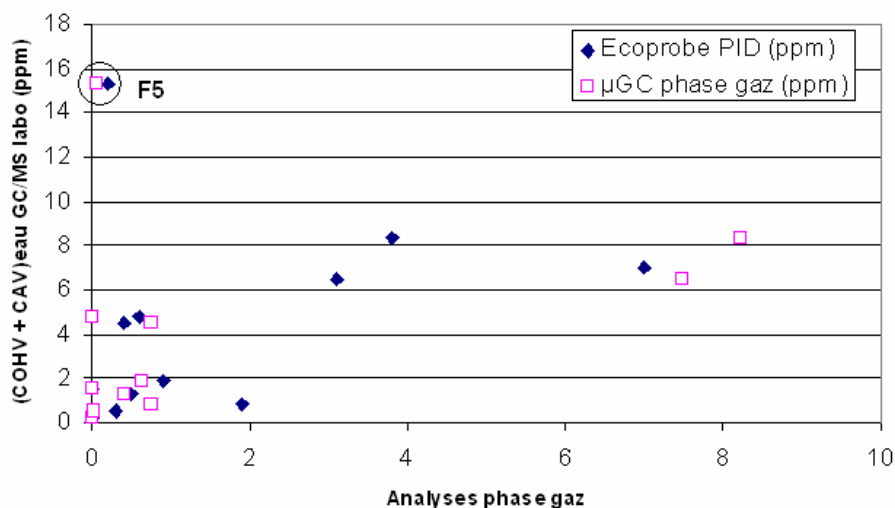
Les résultats sont comparables entre les différentes techniques, on peut toutefois noter que les COHV sont surestimés par µGC par rapport à la GC/MS. Ceci est globalement dû à une surestimation par µGC de trois composés : 1,2 cis Dichloroéthylène, 1,2 Dichloroéthane, et dichlorométhane [4]. Il semble ainsi possible de mesurer de manière relativement fiable les CAV et les COHV sur site.

#### 4.2.3. Estimation des teneurs en CAV et COHV dans les eaux souterraines à partir des mesures en phase gaz

La Figure 5 montre une corrélation entre les teneurs en phase gaz mesurées avec l'Ecoprobe et le µGC et les teneurs en COHV + CAV dans l'eau. Toutefois, il semble difficile d'en tirer plus de conclusions. Le forage F5, pour lequel le prélèvement de gaz a été effectué 10 mètres au-dessus du toit de la nappe, n'est pas comparable aux autres échantillons, pour lesquels le prélèvement de gaz a été effectué à 20 cm au-dessus du toit de la nappe. Ceci met en évidence l'importance de la distance entre l'extrémité du tube de prélèvement de gaz et le toit de la nappe. D'autres paramètres, comme la température de l'eau sont susceptibles d'avoir également une influence sur la composition de la phase gaz, ce qui peut potentiellement poser des problèmes en termes de comparaison des résultats d'une campagne de mesure à l'autre.

#### 4.3. Prélèvements et analyse d'échantillons d'eau au laboratoire

Les analyses des polluants organiques ont été réalisées par la société CAR, dans le cadre du suivi trimestriel (Tableau 1). Le bilan des accepteurs/donneurs d'électrons a été quantifié par les laboratoires du BRGM (Tableau 2).



**Figure 5 : Corrélations entre les teneurs en composés organiques déterminées sur site en phase gaz et les concentrations en polluants dans les eaux souterraines**

Piézomètre	COHV	CAV	Cyanures totaux	Carbone organique total	Indice phénol
	µg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L
PZ4C	4593	360	< LQ	1,9	< LQ
PZ12	4254	224	< LQ	2,1	0,01
PZ13	96	668	< LQ	12,8	0,1
PZ14	6	2260	< LQ	30,6	0,2
F5	10918	1255	< LQ	14,9	0,02

**Tableau 1 : Analyses des COHV et des CAV**

Piézomètre	Sulfates	sulfures	Nitrates	Nitrites	Ammonium	Chlorures	Eh
	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mV
PZ4C	55,9	22	< LQ	< LQ	0,2	41,9	- 122
PZ12	53,7	51	< LQ	< LQ	0,2	40,6	- 169
PZ13	22,9	2066	< LQ	0,01	0,4	104,5	- 305
PZ14	1,9	1370	< LQ	< LQ	1,7	241,2	- 364
F5	15,2	603	< LQ	< LQ	0,8	129,3	- 287

