



**HAL**  
open science

**Mise en place de la circulaire du 8 Février 2007 :  
principes et modalités de gestion de sites  
potentiellement pollués**

Lucile Lab

► **To cite this version:**

Lucile Lab. Mise en place de la circulaire du 8 Février 2007 : principes et modalités de gestion de sites potentiellement pollués. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2015. dumas-01582683

**HAL Id: dumas-01582683**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01582683>**

Submitted on 6 Jan 2022

**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.

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Master 2 ISiE (Ingénierie et GéoSciences de l'Environnement) de l'EOST et du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES

Stage réalisé du 16 Février 2015 au 14 Août 2015

## Mise en place de la circulaire du 8 Février 2007, principes et modalités de gestion de sites potentiellement pollués

(Crédit photo : ANTEA Group)



Stagiaire

**LAB Lucile**

Promotion Manche 2012/2015

**Elève ingénieur ENGEES en 3<sup>ème</sup> année**

**Master II ISiE**

Parcours Gestion des Polluants

Université de Strasbourg

Maître de Stage

**GAROT Vincent**

**Ingénieur Chef de projet Sites et Sols Pollués**

ANTEA Group Bordeaux

19 Avenue Léonard de Vinci

33600 Pessac

Référents pédagogiques :

**BEAULIEU Emilie**

Tutrice pédagogique ENGEES

**LEMARCHAND Damien**

Responsable du master ISiE



### **Remerciements**

Je remercie mon maître de stage, Vincent Garot, pour m'avoir permis de réaliser ce stage au sein d'Antea Group. Merci surtout de m'avoir permis de travailler sur un sujet très intéressant et complet, qui vint compléter ma formation de façon concrète.

Je remercie également toute l'équipe du pôle environnement avec qui j'ai eu l'occasion de travailler : Sarah Kerouel, Delphine Roumat, Baptiste Grapton, Marion Daneau, Virginie Reynaud et Edwige Lafitte.

Merci pour vos remarques, vos conseils, et vos explications claires et précises sur les différentes études auxquelles j'ai pu participer durant ce stage.

Merci également à tous les employés d'Antea avec qui j'ai eu l'occasion de discuter, que ce soit le midi ou lors des pauses café.

Enfin je tiens à remercier François Richard et Christophe Filleau, pour leur bonne humeur, leur professionnalisme et leurs explications précises sur le terrain.

### **Résumé**

La circulaire ministérielle du 8 février 2007 est une méthodologie détaillée rédigée au terme d'une évaluation de la politique de gestion des sites pollués et permettant d'homogénéiser les prestations des différents experts travaillant dans ce domaine. Le présent rapport s'appliquera à présenter de manière concise cette méthodologie et étudier un cas concret où elle aura pu être appliquée. Il s'agit dans ce cas d'une pollution aux COHV (Composés Organo-Halogénés Volatils) des sols et eaux de nappe due aux activités d'un site industriel et dont les enjeux concernent les usagers situés hors sites ainsi que les travailleurs situés sur site. L'objectif de cette étude est d'affiner les connaissances en hydrogéologie du site ainsi que de définir les cibles potentielles afin de proposer des mesures de gestion adaptées.

### **Abstract**

The government notification of February 8<sup>th</sup>, 2007, written after evaluating the environmental policy about polluted soil management, is a detailed methodology allowing the standardization of experts' services. This report aims at briefly exposing this methodology, and studying a concrete case that I worked on. This study points at CVOC (Chlorinated Volatile Organic Compounds) pollution of soils and underground water, caused by industrial activities. This study aims to precise the Hydrogeology of the impacted site, along with defining potential targets, in order to propose suitable solutions.

## Table des matières

<b>Table des figures</b> .....	<b>6</b>
<b>Table des tableaux</b> .....	<b>7</b>
<b>Glossaire</b> .....	<b>8</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>9</b>
<b>1) Présentation de l'Entreprise</b> .....	<b>10</b>
1.1 Antea, une société internationale .....	10
1.2 Antea France .....	10
1.2.2 Historique .....	10
1.2.3 Compétences et domaines d'activité .....	11
1.2.4 Organisation et chiffre d'affaire .....	11
<b>2) Problématique et objectifs de travail</b> .....	<b>12</b>
2.1 Méthodologie appliquée .....	12
2.2 Exemple sur un cas concret .....	13
2.2.2 Contexte de l'étude .....	13
2.2.3 Objectifs de travail .....	15
2.3 Les solvants chlorés .....	15
2.3.1 Comportement et toxicité du PCE et du TCE .....	15
2.3.2 La dégradation du PCE .....	16
<b>3) Etude de vulnérabilité</b> .....	<b>18</b>
3.1 Usage des eaux souterraine et occupation des sols .....	18
3.2 Conclusion .....	20
<b>4) Suivi de la qualité des eaux souterraines</b> .....	<b>21</b>
4.1 Programme d'investigations et implantation des ouvrages .....	21
4.2 Programme analytique .....	22
4.3 Mode opératoire .....	22
4.4 Résultats et Analyses .....	23
4.4.1 Niveaux piézométriques .....	23
4.4.2 Paramètres physico-chimiques .....	25
4.4.3 Résultats .....	26
4.4.4 Interprétation .....	27
4.4.5 Synthèse sur la qualité des eaux .....	30

<b>5) Schéma conceptuel .....</b>	<b>31</b>
5.1 Sources .....	31
5.2 Vecteurs.....	31
5.3 Cibles .....	31
<b>6) Investigations futures.....</b>	<b>33</b>
6.1 Suivi de l'atténuation naturelle .....	33
6.1.1 Principe.....	33
6.1.2 Applicabilité.....	34
6.2 Mise en place d'une barrière hydraulique .....	34
6.2.1 Principes généraux .....	34
6.2.2 Applicabilité.....	36
6.2.3 Avantages et inconvénients .....	36
6.2.4 Limites .....	36
<b>7) Conclusion de l'étude.....</b>	<b>37</b>
<b>8) Synthèse : Discussion sur les apports professionnels de ce stage .....</b>	<b>38</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>39</b>

## Table des figures :

Figure 1 : Carte d'implantation des agences d'Antea Group (en bleu) et des sociétés membres d'Inogen (en vert) (source Antea Group) .....	10
Figure 2 : Organigramme d'Antea Group France-version de février 2015 (source Antea Group intranet).....	11
Figure 3 : Chaîne de dégradation du tétrachloroéthylène par voie anaérobie (source : Ineris).....	17
Figure 4 : Emplacement des principales zones sensibles en aval du site d'étude recensé lors de la visite de terrain du 15 avril 2015.....	18
Figure 5 : Tranchée remplie d'eau située en limite Nord du site.....	19
Figure 6 : Localisation des piézomètres du réseau de surveillance .....	21
Figure 7 : Esquisse piézométrique à partir des mesures réalisées sur les ouvrages captant les deux nappes .....	24
Figure 8 : Teneurs en COHV au droit des zones sources de pollution .....	27
Figure 9 : Teneurs en COHV au droit piézomètres situés en limite nord du site .....	29
Figure 10 : Teneurs en COHV au droit piézomètres situés en aval hors site .....	29
Figure 11 : Synthèse des analyses de COHV, éthène et éthane en mai 2015 .....	30
Figure 12 : Schéma conceptuel initial.....	32
Figure 13 : Schéma de principe du stripping (source BRGM).....	35

## **Table des tableaux :**

Tableau 1 : Puits recensés en aval hydraulique du site lors de la visite du 15 avril 2015.....	19
Tableau 2 : Piézomètres recensés en aval hydraulique du site lors de la visite du 15 avril 2015.....	19
Tableau 3 : Résultats d'analyse en COHV de la campagne de vulnérabilité .....	20
Tableau 4 : Niveaux piézométriques relevés lors de la campagne de surveillance des eaux souterraines.....	23
Tableau 5 : Niveaux piézométriques relevés depuis juin 2014 .....	23
Tableau 6 : Paramètres physico-chimiques mesurés en mai 2015 .....	25
Tableau 7 : Valeurs de Références utilisées pour l'interprétation des résultats d'analyse .....	26



## Glossaire

AEI :	Alimentation en Eau Industrielle
AEP :	Alimentation en Eau Potable
ARR :	Analyse des Risques Résiduels
BASIAS :	Base de données des Anciens Sites Industriels et Activités de Services
BASOL :	Base de données du BRGM qui concerne les sites pollués par les activités industrielles appelant une action des pouvoirs publics à titre préventif ou curatif
BRGM :	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BSD :	Bordereau de Suivi de Déchets
BTEX :	Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes
COHV :	Composés Organo-Halogénés Volatils
COT :	Carbone Organique Total
EQRS :	Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HCT	Hydrocarbures Totaux
ICPE :	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IEM :	Interprétation de l'Etat des Milieux
IGN :	Institut Géographique National
INERIS :	Institut National de l'Environnement industriel et des RISques
PCB :	PolyChloroBiphényles
LMR	Limite de Résidus Maximale
PLU :	Plan Local d'Urbanisme
PPM :	Partie Par Million
SSP :	Sites et Sols Pollués
ZAC :	Zone d'Aménagement Concerté
INRA :	Institut National de la Recherche Agronomique
ISDI :	Installation de Stockage de Déchets Inertes
PCE :	Tétrachloroéthylène
TCE :	Trichloroéthylène
Cis-1,2-DCE	Cis-1,2-dichloroéthylène
Trans-1,2-DCE	Trans-1,2-dichloroéthylène
CV	Chlorure de vinyle

## **Introduction**

La France a connu au cours du siècle dernier un développement conséquent dans différents secteurs d'activité comme l'industrie et l'agriculture. Ce développement industriel et agricole s'est manifesté au travers d'une production intensive au cours des dernières décennies, ainsi que de l'utilisation accrue des ressources naturelles et d'éléments chimiques (solvants, pesticides, engrais...) destinés à l'amélioration des processus industriels et l'augmentation du rendement des cultures.

Cette évolution s'est faite dans un but purement économique, sans considération des effets induits sur les ressources naturelles exploitées, plus précisément les nappes phréatiques et les sols, ni les problèmes que peuvent engendrer de telles substances sur la santé humaine. En effet, certaines substances rejetées dans le milieu naturel peuvent s'accumuler dans les sols, les eaux souterraines et les sédiments de rivière, induisant une source de pollution présentant des risques toxicologiques tant pour l'environnement que pour la population concernée.

Ce n'est qu'à partir des années 90 qu'une prise de conscience collective se fait au niveau de la pollution des sols et sous-sols, notamment par la pollution des eaux aux nitrates. Un recensement des sites potentiellement pollués (inventaires BASIAS et BASOL) est alors réalisé dans le but de mieux cerner l'ampleur du problème. Ces actions se sont accompagnées d'une réhabilitation systématique de l'ensemble des sites identifiés comme sensibles en considérant leur seul niveau de pollution intrinsèque, pour finalement aboutir à la fin des années 90 à une méthodologie axée sur la gestion des risques en fonction de l'usage.

La circulaire du 8 février 2007 du ministère en charge de l'environnement, recensant l'ensemble de la réglementation relative aux sites et sols pollués, est aujourd'hui reconnue comme état de l'art dans ce domaine. Cette méthodologie de gestion s'appuie sur des outils de diagnostic et d'évaluation quantitative des risques qui seront explicités et dont certains seront mis en œuvre tout au long de ce rapport.

J'ai réalisé mon stage dans le pôle Environnement du bureau d'études ANTEA Group à Pessac, où j'ai ainsi pu appréhender la méthodologie relative à la gestion des sites pollués et la mettre en pratique sur des cas concrets. Ce rapport s'appliquera à présenter la méthode de manière succincte dans un premier temps, puis de développer l'étude principale sur laquelle j'ai travaillé durant ce stage, à savoir la pollution par des solvants chlorés d'un site industriel et son extension hors site.

## 1) Présentation de l'Entreprise

### 1.1 Antea, une société internationale

Antea Group est une société internationale d'ingénierie et de conseil en environnement, partenaire du réseau mondial Inogen alliance environnementale internationale. Elle rassemble près de 3 700 collaborateurs dans 15 pays répartis en Europe, en Afrique et sur le continent américain, dont la Belgique, la Colombie, la France, les Pays-Bas, le Chad, et les Etats-Unis. Son chiffre d'affaires en 2014 s'élève à 368 millions d'euros.

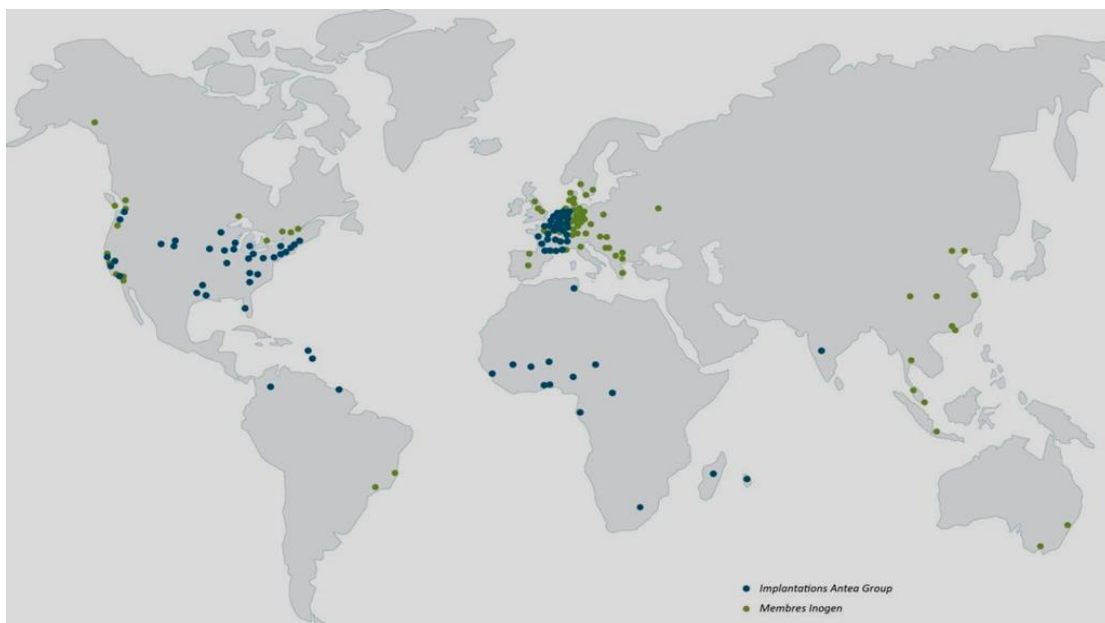


Figure 1 : Carte d'implantation des agences d'Antea Group (en bleu) et des sociétés membres d'Inogen (en vert) (source Antea Group)

### 1.2 Antea France

#### 1.2.2 Historique

Cette société fut créée au sein du BRGM<sup>1</sup> le 3 janvier 1994 sous le nom ANTEA. Cette entité du BRGM était constituée de techniciens et d'ingénieurs chargés, sous la double tutelle du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche et du ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, d'études annexes et complémentaires. Elle avait pour dénomination 4S pour « Services du Sol et du Sous-Sol ». Elle devint totalement indépendante en 2003, et fut intégrée en 2009 au groupe Oranjewoud, groupe néerlandais spécialisé dans les infrastructures de génie civil, le génie ferroviaire, le bâtiment, l'environnement et les loisirs.

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

### 1.2.3 Compétences et domaines d'activité

Il s'agit d'une société d'ingénierie intervenant dans les domaines de l'environnement, les infrastructures, l'eau et l'aménagement du territoire. Elle propose tout un panel de prestations allant du conseil et de l'assistance à maîtrise d'ouvrage à la maîtrise d'œuvre de conception et de réalisation, en incluant les études, pré-études, audit et diagnostic, ainsi que le management de la donnée environnementale.

### 1.2.4 Organisation et chiffre d'affaire

En France, Antea Group emploie plus de 550 experts, consultants et collaborateurs répartis dans plus de 24 implantations en métropole et dans les DOM. Son chiffre d'affaires en 2013 était de 62,8 millions d'euros et son Président Directeur Général est Jean-Philippe LOISEAU. L'organigramme d'Antea Group France est présenté en figure 2. L'organigramme fonctionnel pour la région Ouest-sud-ouest est présenté en annexe 1.

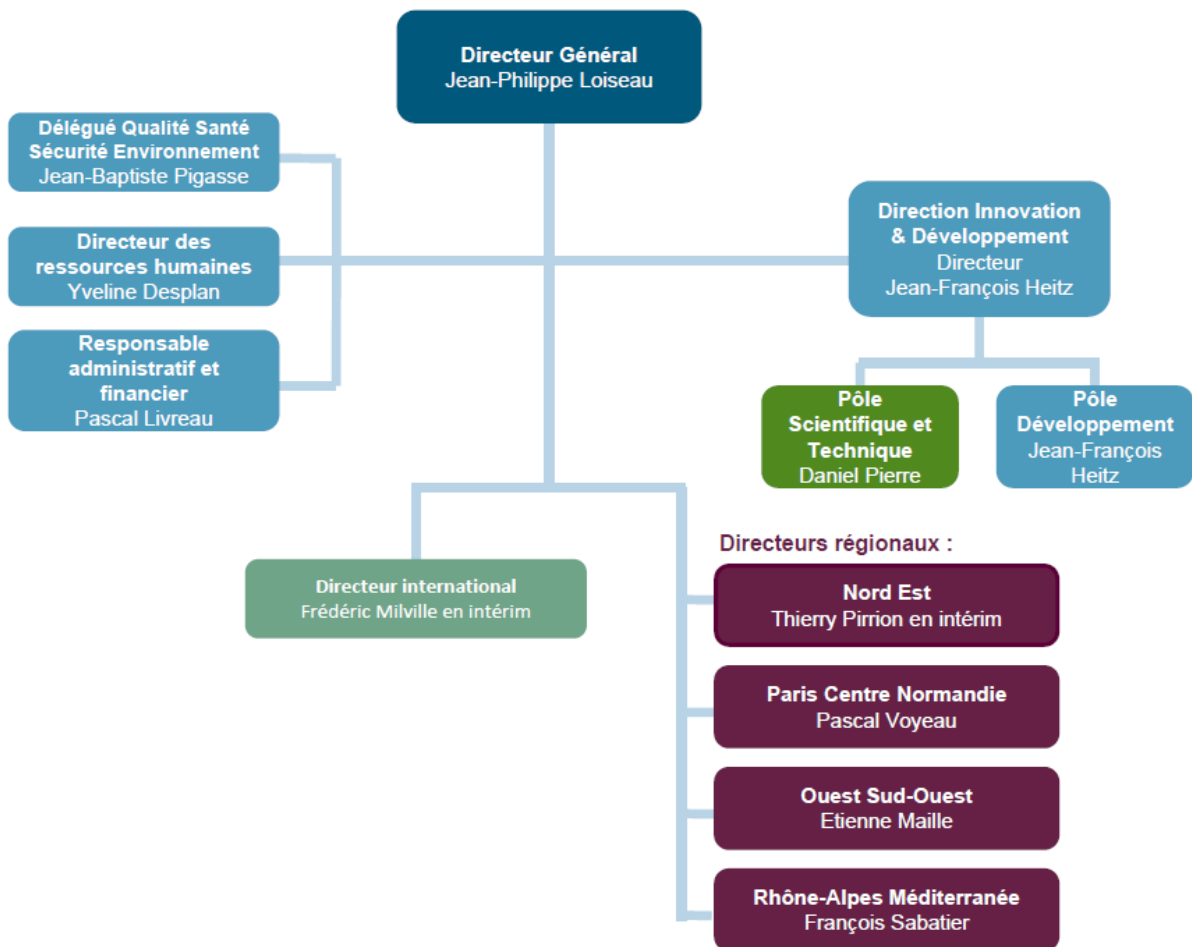


Figure 2 : Organigramme d'Antea Group France-version de février 2015 (source Antea Group intranet)

## 2) Problématique et objectifs de travail

### 2.1 Méthodologie appliquée

La problématique de mon stage concerne la gestion des sites pollués, et plus concrètement l'accompagnement d'un client face à un problème de pollution des sols, du diagnostic initial aux solutions de gestion. Cet accompagnement passe par une méthodologie précise définie par la circulaire du 8 février 2007, relative aux installations classées, à la prévention de la pollution des sols et à la gestion des sols pollués.

Cette circulaire a été rédigée au terme d'une évaluation de la politique de gestion des sites pollués, visant à accompagner les textes d'application de la loi du 30 juillet 2003 du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. La concertation de tous les acteurs concernés a abouti à l'élaboration de nouvelles modalités de gestion des sols pollués, qui prennent en compte le retour d'expérience acquis depuis une dizaine d'années dans la mise en œuvre des outils méthodologiques proposés dans le domaine des sites pollués.

Cette circulaire présente donc une méthodologie détaillée permettant d'homogénéiser les prestations des différents experts travaillant dans ce domaine. Deux démarches de gestion sont désormais proposées :

- la démarche d'**interprétation de l'état des milieux (IEM)**, visant à déterminer la compatibilité entre le milieu et les usages d'un site considéré. Elle est mise en place lorsqu'une pollution est suspectée ou mise en évidence au droit d'un site où les usages ne sont pas fixés (contexte hors site) ou lors d'une demande d'autorisation d'exploiter (pour une installation classée par exemple). Elle est suivie d'un plan de gestion lorsqu'il y a incompatibilité entre l'état du site et ses usages.
- Le **plan de gestion (PG)**, d'emblée requis sur site (où les usages sont fixés), lors de la cessation d'activité d'une installation classée avec ou sans changement d'usage, ou pour les projets de réhabilitation d'anciens terrains industriels hors installation classée. Ce plan de gestion présente les différentes mesures à mettre en place pour maîtriser la source de pollution, les impacts, et les aspects de nature organisationnelle (mise en place d'une surveillance régulière de l'état du site après travaux), et dresse un bilan coût-avantages pour les solutions proposées.

Pour chaque démarche, l'élaboration d'un **schéma conceptuel** (statique pour l'IEM, évolutif pour le PG) est nécessaire. Celui-ci définit la source de pollution, les vecteurs de cette pollution (eau, sol, air), ainsi que les cibles (populations concernées) et enjeux (impacts sur l'environnement).

Afin d'établir un diagnostic précis de site, une recherche bibliographique concernant le contexte historique (activités exercées sur ce site) et environnemental (géologie, hydrogéologie, hydrologie, zones sensibles et protégées, etc....) et une visite de site sont nécessaires. Cette recherche bibliographique permet de corrélérer les différentes pollutions détectées aux activités actuelles ou passées du site.

A l'issue de cette phase de recherche, des investigations sont réalisées (prélèvements d'eau et de sols) et les résultats d'analyse des échantillons prélevés sont ensuite interprétés en tenant compte du contexte environnemental et historique. Un schéma conceptuel peut alors être élaboré, et des mesures de gestion et de surveillance du milieu prises en conséquence. Un schéma récapitulatif de la méthode est présenté en annexe 2.

## **2.2 Exemple sur un cas concret**

### **2.2.2 Contexte de l'étude**

La réalisation d'un diagnostic s'impose dès lors qu'il existe une suspicion de contamination sur un site ou que celle-ci est avérée. Ce fut le cas pour l'étude principale sur laquelle j'ai travaillé durant ce stage, à savoir une pollution aux COHV (Composés Organiques Halogénés Volatils) sur un site industriel.

Cette pollution a été détectée suite à des études environnementales menées de 1999 à 2007. Un diagnostic de pollution complémentaire a été réalisé en 2011, mais le plan de gestion proposé, présentant des incertitudes quant à l'hydrogéologie du site (sens d'écoulement de la nappe), n'a pas été appliqué par l'industriel. Le contrat de passif avec l'ancien propriétaire du site ayant expiré en 2014, c'est au propriétaire actuel du site de prendre les mesures nécessaires afin d'empêcher la pollution de se répandre en hors des limites du site. Cet impact n'est en effet pas préjudiciable à l'industrie du site.

Dans ce cadre, Antea Group a été missionné par cette société pour procéder à des investigations complémentaires sur site et hors site, afin de préciser le contexte environnemental au droit du site et proposer de nouvelles mesures de gestion.

#### ***Contexte historique***

Le site d'étude a accueilli par le passé une activité industrielle de production nécessitant l'usage et le stockage de solvants chlorés (trichloroéthylène et tétrachloroéthylène principalement) pour des opérations de nettoyage. Cependant aucune fuite de cuves ou déversements accidentels n'ont été recensés.

Ce site fait l'objet d'un suivi sur la qualité du sous-sol sur site et hors site depuis 1999, via un réseau de piézomètres situés à l'intérieur et en aval hydraulique du site. A l'issue de ces études, trois zones sources de pollution ont été identifiées à l'intérieur du site :

- Une première source située à proximité d'une ancienne chaudronnerie et d'un ancien atelier de réparation de matériel ferroviaire, dont l'activité, aujourd'hui arrêtée, serait probablement à l'origine d'une pollution ancienne en PCE et TCE ;
- Une deuxième source située au droit d'une ancienne zone de stockage sur rétention de solvants chlorés usés (dont du PCE en quantité variable) en limite nord-ouest du site ;
- Une troisième source située au droit d'un atelier de nickelage et dégraissage encore en activité, où du PCE est stocké en fûts.