**Tableau 2 : Analyses des accepteurs/donneurs d'électrons**

Des conditions favorables aux processus d'atténuation naturelle existent sur le site au niveau du piézomètre Pz14 (et dans une moindre mesure Pz13). En effet, les résultats mettent en évidence plusieurs indicateurs d'atténuation naturelle : les analyses des éléments inorganiques effectuées en Pz14 montrent une teneur en sulfates faible ; une teneur en sulfures importante ; une absence de nitrates ; un excès d'ammonium ; une forte teneur en carbone organique total ; un important excès en chlorures ; un Eh très négatif. Ceci met en évidence des conditions très favorables à l'atténuation naturelle au niveau de Pz14. A titre d'exemple, le logiciel Biochlor, développé par l'US-EPA attribue, pour Pz14 une note de 18, qui correspond à une mise en évidence de conditions adéquates pour l'atténuation naturelle des solvants chlorés. Cette note est obtenue bien que nous ne disposions pas de l'ensemble des paramètres pouvant contribuer à augmenter la note. Le même exercice, effectué pour les autres piézomètres étudiés, conduit à des notes variant de 4 (Pz7), 6 (Pz4C ; Pz12), 10 (F5), et 11 (Pz13) mettant en évidence des conditions limitées voir inadéquates pour les processus d'AN.

## **5 CONCLUSIONS**

Ainsi, en ajoutant aux données issues de la surveillance réglementaire du site, quelques analyses spécifiques à l'évaluation de l'ANS (bilan des donneurs / accepteurs d'électrons, chlorures) et les données de géophysique, il est possible, à moindre coût de mettre en évidence de manière qualitative les zones au niveau desquelles l'AN est efficace.

Les données de géophysique permettent en outre d'avoir une vision globale, continue, et non perturbée du milieu, et ont un coût relativement modéré au regard des informations apportées. Les méthodes géophysique ont permis

- De localiser le panache de chlorures (panneau de résistivité), dû à la déchlorination des solvants chlorés, et par conséquent de localiser les zones de l'aquifère où la dégradation est efficace, ce qui a été confirmé par les analyses de qualité des eaux souterraines.
- De suspecter la présence de solvants chlorés dans la partie profonde de l'aquifère par polarisation provoquée spectrale.

Les deux analyseurs de gaz testés ont montré leur efficacité et leur complémentarité. Ils peuvent être utilisés pour orienter une campagne d'investigation par mesure des gaz en tête de piézomètre, ou pour mesurer directement la qualité des eaux souterraines sur site. Les seules limitations identifiées au cours des campagnes de mesure sont i) l'impossibilité de mesurer sur site tous les composés et ii) les seuils de détection relativement élevés du détecteur qui équipe le  $\mu$ GC.

Malgré les présomptions fortes d'existence de processus d'AN, le site a été abandonné pour la suite de l'étude, dans la mesure où la source non maîtrisée conduit à un impact important (plusieurs piézomètres impactés à l'extérieur du site avec de fortes concentrations en solvants chlorés). De plus le contexte local difficile, tant du point de vue de l'administration que du voisinage ne permet pas la mise à disposition du site pour la durée prévue du projet ATTENA (2 ans).

Quoiqu'il en soit, cette étude a permis de démontrer l'efficacité technico-économique des outils de terrain (géophysique, analyse de gaz) à améliorer le diagnostic de sites. En outre l'efficacité de l'ANS à résorber localement les COHV, permet d'envisager l'utilisation de mesures de gestion comme l'atténuation naturelle dynamisée sur les zones où l'AN n'a pu se mettre en place spontanément.

## **REFERENCES**

- [1] Béranger, S., Rollin, C., Saada, A., 2007. Synthèse des données historiques collectées en vue d'une étude de caractérisation de l'atténuation naturelle. Rapport BRGM-RP-55943-FR, 134 p., 70 fig., 5 tab.
- [2] Ajo-Franklin J. B., Geller J.T., Harris J. M., 2006, A survey of the geophysical properties of chlorinated DNAPLs, J. Applied Geophys, 59 (2006) 177– 189.
- [3] Gourry J.C. et Mathieu F. (2004) Reconnaissance géophysique des produits organo-chlorés dans des bassins de décantation, Bibliographie et étude préliminaire, BRGM/RC- 53937 FR, 66 p, 16 ill, 1 ann.
- [4] Saada, A., Benoit, Y. Guérin, V., Blanchet, D. Béranger, S., Gourry, J.C., Zornig C., 2008. Expérimentation de terrain en vue d'une étude de caractérisation de l'atténuation naturelle. Rapport BRGM-RP-56194-FR, 251 p., 81 fig., 47 tab., 6 annexes.

## **REMERCIEMENTS**

Les auteurs tiennent à remercier l'ADEME (convention n°0572C0063), ArcelorMittal Real Estate France, TOTAL et Rhodia pour leur soutien financier.