Pour deux de ces sources, les teneurs en solvants chlorés détectées étaient encore très élevées en 2014 par rapport aux campagnes de 2012, et ce malgré les phénomènes d'atténuation naturelle observés dans le sous-sol.

### **Contexte géologique**

La géologie au droit du site est constituée en surface de remblais sur une épaisseur hétérogène pouvant atteindre deux mètres par endroits. Ces remblais anthropiques reposent sur les terrains naturels suivants, présentés du plus récent (surface) au plus ancien (profond) :

- Argiles et tourbes, peu perméables, dont l'épaisseur est comprise entre 4 et 6 m ;
- Sables et graves sur environ 10 m d'épaisseur, reposant sur une base caractérisée par la présence de galets ;
- Marnes et calcaires (substratum) dont le toit se situerait à une profondeur comprise entre 15 et 19 m.

### **Contexte hydrogéologique**

Le site d'étude repose sur différents niveaux aquifères comportant les nappes d'eaux souterraines suivantes :

- La « nappe » des remblais, située entre 0,5 et 1,5 m de profondeur au droit du site, probablement discontinue et temporaire (nappe d'infiltration) ;
- La nappe libre des argiles et tourbes, où l'eau circule très peu ;
- La nappe captive des sables et graves, perméable et exploitée, permettant le transfert des polluants potentiellement présents et présentant donc une vulnérabilité forte.

La qualité de ces eaux souterraines est surveillée via 10 piézomètres sur site, 1 puits industriel sur site et 4 piézomètres hors site. Sur site, 4 piézomètres captent la nappe des argiles et tourbes tandis que le reste des ouvrages captent à la fois les argiles et tourbes et les sables et graves. Ces derniers sont à reboucher au droit du site car ils ne permettent pas de fournir des informations pertinentes quant au sens d'écoulement de ces nappes et leurs impacts respectifs.

Hors site, un piézomètre capte la nappe des argiles et tourbes et un autre celle des sables et graves. La coupe technique des deux autres ouvrages n'étant pas connue, la nature de la nappe captée ne peut être déterminée avec certitude. Les différentes tournées piézométriques réalisées sur les ouvrages captant les deux nappes tendent à montrer un sens d'écoulement de direction nord-nord-ouest. Les sens d'écoulement respectifs de chaque nappe ne sont cependant pas déterminés avec précision. De plus, le puits industriel situé sur le site et exploitant la nappe des sables et graves influe localement sur le sens d'écoulement des deux nappes.

### 2.2.3 Objectifs de travail

Les études environnementales précédemment réalisées sur ce site ont mis en évidence trois zones sources de pollution aux solvants chlorés impactant la qualité des eaux souterraines, ainsi qu'un phénomène de biodégradation de ces solvants au droit de ces zones. Ces polluants migrant hors site via les eaux souterraines, dont le sens d'écoulement reste à préciser, des mesures de gestion seront à prendre à l'issue du diagnostic afin d'empêcher la dispersion de ces composés hors site.

Afin de pouvoir proposer des mesures de gestion adéquates, un schéma conceptuel du site doit être réalisé. Celui-ci doit préciser :

- Le contexte environnemental ;
- les sources de la pollution détectée ;
- les vecteurs permettant à la pollution de se propager ;
- les cibles situées sur et hors site.

Le sens d'écoulement des deux nappes, vecteurs de pollution, reste à déterminer avec précision. Dans ce but, de nouveaux doublets de piézomètres, captant indépendamment la nappe des remblais et celle des argiles et tourbes, seront implantés sur et en aval du site. Ces ouvrages permettront de contrôler si un transfert via la nappe des argiles et tourbes est effectivement constaté.

Enfin, les cibles potentielles situées en aval du site, au droit du panache de pollution, sont à identifier : usagers de l'eau souterraine, occupation des sols...

**L'objet de l'étude à laquelle j'ai participé consiste donc à mettre à jour le schéma conceptuel du site via des investigations complémentaires réalisées sur site et hors site, afin de redéfinir les mesures de gestion et réaliser un pré-dimensionnement des travaux.**

## 2.3 Les solvants chlorés

### 2.3.1 Comportement et toxicité du PCE et du TCE

Les sources de pollution ainsi que les substances considérées ont été identifiées. Il s'agit de solvants chlorés, principalement du trichloroéthylène (TCE) et du tétrachloroéthylène (PCE, également appelé perchloroéthylène). Le PCE et le TCE sont des liquides utilisés ici comme solvants ou nettoyants à sec dans le nettoyage ou le dégraissage de métaux, et dans d'autres contextes dans la fabrication et la finition des textiles, le décapage des peintures... Ils ne sont pas présents naturellement dans l'environnement, les concentrations détectées dans les sols et les eaux souterraines sont donc d'origine anthropique.

Le PCE et le TCE sont plus denses que l'eau ( $d=1,6$  et  $d=1,4$  respectivement à  $20^{\circ}\text{C}$ ) et possèdent une solubilité relativement faible dans l'eau, ce qui leur permet de migrer plus rapidement que l'eau en sous-sol et de s'accumuler au fond de l'aquifère. Ils sont également très volatils et une grande partie de ces composés peut se retrouver dans l'air du sol en cas de pollution du sous-sol. L'adsorption du tétrachloroéthylène et du trichloroéthylène dans les sols dépend du



coefficient de partage, de la teneur en carbone organique du sol, du type de rejet (en flaque ou par ruissellement), et de sa concentration dans la phase liquide. Généralement, le PCE ne s'adsorbe que très peu dans les sols, le rendant ainsi très mobile et lui permettant d'atteindre rapidement les eaux souterraines. Cependant, il peut être fortement retenu dans les sols à teneur en carbone organique plus élevée et dans l'argile ( $K_{oc}(\text{PCE})=247 \text{ L.kg}^{-1}$ ). Le TCE est également mobile dans les sols et s'adsorbe aux particules de sol en fonction de l'humidité de ce dernier ( $K_{oc}(\text{TCE}) = 111 \text{ L.kg}^{-1}$ ).<sup>2</sup>

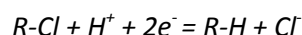
Ils sont absorbés chez l'homme par inhalation dans la majorité des cas mais également par voie cutanée avec la forme liquide. Ils peuvent alors provoquer une dépression du système nerveux central pouvant s'accompagner de difficultés respiratoires ou d'altérations hépatiques transitoires et de troubles cardiaques. Ils sont également cancérigènes pour l'homme et peuvent avoir des effets neurologiques dans le cas d'une exposition chronique.

Les études antérieures menées sur le site industriel ont mis en évidence une prédominance du PCE dans les horizons argilo-tourbeux, où les complexes argilo-humiques sont abondants. Il apparaît donc que la source de pollution en PCE et TCE resterait piégée dans la nappe des argiles et tourbes, tandis que les produits de dégradation, notamment le dichloroéthylène DCE et le chlorure de vinyle CV, peu solubles dans l'eau et plutôt mobiles dans les sols, se retrouvent plus majoritairement dans la nappe des sables et graves.

### 2.3.2 La dégradation du PCE

Le tétrachloroéthylène représente un composé « parent » pouvant être dégradé par déchloration réductrice selon un mécanisme d'atténuation naturelle en milieu anaérobie. Il peut ainsi donner naissance à des métabolites dont le chlorure de vinyle, composé très toxique, selon la chaîne de dégradation présentée en figure 3. Les molécules finales de dégradation sont l'éthène et l'éthane.

La déchloration réductrice, également appelée halorespiration, agit selon des processus et des cinétiques de réaction variant en fonction des conditions redox. Dans cette réaction, le solvant chloré joue le rôle d'accepteur final d'électrons. Il est donc réduit : un atome de chlore est remplacé par un atome d'hydrogène jusqu'au produit de déchloration final (éthène) selon le schéma suivant :



Les bactéries identifiées comme étant capables de déchlorer de façon complète le PCE en éthène sont des bactéries anaérobies strictes. L'énergie produite au cours de ce mécanisme est utilisée pour la croissance bactérienne. Elle est quantifiée par l'enthalpie libre (ou énergie libre de Gibbs  $G_r$ , chez les Anglo-saxons), avec pour la réduction du PCE  $\Delta G = -1500 \text{ J.mol}^{-1}$ . Le domaine probable de potentiel d'oxydo-réduction pour cette réaction se situe à des valeurs inférieures à -100 mV, la voie réductrice étant également possible pour des valeurs inférieures à 50 mV. Les teneurs en oxygène dissous doivent être extrêmement faibles (0,5 mg/L). Ce sont donc des conditions anaérobies, semblables aux conditions favorables à la méthanogenèse et à la réduction des sulfates.<sup>3</sup>

<sup>2</sup> « Tétrachloroéthylène, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques » INERIS, 2014

<sup>3</sup> « Biodégradation des solvants chlorés en conditions naturelles, mécanismes et caractérisation, synthèse bibliographique », INERIS, octobre 2004

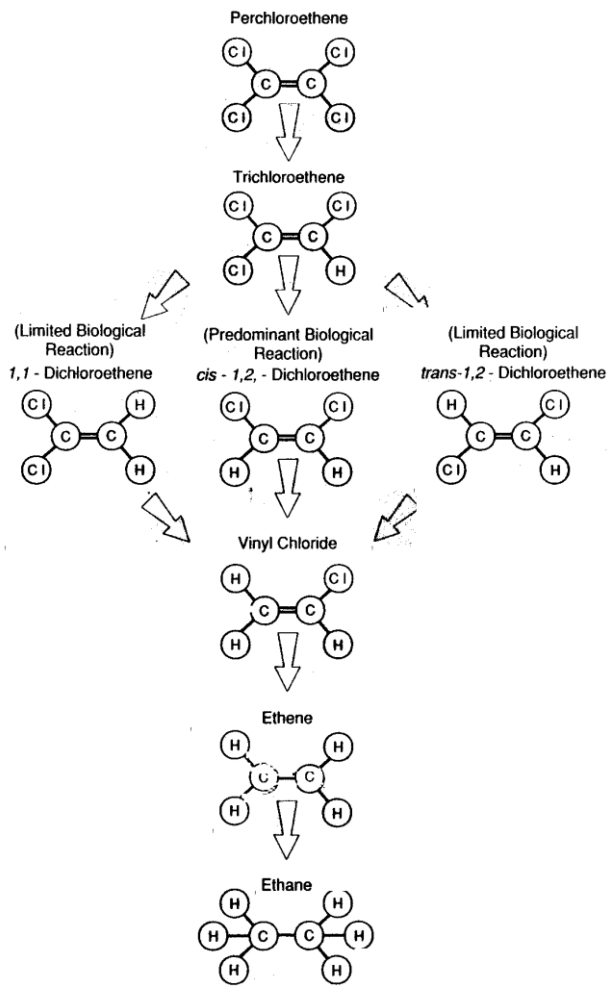


Figure 3 : Chaîne de dégradation du tétrachloroéthylène par voie anaérobie (source : Ineris)

La mise en évidence d'un tel phénomène se fait à l'aide des paramètres physico-chimiques du milieu tels que :

- Carbone organique total : des concentrations élevées dans l'aquifère permettent une déchloration réductrice ;
- BTEX et solvants chlorés : permettent de définir l'extension du panache ;
- Oxygène dissous : conditions anaérobies si  $[O_2] < 0,5 \text{ mg/L}$  ;
- Nitrates, sulfates : substrat pour la respiration en l'absence d' $O_2$  ;
- Chlorures, éthène, éthane : présence de dégradation du carbone organique et composés de dégradation ;
- Méthane : présence de fermentation ;
- Potentiel redox : si  $< 50 \text{ mV}$ , voie réductrice possible, si  $< -100 \text{ mV}$ , voie réductrice probable ;

Ces paramètres seront donc analysés lors des investigations sur le terrain.

### 3) Etude de vulnérabilité

#### 3.1 Usage des eaux souterraine et occupation des sols

Afin d'affiner le schéma conceptuel, étape essentielle avant la proposition de mesures de gestion, la définition des cibles de la pollution situées hors site est nécessaire. Pour ce faire, une visite de terrain visant à recenser les différentes zones d'activités et occupation des sols ainsi que les usages de l'eau souterraine en aval du site a été effectuée.

Au préalable, afin de préparer cette visite de terrain, j'ai recensé les différentes occupations de sol ainsi que les ouvrages déclarés exploitant les eaux souterraines situés dans le sens d'écoulement présumé de la nappe, via le PLU de la commune et la base de données BSS (Infoterre).



Figure 4 : Emplacement des principales zones sensibles en aval du site d'étude recensé lors de la visite de terrain du 15 avril 2015

La plupart des ouvrages ayant été construits plusieurs décennies auparavant, très peu ont été retrouvés, du fait du développement urbain autour de la zone d'étude. Les investigations de terrain effectuées ont cependant permis de recenser des puits individuels non référencés sur le site Infoterre. La profondeur ainsi que les usages des ouvrages répertoriés sont présentés dans le tableau 1. D'après les propos du propriétaire des puits 1 et 2, la plupart des habitants du quartier résidentiel situé à l'ouest du site possèderaient un puits individuel mais cette information n'a pas pu être vérifiée intégralement. Les ouvrages P1 et P7 ont pu faire l'objet d'un prélèvement, afin de préciser l'extension du panache.

**Tableau 1 : Puits recensés en aval hydraulique du site lors de la visite du 15 avril 2015**

Référence	Profondeur mesurée (m/sol)	Usage	Prélèvement
P1	2,5	Arrosage pelouse	oui
P2	3	Aucun	non
P7 Ferme	17,32	Pas d'usage actuel (pompe HS coincée dans le puits). Nouvel usage envisagé (à préciser à l'avenir)	oui

La visite de site a également permis de recenser les piézomètres présentés dans le tableau 2. Leurs coupes techniques étant incomplètes (profondeur de crépine non précisée), la nappe captée par ces ouvrages ne peut être déterminée avec exactitude.

**Tableau 2 : Piézomètres recensés en aval hydraulique du site lors de la visite du 15 avril 2015**

Référence carte	Référence BSS	Profondeur mesurée (m/repère)	Usage	Prélèvement
P3	08036X3771/P3	3,9	Mesure	non
P4	08036X3769/P1	4,58	Mesure	non
P5	08036X3770/P2	4,7	Mesure	oui
P6 (=Pz2 SNCF)	-	-	Rebouché	non

Un fossé recensé en limite nord du site atteint une profondeur de 0,2 m environ pour une longueur d'environ 200 m. Aucun exutoire ni sens d'écoulement apparent n'a été relevé ; l'eau de couleur rouille semble stagnante. Ce fossé se trouvant décaissé par rapport au site (environ 70 cm), il pourrait communiquer avec la nappe des remblais, dont l'épaisseur peut atteindre 2m au droit du site.



**Figure 5 : Tranchée remplie d'eau située en limite Nord du site**

Les résultats d'analyses en COHV des ouvrages prélevés, présentés dans le tableau 3, ont été comparés aux référentiels ci-dessous :

- Article R1321-7 (II), à R1321-17 et R1321-42 du Code de la santé Publique (2003) et annexes I et II de l'arrêté du 11 janvier 2007 pour les résultats d'analyses sur les eaux ;
- Les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour les eaux de boisson pour les résultats d'analyses sur les eaux.

Tableau 3 : Résultats d'analyse en COHV de la campagne de vulnérabilité

Nom échantillon			P1	P5	P7	Arrêté du 11/01/2007		OMS
	Nappe prélevée		Argiles et tourbes	Mixte				
Profondeur eau / sol (m)			0,83	0,32	1,51			
Profondeur puits / sol (m)			2,49	4,07	16,57			
Purge			Oui	Oui	impossible (ouvrage obstrué)	Annexe I (*)	Annexe II (**)	
COHV	Unité	Lq						
Dichlorométhane	µg/l	0,5	<0,5	<0,5	<0,5			20
Tétrachlorométhane	µg/l	0,1	<0,1	<0,1	<0,1			4
Trichlorométhane	µg/l	0,5	<0,5	<0,5	<0,5			100 (****)
1,1-Dichloroéthane	µg/l	0,5	<0,5	<0,5	<0,5			
1,2-Dichloroéthane	µg/l	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	3		30
1,1,1-Trichloroéthane	µg/l	0,5	<0,5	<0,5	<0,5			
1,1,2-Trichloroéthane	µg/l	0,5	<0,5	<0,5	<0,5			
1,1-Dichloroéthylène	µg/l	0,1	<0,1	<0,1	<0,1			
Chlorure de Vinyle	µg/l	0,2	<0,2	0,5	0,5	0,5		0,3
cis-1,2-Dichloroéthylène	µg/l	0,5	<0,50	3,9	<0,50			
Trans-1,2-Dichloroéthylène	µg/l	0,5	<0,50	<0,50	<0,50			
Somme cis/trans-1,2-Dichloroéthylènes	µg/l		n.d.	3,9	n.d.			50
Trichloroéthylène	µg/l	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	10 (***)		20
Tétrachloroéthylène	µg/l	0,1	<0,1	<0,1	<0,1			40

(\*) : Limites et références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux conditionnées (Annexe I de l'Arrêté du 11 janvier 2007)

(\*\*) : Limites de qualité des eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine (Annexe II de l'Arrêté du 11 janvier 2007)

(\*\*\*) : Limite pour le trichloroéthylène et le tétrachloroéthylène cumulés

(\*\*\*\*) : Limite pour la somme chloroforme, bromoforme, dibromochlorométhane et bromodichlorométhane cumulés

OMS : recommandations pour les eaux de boisson

Les valeurs sont inférieures à la limite de quantification du laboratoire pour l'ensemble des substances à l'exception du chlorure de vinyle, principal produit de dégradation du tétrachloroéthylène. Les teneurs détectées au droit de P5 et P7 sont en effet supérieures à la valeur guide de l'OMS (0,3 µg/L).

### 3.2 Conclusion

L'étude de vulnérabilité a permis de déterminer l'occupation des sols en aval du site ainsi que de recenser les usagers de l'eau souterraine.

En aval hydraulique (présumé) du site se trouvent des zones sensibles telles des zones de maisons ou d'habitations collectives, des zones d'activités et commerces, des espaces verts et espaces récréatifs (terrain de sport, bi-cross), ainsi que des crèches et écoles maternelles.

Les piézomètres recensés dans ces différentes zones ayant été détruits lors de l'aménagement du secteur, aucun usager direct de l'eau souterraine n'a donc été recensé. Cependant, la remise en service du puits P7, appartenant à la ferme pédagogique en aval proche du site et actuellement hors d'usage, étant prévue dans les années à venir, ce puits sera susceptible de représenter une cible de la pollution.

## 4) Suivi de la qualité des eaux souterraines

### 4.1 Programme d'investigations et implantation des ouvrages

Les activités et usages de l'eau souterraine en aval hydraulique du site ayant été identifiés, il convient désormais de caractériser les différentes nappes en termes d'écoulement et d'impact. A cette fin, une campagne de suivi des eaux souterraines s'est déroulée sur deux jours et a concerné 13 piézomètres (cf figure 6) répartis sur site et hors site, dont :

- 9 points de contrôle des eaux souterraines intérieurs au site :
  - Ouvrages captant les deux nappes : Pz1 (source n°1), Pz2 (source n°2), Pz3 (source n°3), Pz4, Pz5 ;
  - Ouvrages captant la nappe des sables et graves : Pz8bis et Pz9 (source n°3), Pz10bis et le puits industriel ;
- 4 points de contrôle des eaux souterraines extérieurs au site :
  - Ouvrages captant la nappe des sables et graves : Pz11 ;
  - Ouvrage captant la nappe des argiles et tourbes : Pz12
  - Ouvrages dont la coupe technique est inconnue : Pz1 SNCF, Pz3 SNCF.

Les deux derniers ouvrages étant profonds de 5 m environ, il est probable qu'ils interceptent la partie supérieure de l'aquifère des sables et graves.

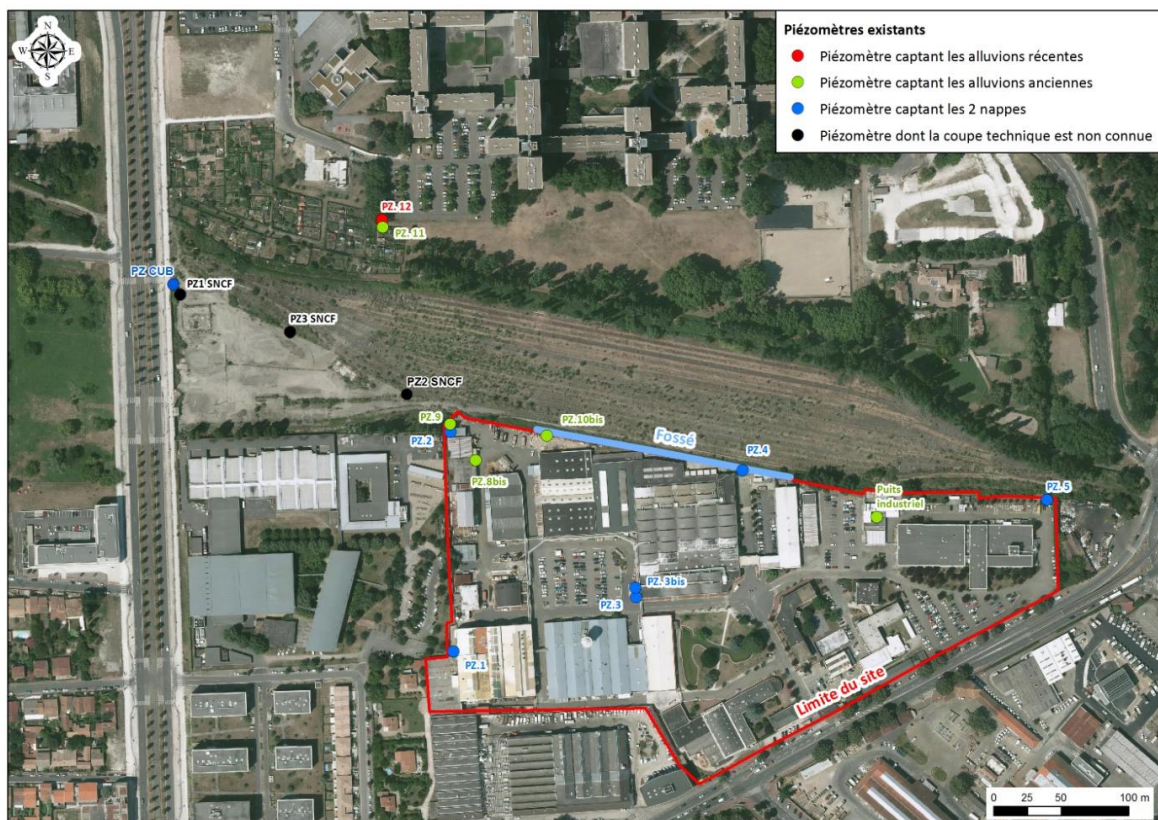


Figure 6 : Localisation des piézomètres du réseau de surveillance

N.B. : Les piézomètres PzCUB et Pz2SNCF ayant été détruit et rebouché respectivement, ils n'ont pu faire l'objet de prélèvements.

## 4.2 Programme analytique

Les 13 échantillons d'eau ont fait l'objet des analyses suivantes :

- Hydrocarbures totaux : HCT C<sub>10</sub>-C<sub>40</sub> ;
- BTEX : benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes ;
- COHV : dichlorométhane, trichlorométhane, tétrachlorométhane, 1,1-dichloroéthane, 1,2-dichloroéthane, 1,1,1-trichloroéthane, 1,1,2-trichloroéthane, 1,1-dichloroéthylène, chlorure de vinyle, cis-1,2-dichloroéthène, trans-1,2-dichloroéthylène, trichloréthylène, tétrachloroéthylène ;
- Métaux : arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, zinc ;
- Paramètres de suivi d'atténuation naturelle : méthane, éthène, éthane ;
- Minéralisation : chlorures, nitrates, sulfates.

Les hydrocarbures et BTEX permettent d'évaluer la source de carbone dans les sols. Les remblais sont impactés en métaux lourds, et peuvent donc impacter les eaux souterraines en fonction des connections entre les remblais et les argiles tourbeuses. L'éthène et l'éthane, derniers sous-produits de la dégradation du tétrachloroéthylène, ainsi que le méthane, permettent d'évaluer les mécanismes de biodégradation dans les sols. En effet, la présence de ces composés, ainsi que celle des chlorures et sulfates, indique que des conditions propices à une déchloration réductrice du PCE et du TCE, sont en place au droit des zones concernées.

## 4.3 Mode opératoire

Afin d'obtenir des résultats représentatifs de la qualité des eaux souterraines au droit du site et hors site, les opérations suivantes ont été réalisées sur chacun des piézomètres ayant fait l'objet d'un prélèvement :

- mesure du niveau statique ;
- renouvellement de l'eau du piézomètre par pompage (correspondant au renouvellement d'environ 3 fois le volume du piézomètre) avant prélèvement, afin d'obtenir un échantillon représentatif de la qualité de l'eau souterraine.

L'ensemble des échantillons a fait l'objet de mesures *in situ* de paramètres physico-chimiques servant d'indicateurs :

- de conditions propices à l'atténuation naturelle : potentiel rédox et oxygène dissous ;
- de différenciation de nappe : pH, conductivité électrique, température, potentiel rédox (Eh) et oxygène dissous.

Ils ont ensuite été conditionnés dans le flaconnage fourni par le laboratoire AGROLAB, puis acheminés vers celui-ci en glacières réfrigérées pour analyses. Les échantillons d'eau concernant les métaux ont été filtrés et acidifiés lors des prélèvements. Les ouvrages ont été prélevés depuis les moins impactés vers ceux les plus impactés, à l'aide de deux pompes distinctes, en renouvelant le tuyau d'exhaure à chaque prélèvement, afin d'éviter les contaminations croisées. De plus, le débit a été diminué au moment du prélèvement pour éviter d'éventuelles turbulences des écoulements susceptibles de favoriser le dégazage des composés volatils.

## 4.4 Résultats et Analyses

### 4.4.1 Niveaux piézométriques

Les niveaux piézométriques relevés lors de la campagne d'investigation sont présentés dans les tableaux ci-après. Afin de ne pas influencer les résultats, le puits industriel du site a été mis à l'arrêt quelques jours avant la campagne de prélèvement. Ainsi les niveaux piézométriques mesurés correspondent aux niveaux statiques des nappes.

Tableau 4 : Niveaux piézométriques relevés lors de la campagne de surveillance des eaux souterraines

Ouvrages	Horizon capté	Repère	Cote du repère	Profondeur ouvrage	Niveau eau mesuré	Cote piézométrique
			m NGF	m/repère	m/repère	m NGF
Pz1	Mixte	Bouche à clé	2,674	7,59	2	0,674
Pz2			2,234	7,24	1,58	0,654
Pz3			2,354	8,76	1,73	0,624
Pz4			2,484	7,98	1,8	0,684
Pz5		Haut du tube PVC	nd	7,64	2,05	nd
Pz8bis	Sables et graves	Bouche à clé	2,294	15,9	1,62	0,674
Pz9			2,244	18,95	1,6	0,644
Pz10bis		Regard fonte	2,414	18,31	1,715	0,699
Pz11		Haut du tube métallique	3,01	20,87	2,36	0,65
Pz12	Argiles et tourbes	Haut du tube métallique	3,04	6,77	1,3	1,74
Pz1SNCF	Indéterminé	Bouche à clé	1,861	5,06	1,235	0,626
Pz3SNCF			PE	1,592	5,17	0,92

Tableau 5 : Niveaux piézométriques relevés depuis juin 2014

Ouvrage	Horizon capté	Cotes piézométriques (en mNGF)		
		juin-14	oct.-14	mai-15
Pz1	Mixte	0,55	0,43	0,674
Pz2		0,55	0,41	0,654
Pz3		0,52	0,44	0,624
Pz4		0,48	0,46	0,684
Pz5		-	-	-
Pz8bis	Sables et graves	0,54	0,41	0,674
Pz9		0,54	0,42	0,644
Pz10bis		0,57	0,46	0,699
Pz11		0,58	0,44	0,65
Pz12	Argiles et tourbes	1,59	1,57	1,74
Pz1SNCF	Indéterminé	0,57	0,43	0,626
Pz3SNCF		0,59	0,45	0,672



On constate une hausse des niveaux piézométriques (en m NGF) depuis la campagne d'octobre 2014 de 22 cm en moyenne (avec comme extrema 17cm pour Pz12 et 26 cm pour Pz8bis). Cette information témoigne de la recharge de la nappe suite aux précipitations de l'hiver 2014-2015. Les niveaux de la campagne de mai 2015 ont également dépassé ceux de juin 2014 de 11 cm en moyenne (avec comme extrema 5 cm pour Pz1SNCF et 20 cm pour Pz4).

Les niveaux d'eaux relevés lors de la campagne de mai 2015 semblent indiquer un écoulement de direction nord-nord-ouest pour la nappe des alluvions anciennes. La carte piézométrique réalisée pour les ouvrages captant les deux nappes présentent un écoulement de direction nord-ouest. Ces résultats sont en adéquation avec le sens présumé d'écoulement de la nappe évalué à partir des données des études précédentes.

La direction d'écoulement des eaux souterraines contenues dans la nappe des argiles et tourbes n'a pu être déterminée lors de cette campagne, dans la mesure où seuls deux piézomètres captent cette nappe de manière certaine. De plus, en raison de l'incertitude concernant la nappe captée pour Pz3SNCF et celle concernant la cote piézométrique de l'ouvrage Pz5, ces ouvrages n'ont pas été pris en compte dans l'interprétation des données.

La différence entre les cotes piézométriques des ouvrages Pz11 et Pz12 (environ 1 m) traduit d'une part le caractère captif de la nappe des sables et graves en charge sous la nappe des argiles et tourbes, et d'autre part une drainance verticale descendante de la nappe supérieure vers la nappe inférieure.

L'esquisse piézométrique de la nappe des sables et graves est présentée en figure 9. Celle réalisée à partir des mesures effectuées sur les ouvrages mixtes est présentée en annexe 3.

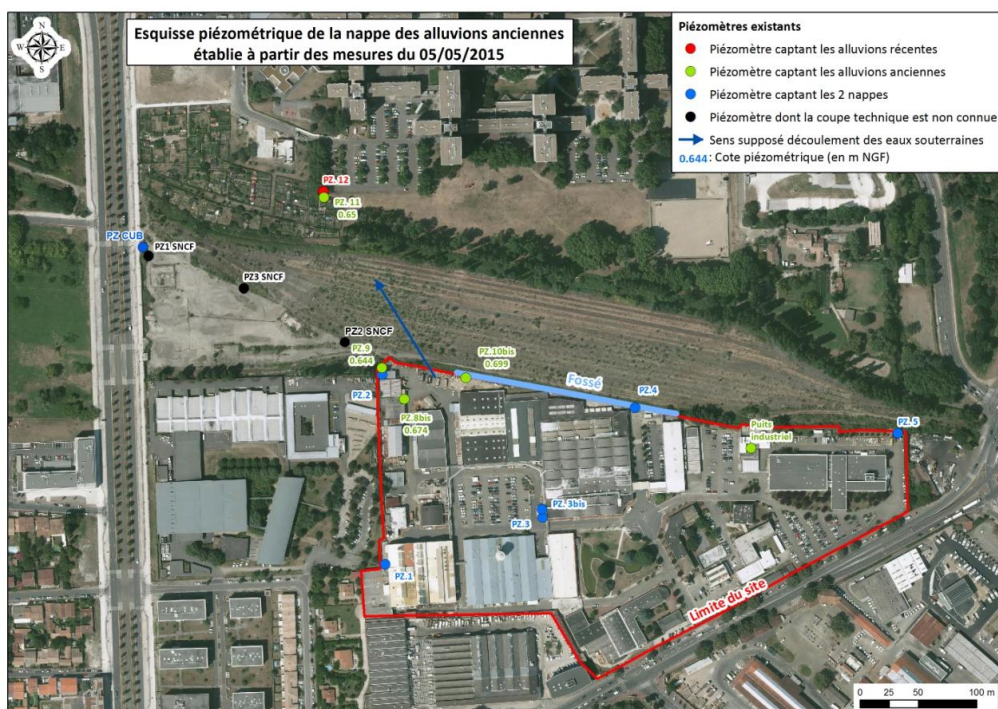


Figure 7 : Esquisse piézométrique à partir des mesures réalisées sur les ouvrages captant les deux nappes

#### 4.4.2 Paramètres physico-chimiques

Le Tableau 6 ci-après synthétise les résultats des mesures physico-chimiques relevées *in situ*.

Tableau 6 : Paramètres physico-chimiques mesurés en mai 2015

Ouvrages	Horizon capté	T	Conductivité	pH	Oxygène dissous	Eh
		°C	µS/cm	unité pH	mg/L	mV
Pz1	Mixte	15,5	1469	6,6	0	29
Pz2		15,4	1715	6,5	0	-144
Pz3		17,2	1977	6,6	0	-113
Pz4		17,9	1688	6,7	0	-182
Pz5		18,3	1468	7,1	6,2	42
Pz8bis	Sables et graves	16,1	1417	6,8	0	24
Pz9		15,4	1146	6,8	0	25
Pz10bis		16,4	886	6,7	0	71
Pz11		15,3	1782	6,7	0	-116
Puits Industriel		15	1720	7,1	non représentatif	-40
Pz12	Argiles et tourbes	14,8	1430	7	0	-99
Pz1SNCF	Indéterminé	16,7	1680	6,6	0	-141
Pz3SNCF		17,4	1033	6,5	0	-80

Ces mesures présentent :

- Des conductivités électriques du même ordre de grandeur sur l'ensemble des ouvrages, indiquant des eaux avec un taux de sels dissous voisin, avec une valeur plus basse pour Pz10bis (886 µS/cm) ;
- Un pH neutre et homogène compris entre 6,5 (Pz2, Pz3SNCF) et 7,1 (puits industriel et Pz5) ;
- Un potentiel redox positif représentatif d'un milieu oxydant au droit des ouvrages Pz1, Pz5, Pz8bis, Pz9 et Pz10bis, situés sur site, contrairement au puits industriel et aux ouvrages Pz2, Pz3, Pz4, présentant un potentiel redox négatif, associé à un milieu réducteur. Les ouvrages situés hors site présentent quant à eux des potentiels redox négatifs, indiquant un milieu plutôt réducteur en aval du site;
- Des teneurs en oxygène dissous nulles ou non représentatives, à l'exception de Pz5 (6,2 mg/L);

Les teneurs nulles ou non représentatives en oxygène dissous proviennent très certainement d'un dysfonctionnement de la sonde à oxygène lors de la campagne de mesure, et ne seront donc pas prises en compte pour l'interprétation de ces résultats.

### 4.4.3 Résultats

Les résultats de l'état de qualité des eaux souterraines sont interprétés en intégrant la nouvelle approche de la problématique des sites et sols pollués définie au travers de la circulaire ministérielle du 8 février 2007 et de ses annexes.

Les référentiels consultés sont les suivants :

- Article R1321-7 (II), à R1321-17 et R1321-42 du Code de la santé Publique (2003) et annexes I et II de l'arrêté du 11 janvier 2007 pour les résultats d'analyses sur les eaux ;
- Les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour les eaux de boisson pour les résultats d'analyses sur les eaux.

Tableau 7 : Valeurs de Références utilisées pour l'interprétation des résultats d'analyse

Paramètres	Arrêté du 11/01/2007		OMS
	Annexe I (*)	Annexe II (**)	
<b>Minéralisation</b>			
Chlorures	250	200	
Nitrates - N	50	100	50
Sulfates	250	250	
<b>Métaux</b>			
Cadmium (Cd)	5	5	3
Nickel (Ni)	20		70
<b>BTEX</b>			
Benzène	1		10
Toluène			700
Ethylbenzène			300
Somme Xylènes			500
<b>Hydrocarbures totaux</b>			
Hydrocarbures totaux C10-C40		1 000	
<b>COHV</b>			
Dichlorométhane			20
Tétrachlorométhane			4
Trichlorométhane			100 (****)
1,2-Dichloroéthane	3		30
Chlorure de Vinyle	0,5		0,3
Somme cis/trans-1,2-Dichloroéthylènes			50
Trichloroéthylène	10 (***)		20
Tétrachloroéthylène			40

(\*) : Limites et références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux conditionnées (Annexe I de l'Arrêté du 11 janvier 2007)

(\*\*) : Limites de qualité des eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine (Annexe II de l'Arrêté du 11 janvier 2007)

(\*\*\*) : Limite pour le trichloroéthylène et le tétrachloroéthylène cumulés

(\*\*\*\*) : Limite pour la somme chloroforme, bromoforme, dibromochlorométhane et bromodichlorométhane cumulés

OMS : recommandations pour les eaux de boisson

Le tableau de résultats est présenté en annexe 4.

Les résultats de cette campagne ont été comparés aux résultats des précédentes études afin de suivre l'évolution des teneurs en COHV et autres polluants au cours du temps. La comparaison de ces teneurs sur un même point permet également de mettre en évidence les mécanismes d'atténuation naturelle se produisant dans le sous-sol.

Les graphiques représentant l'évolution des teneurs en tétrachloroéthylène, trichloroéthylène, cis-1,2-dichloroéthylène et chlorure de vinyle, principaux éléments rencontrés, sont présentés en annexe 5.

#### 4.4.4 Interprétation

Les graphiques représentant les teneurs en COHV détectées lors de la campagne de mai 2015 pour chacun des piézomètres prélevés sont présentés en figure 8, 9 et 10. Les teneurs présentées en abscisse sont exprimées en  $\mu\text{g/L}$ . Les zones sources décrites ci-dessous correspondent à des milieux poreux contenant des COHV sous forme de phase organique et constituant des « réservoirs » de pollution.

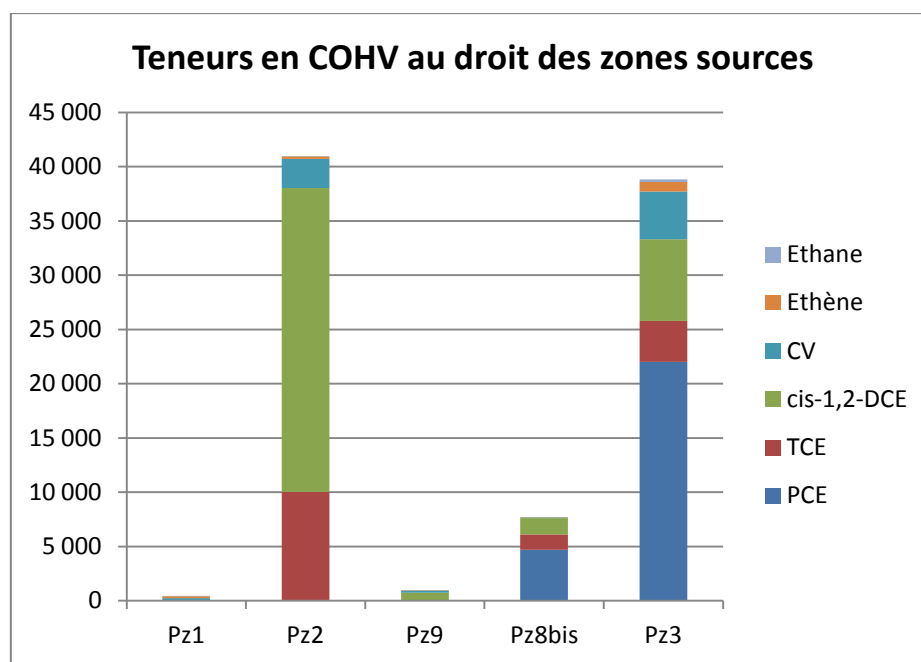


Figure 8 : Teneurs en COHV au droit des zones sources de pollution

#### Zone source 1

La zone source 1 est située au droit de l'ouvrage Pz1, qui capte les eaux souterraines des alluvions récentes et de la partie supérieure des alluvions anciennes.

Les concentrations en COHV au droit de cet ouvrage sont essentiellement marquées par le cis-1,2 DCE et le chlorure de vinyle ( $220 \mu\text{g/L}$ , supérieure aux critères de référence), dont les concentrations sont en légère hausse par rapport aux campagnes précédentes. Les composés d'origine (PCE et TCE) y sont quasiment absents, tandis que les autres COHV détectés restent stables.

La pollution en PCE et TCE au droit de cette zone, provenant très certainement d'activités de réparation de matériel ferroviaire ou de chaudronnerie aujourd'hui terminées, n'est donc probablement plus alimentée.

De plus, les concentrations en éthène en augmentation, et celles en méthane et chlorure, stables par rapport à la période 2010-2014, permettent de supposer que des mécanismes de biodégradation des COHV sont toujours présents au sein des eaux souterraines dans cette zone.

### **Zone source 2**

Les ouvrages Pz2 (mixte), Pz8bis et Pz9 (sables et graves), situés dans la zone source 2, présentent quant à eux des concentrations en COHV stables pour Pz2 et Pz9, et en légère hausse depuis 2014 pour Pz8bis. Les deux premiers ouvrages étant historiquement plus impactés que Pz8bis, les teneurs relativement marquées détectées lors de cette campagne sont à contrôler par un deuxième prélèvement sur cet ouvrage.

Concernant l'atténuation naturelle, la présence de TCE, DCE et CV et la quasi absence de PCE, les conditions réduites en Pz2 (Eh = -144 mV, présence de méthane) ainsi que les teneurs en éthène, chlorures, méthane et sulfates relativement stables depuis 2012 suggèrent comme pour la zone 2 que la biodégradation au droit de cette zone est toujours effective.

Cette zone se trouve en aval hydraulique de bâtiments de stockage de solvants chlorés, usagers ou non, notamment du PCE en quantité variable et de TCE en petite quantité (depuis 2001), avec des risques de déversements accidentels non exclus. Dans l'hypothèse où la PCE est la seule source primaire de pollution, il paraît probable que cette source ne soit plus alimentée. A contrario, si le PCE et le TCE sont tous deux à l'origine de la pollution, alors la source en TCE semble toujours alimentée (teneurs stables depuis 2013).

### **Zone source 3**

L'ouvrage Pz3, captant les eaux souterraines des argiles et tourbes et de la partie supérieure des sables et graves, présente des concentrations en composés « pères » (PCE et TCE) associées à leurs produits de dégradation (DCE et CV). Ces teneurs sont respectivement stables (PCE) et en baisse (TCE) par rapport à 2014, tandis que les concentrations en éthène sont en augmentation. Cet ouvrage se trouve de plus au sein de conditions réduites (Eh = -113 mV, 1 900 µg/L en méthane). La biodégradation des composés PCE et TCE est donc toujours effective au droit de cette zone.

La pollution au droit du piézomètre Pz3 provient très probablement de bâtiments en amont où l'activité de nickelage comprenant une phase de dégraissage est toujours présente et où des fûts métalliques de 200 L sont stockés (quantité : 1 m<sup>3</sup>). La présence stable de composé père suggère une source toujours active de pollution au droit de cette zone.

**Bordure nord du site**

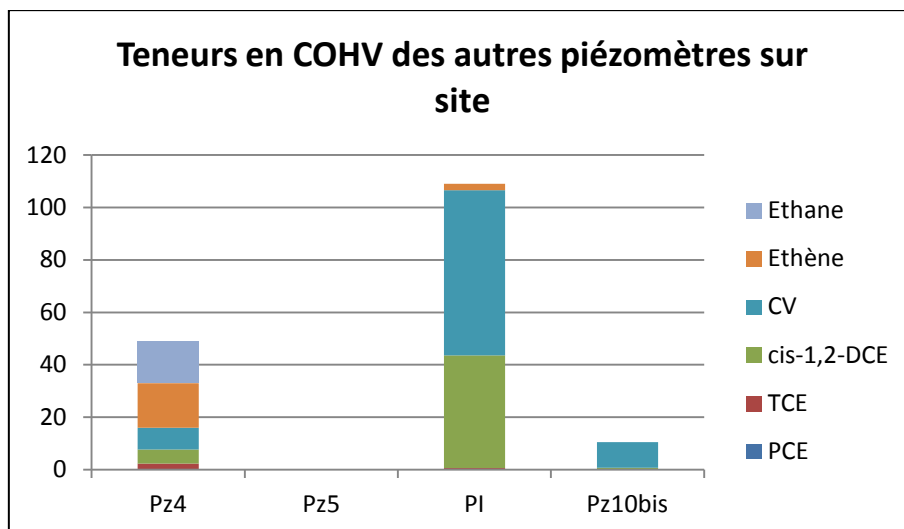


Figure 9 : Teneurs en COHV au droit piézomètres situés en limite nord du site

Afin d'obtenir des résultats d'analyse représentatifs des eaux souterraines en écoulement non influencé des ouvrages situés en bordure nord du site, le puits industriel a été mis à l'arrêt pendant plusieurs jours avant le début des prélèvements. Les teneurs observées en cis-1,2 DCE, CV et éthène au sein de ce dernier sont proches de celles mesurées en 2007-2008.

L'ouvrage Pz5 ne présente aucune trace de COHV en 2015, tandis que l'ouvrage Pz4 présente un impact modéré et stable en TCE, cis-1,2 DCE et CV.

**Aval hors-site**

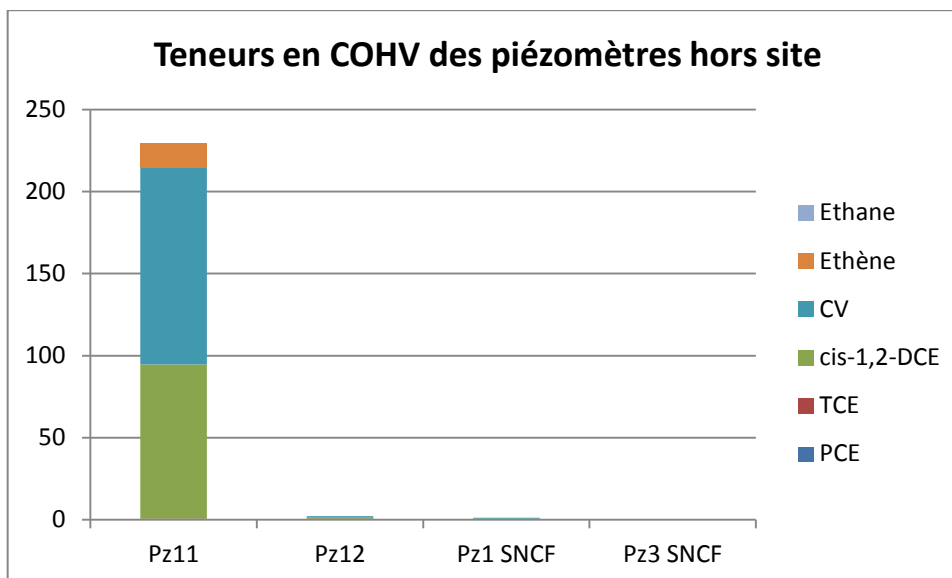


Figure 10 : Teneurs en COHV au droit piézomètres situés en aval hors site

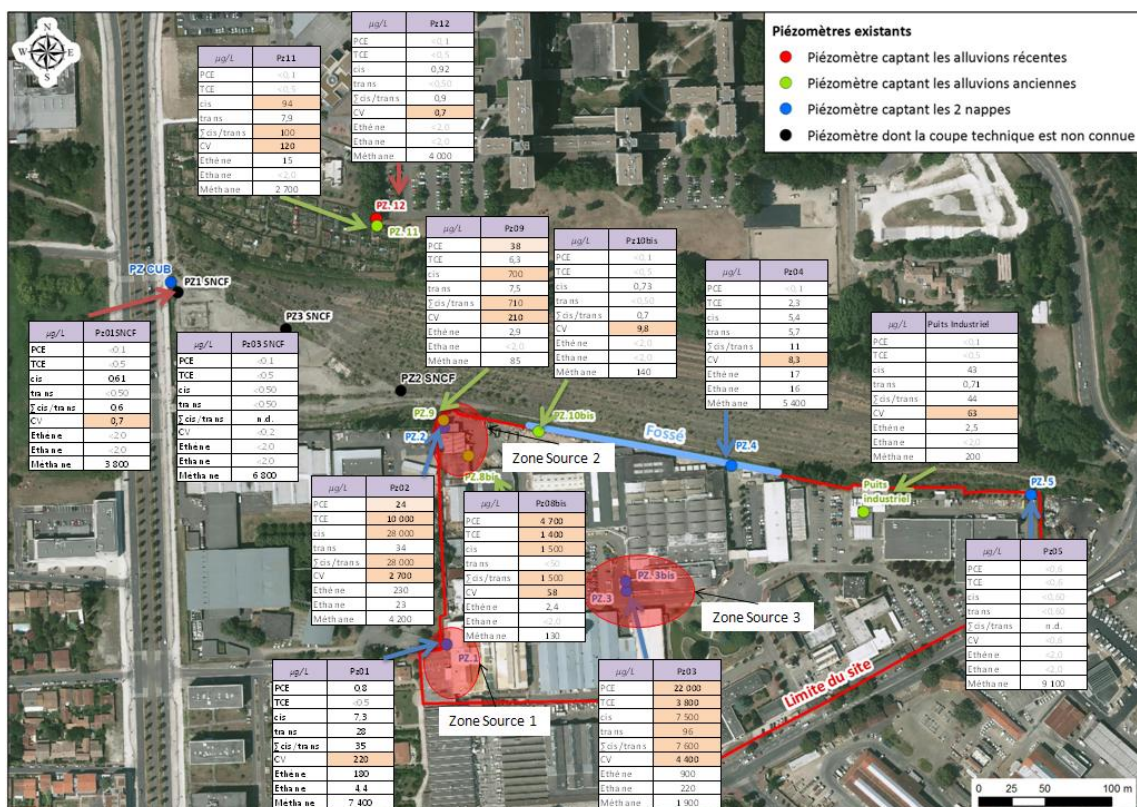
Les ouvrages Pz1 SNCF, Pz3 SNCF et Pz12, suivi depuis 2012, présentent des concentrations inférieures ou très proches des limites de quantification du laboratoire. L'ouvrage Pz11, situé à environ 150 m au nord-nord-ouest du site, présente dans la nappe des sables et graves des teneurs en cis-1,2 DCE (94 µg/L) et en CV (120 µg/L), supérieures aux critères de référence, en légère diminution par rapport à 2014. Ces ouvrages se situent de plus dans un milieu réducteur où la présence d'éthène a été détectée.

Ces résultats témoignent de la présence d'un panache de composés dissous établi vers l'aval hydraulique supposé du site, au sein de la nappe des sables et graves principalement.

#### 4.4.5 Synthèse sur la qualité des eaux

Ces analyses réalisées sur site et hors site s'inscrivent dans un programme de surveillance semestrielle mis en place par Antea Group en 2015 et qui se traduira par la pose de nouveaux piézomètres (doublons) captant la nappe des argiles et tourbes exclusivement et celle des remblais.

Globalement, les mécanismes de biodégradation des solvants chlorés semblent être toujours en place sur site, bien que la zone source 3 semble toujours alimentée en PCE. Le panache de composés dissous semble quant à lui se diriger au nord-nord-ouest du site, soit dans le sens d'écoulement de la nappe des sables et graves, très impactée au droit de Pz9. Les analyses futures de la nappe des argiles et tourbes permettront de définir plus précisément le comportement des polluants dans chaque compartiment.



## 5) Schéma conceptuel

A partir des informations collectées lors de l'étude de vulnérabilité ainsi que des données géologiques et hydrogéologiques actuellement en notre possession, un premier schéma conceptuel synthétisant les données « sources-vecteurs-cibles » a été réalisé.

### 5.1 Sources

Au vu de l'historique et des activités actuelles du site, ainsi que des études environnementales précédemment réalisées, 3 sources de pollution ont été définies :

- **Source 1** : située au niveau de Pz1, les principaux polluants détectés sont le 1,2-cis-dichloroéthylène et le chlorure de vinyle, avec des concentrations stables en 2015. Cette source, provenant probablement de l'ancienne activité exercée dans les bâtiments en amont hydraulique de Pz1, ne semble plus alimentée et les mécanismes de biodégradation y sont toujours présents;
- **Source 2** : située au niveau de Pz2, Pz8bis et Pz9, les principales substances détectées sont également des composés chlorés (DCE, CV et éthène), à des concentrations stables ou en légère augmentation par rapport aux années précédentes. Cette source est très certainement liée à d'anciens stockages de solvants chlorés. Il est difficile à l'heure actuelle d'affirmer si cette source est active ou non ;
- **Source 3** : localisée au niveau de Pz3, les COHV détectés sont le PCE et TCE associés à leurs produits de dégradation. Située en aval hydraulique d'un bâtiment où sont stockés des fûts de PCE, cette source est probablement toujours active.

Ces trois zones, plutôt localisées dans les argiles et tourbes, présentent des conditions physico-chimiques (potentiel redox négatif, absence d'oxygène) représentatives d'un milieu anaérobie propice aux mécanismes de biodégradation des COHV. La présence de produits de dégradation du PCE (DCE, CV et éthène) ainsi que les teneurs en méthane détectées au droit de ces zones suggèrent que ces mécanismes sont bien effectifs.

### 5.2 Vecteurs

Le vecteur de transfert de la pollution hors site est la nappe des sables et graves, dont le sens d'écoulement et l'impact en COHV sont connus. Le rôle de la nappe des argiles et tourbes, moins perméable, reste à déterminer quant au transfert latéral et en profondeur des solvants chlorés. Le rôle de la nappe des remblais dans le transfert des polluants reste également à déterminer.

### 5.3 Cibles

Les cibles situées hors site et identifiées lors de l'étude de vulnérabilité sont les populations situées en aval hydraulique du site. Bien qu'aucun usager direct des eaux souterraines n'ait été identifié à l'heure actuelle, la remise en marche future du puits P7 et l'aménagement futur du terrain au nord du site en font de cibles potentielles. Sur site, les cibles sont les travailleurs adultes exposés à d'éventuelles émanations toxiques.



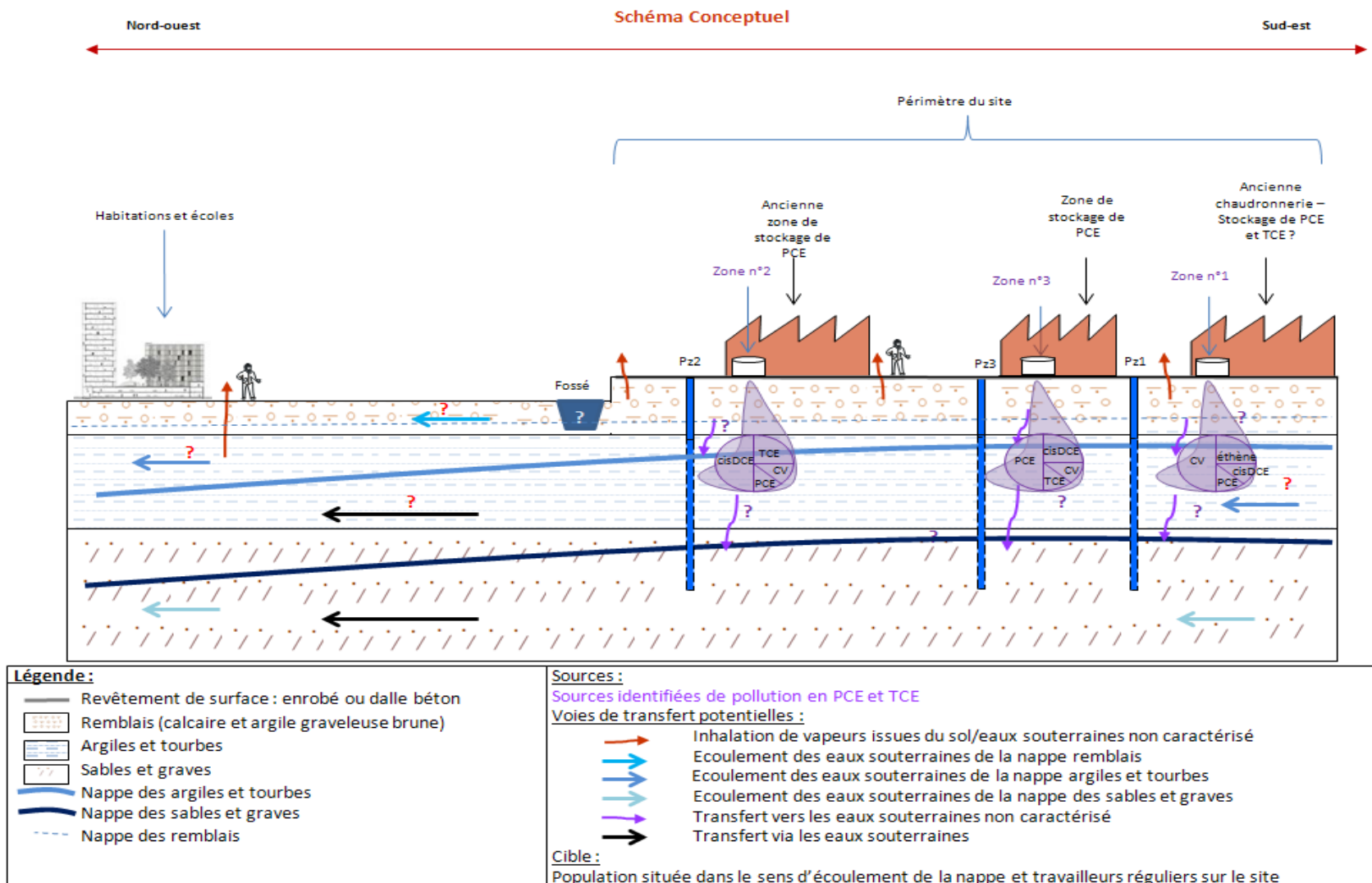


Figure 12 : Schéma conceptuel initial

## 6) Investigations futures

Les données manquantes pour compléter le schéma conceptuel et ainsi pouvoir proposer un pré-dimensionnement des mesures de gestion sont à ce stade de l'étude :

- L'impact de la nappe des remblais ainsi que son rôle dans le transfert des polluants ;
- Le sens d'écoulement de la nappe des argiles et tourbes ainsi que son rôle dans le transfert des polluants hors site ;
- Les impacts respectifs de chaque compartiment aquifère.

Au regard de contraintes d'emploi du temps de la part d'Antea Group et du client, je n'ai pu assister au cours de mon stage au pré-dimensionnement et à la proposition de mesures de gestion. Cependant, voici quelques pistes envisageables au regard du schéma conceptuel tel que présenté précédemment et des contraintes du site.

Les anciennes solutions de gestion proposées préconisaient la surveillance de l'atténuation naturelle au droit des zones sources sur site, et la mise en place d'une barrière hydraulique captant les deux nappes afin de maîtriser les voies de transfert hors site. Il convient en effet de maîtriser la source de pollution dans un premier temps, et/ou, si la configuration ne le permet pas, de confiner cette pollution en agissant sur les vecteurs. Cependant, la solution de confinement proposée ne prenait pas en compte les différents compartiments aquifères (mélange des deux nappes).

Au vu de la configuration du site et de la problématique en COHV, ces mesures seront conservées mais un pré-dimensionnement prenant en compte les nouvelles données sur l'hydrogéologie du site sera effectué.

### 6.1 Suivi de l'atténuation naturelle

#### 6.1.1 Principe

La définition la plus couramment utilisée de l'Atténuation Naturelle est celle de l'US EPA (1997), stipulant que l'AN est un « *processus se produisant naturellement dans les sols et les eaux souterraines, sans intervention humaine, visant à réduire la masse, la toxicité, la mobilité, le volume ou la concentration des contaminants dans ces milieux. Les processus pris en considération sont : la dispersion, la dilution, la volatilisation, l'adsorption, les mécanismes de stabilisation ou de destruction des polluants, qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques*<sup>4</sup>. »

Cette technique dite « passive » de traitement de sites et sols pollués peut être envisagée comme une mesure de gestion à part entière lorsque :

- le rapport coût/efficacité peut être évalué à l'instar de n'importe quelle autre technique de dépollution ;
- la source ne peut être supprimée par n'importe quel moyen dans des conditions comparables.<sup>5</sup>

<sup>4</sup> BRGM Rapport final : « Quelles techniques pour quels traitements – Analyse coûts-bénéfices » Juin 2010

<sup>5</sup> Dictionnaire environnement – www.actu-environnement.com

Cette technique nécessite donc des études préalables visant à évaluer la capacité des mécanismes de biodégradation à atteindre les objectifs de dépollution dans un délai fixé.

Plusieurs mécanismes d'atténuation naturelle des COHV sont identifiés, qu'ils soient destructifs (biodégradation et dégradation chimique) ou non destructifs, c'est-à-dire ne modifiant pas la masse des polluants dans un compartiment (convection, dispersion, diffusion moléculaire).

Les microorganismes responsables de cette dégradation sont des bactéries méthanogènes et sulfato-réductrices. Lors de cette réaction, les solvants chlorés sont utilisés comme substrats pour la croissance bactérienne. Le donneur d'électrons est le plus souvent le dihydrogène H<sub>2</sub>.<sup>6</sup>

### **6.1.2 Applicabilité**

Compte tenu de la persistance de teneurs en COHV sur site et hors site, et de la configuration des bâtiments au niveau des trois zones sources de pollution, des travaux de mise en place de mesures « actives » de traitement de source ne sont pas envisageables sur site.

Cette atténuation, mise en évidence au droit des trois zones sources, permet donc d'abattre les teneurs en aval (présence majoritaire de produits de dégradation hors site). Elle sera accompagnée d'une surveillance sur site et hors site afin de s'assurer que ces mécanismes de biodégradation permettent toujours d'aboutir aux objectifs de bioremédiation. Par ailleurs, afin d'assurer la comptabilité entre l'état du milieu hors site et ses usages actuels et futurs, la maîtrise des vecteurs de transfert devra être assurée via des mesures de confinement.

Dans le cas où des sources de pollution sont toujours actives sur le site (hypothèse soulevée pour les zones sources 2 et 3), l'industriel devra prendre les mesures nécessaires pour les maîtriser.

## **6.2 Mise en place d'une barrière hydraulique**

Lorsque la configuration du site ne permet pas d'agir activement sur les sources de pollution, une action sur les vecteurs de transfert des contaminants est requise. La solution adéquate ici est de confiner la pollution à l'aide d'une barrière hydraulique afin que celle-ci ne puisse s'étendre hors-site.

### **6.2.1 Principes généraux**

Une barrière hydraulique a pour but la mise en place d'un confinement hydraulique vertical de manière à isoler les contaminants et les empêcher de se propager. Cette barrière est ainsi placée entre la source de pollution et les eaux souterraines et/ou superficielles risquant d'être contaminées. Un suivi du maintien des mesures mises en place et de l'efficacité de ces mesures accompagne cette démarche.

---

<sup>6</sup> « Biodégradation des solvants chlorés en conditions naturelles, mécanismes et caractérisation, Synthèse bibliographique » INERIS – Octobre 2004

Le confinement vertical requiert des moyens matériels importants, rendant son utilisation marginale bien que cette technique, dérivée du génie civil, soit mature. Il en existe 3 variantes :

- **confinement périphérique complet** : le confinement vertical est positionné autour de la source de pollution ;
- **confinement en amont** : ce type de confinement, plus rare, est constitué d'une paroi imperméable positionnée en amont de la source de pollution afin de dévier les eaux souterraines et de diminuer les contacts eaux/polluants ;
- **confinement en aval** : ce type de confinement est le plus couramment utilisé, notamment lorsque les conditions du site ne permettent pas de traiter la pollution à la source.<sup>7</sup>

Dans tous les cas, des pompages d'eaux souterraines sont réalisés afin d'extraire les eaux contaminées pour les acheminer ensuite vers des unités de traitement adaptées. La méthode la plus adaptée pour le traitement des COHV in situ est le stripping, avec traitement des rejets gazeux, et éventuellement de la phase liquide, pour finition sur charbon actif. Ce procédé, largement commercialisé en France, consiste à extraire les composés volatils dissous dans l'eau en envoyant un flux d'air opposé en sens d'écoulement de l'eau tombant par gravité. Le temps de contact doit être suffisamment important pour permettre le transfert entre la phase gazeuse et la phase aqueuse.

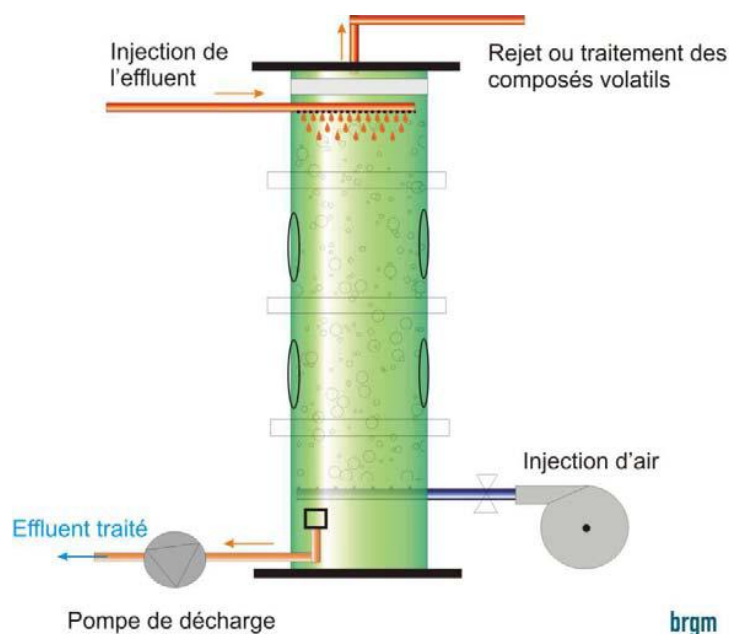


Figure 13 : Schéma de principe du stripping (source BRGM)

Les rendements épuratoires de ce procédé sont généralement supérieurs à 90%. Cette technique est très répandue et bien maîtrisée, avec des durées de traitement de quelques minutes maximum. Les coûts peuvent varier entre 0,10 et 0,55 €/m<sup>3</sup>. Les eaux souterraines ainsi traitées (respectant les normes de potabilité) seront ensuite réinjectées dans la nappe des sables et graves via le puits industriel du site.

<sup>7</sup> BRGM Rapport final : « Quelles techniques pour quels traitements – Analyse coûts-bénéfices » Juin 2010

### 6.2.2 Applicabilité

La barrière hydraulique est applicable à de nombreux types de polluants dont les COHV. Les données nécessaires au pré-dimensionnement de cet ouvrage sont les caractéristiques géotechniques et environnementales. Il s'agit dans un premier temps de s'assurer de la tenue des terrains (teneur en eau naturelle, cisaillement, pressiométrie, perméabilité...), et dans un second temps des impacts que cette technique peut avoir sur l'environnement, notamment :

- la compatibilité chimique entre les polluants et la nature du confinement ;
- la perméabilité du confinement ;
- l'impact sur les écoulements des différentes nappes ;
- la migration des polluants (diffusion, convection...).

En raison de la configuration des zones sources sur site, vraisemblablement situées au droit de certains bâtiments, un confinement amont ou périphérique ne peut être réalisé sans compromettre l'activité du site. C'est pourquoi un confinement aval sera réalisé en bordure nord du site afin d'empêcher la pollution de s'étendre hors site.

Les connaissances actuelles sur l'hydrogéologie du site suggèrent que la nappe des sables et grave, la plus profonde, serait la principale voie de transfert des contaminants hors site. Les futures données sur le rôle de la nappe des remblais et celle des argiles et tourbes permettront d'effectuer un pré-dimensionnement de la barrière hydraulique et des installations de traitement.

Les coûts relatifs à ces installations dépendent des techniques de confinement vertical. Les délais de réalisation se comptent en mois.

### 6.2.3 Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
Technique éprouvée, grande fiabilité et résultats significatifs	Pollutions non détruites
Flux de pollution retenue >95%	Moyens matériels conséquents
Large spectre de polluants pouvant être confiné	Haute technicité requise
Compétitivité coût/performance pour des volumes importants	Entretien et suivi nécessaire à très long terme

Au vu de la configuration du site d'étude et de la problématique en COHV hors site, la barrière hydraulique semble la solution adaptée au confinement de la pollution.

### 6.2.4 Limites

Pour que cette technique puisse être appliquée, il faut que la qualité des eaux souterraines en aval de la barrière hydraulique ainsi que les émanations gazeuses éventuelles soient compatibles avec les usages présents et futurs du site.

## **7) Conclusion de l'étude**

Le sujet de mon stage portait sur la mise en place de la circulaire du 8 février 2007, relative à la gestion et à la valorisation de sites et sols potentiellement pollués, méthodologie illustrée au travers d'un exemple concret : la pollution aux COHV d'un site industriel et son extension hors site.

Dans ce cas, de précédentes études avaient été réalisées, mais les mesures de gestion proposées montraient quelques insuffisances, notamment d'un point de vue hydrogéologique. Le but de la présente étude est donc de procéder à des investigations complémentaires afin de renforcer les connaissances environnementales du site et mettre à jour le schéma conceptuel, synthétisant les données sources-vecteurs-cibles. A l'issue de ce diagnostic, une mise à jour portant sur les vecteurs de pollution et les cibles ainsi qu'un pré-dimensionnement des mesures de gestion seront proposées.

Les démarches effectuées au cours de ce stage, une étude de vulnérabilité ainsi qu'une campagne de suivi des eaux, ont permis de répondre à certaines exigences du schéma conceptuel, à savoir les cibles situées hors site et la caractérisation des différents niveaux d'aquifères (sens d'écoulement et impact). La pose de deux doublets de piézomètres sur site, captant indépendamment la nappe des remblais et celle des argiles et tourbes, permettra de caractériser le rôle de ces deux nappes dans le transfert des polluants hors site. Une fois ces informations acquises, un pré-dimensionnement des mesures de gestion proposées sera effectué.

## **8) Synthèse : Discussion sur les apports professionnels de ce stage**

J'ai réalisé ce stage au sein de l'équipe environnement du bureau d'étude Antea Group, à l'agence de Pessac. Au cours de ce stage, j'ai eu l'occasion de travailler sur diverses études, qui m'ont permis d'appréhender la méthodologie de la circulaire ministérielle du 8 février 2007 de manière concrète et diversifiée. J'ai ainsi pu réaliser un audit environnemental passif ainsi que divers rapports de suivi de la qualité de l'eau souterraine. J'ai également pu participer à la réalisation de diagnostics environnementaux et accompagner les techniciens sur le terrain.

Ces diverses expériences m'ont permis d'améliorer mes qualités rédactionnelles et principalement ma capacité de synthèse. Cette dernière est particulièrement importante, lors de la rédaction d'études documentaires notamment, afin de ne pas noyer le client sous les informations. Il convient donc d'adopter un mode de rédaction didactique, succinct et accessible à n'importe quel lecteur. En effet les notions plus techniques telles que la géologie, l'hydrogéologie et l'hydrologie doivent être compréhensibles pour une personne néophyte.

La gestion du temps est également primordiale dans un bureau d'étude, où un temps fixé est imparti à chaque étude et où les aléas sont nombreux. Ceux-ci peuvent provenir du client, qui met un certain temps à fournir les documents nécessaires à la réalisation de l'étude. Il arrive aussi que des études nous soient confiées en plus de notre charge de travail pour aider un(e) collègue surchargé(e) de travail. La gestion du temps est facilitée par un planning détaillé grâce auquel le personnel connaît le temps alloué à chaque partie de l'étude, et qui permet de limiter le temps que chacun peut passer à une tâche. Cet outil permet de fixer des dates limites de rendu de rapport et de gérer son temps de manière efficace.

La communication a également son importance dans la gestion de projet, que ce soit avec le client, les sous-traitants, les collègues, les personnes détenant des informations nécessaires (ARS, mairies...) ou encore les particuliers (propriétaires privés de terrains impactés...). La relation avec le client est importante pour le bon déroulement de l'étude, en le tenant informé de son avancement et des démarches envisagées à l'issue du diagnostic.

Les différentes interventions effectuées sur le terrain furent une valeur ajoutée très importante puisqu'elles me permirent de découvrir différentes techniques de forages, de réaliser des prélèvements d'eau et de sols et d'assister à la pose de piézomètres. Le terrain est une composante forte de ce métier. Pouvoir confronter la théorie (ex : coupe géologique présumée) à la réalité de terrain permet de mieux appréhender les résultats et prendre du recul quant aux informations relatives au contexte environnemental que l'on peut collecter dans les différentes bases de données (notamment quant à la coupe géologique de certains ouvrages).

Enfin, le fait de travailler sur différentes études, et surtout avec différentes personnes, fut très enrichissant car chacun, de par son expérience personnelle, put m'apporter ses conseils en termes d'organisation et de travail, mais également en termes de relation avec les clients ou les sous-traitants.

## Bibliographie

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'énergie, **Guide méthodologique ministériel « Outils de gestion des sites potentiellement pollués », La visite du site** - Version 0, Février 2007, 38 pages

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'énergie, **Guide méthodologique ministériel « Outils de gestion des sites potentiellement pollués », Diagnostics du site** - Version 0, Février 2007, 274 pages

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'énergie, **Guide méthodologique ministériel « Outils de gestion des sites potentiellement pollués », Schéma conceptuel et modèle de fonctionnement** - Version 0, Février 2007, 32 pages

DENYS S. (2004) **Biodégradation des solvants chlorés en conditions naturelles-Mécanismes et Caractérisation-Synthèse bibliographique**, INERIS

ANDRES S., Bisson M., HOUEIX N. (2017), **Tétrachloroéthylène, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques**, Ineris, 89 pages

PICHARD A., Trichloroéthylène, **Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques**, INERIS, 2005, 62 pages

DROISSART-LONG A., HOUEIX N., MANIER N, **Chlorure de vinyle, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques**, Ineris, 87 pages

BRGM, **Rapport final, Quelles techniques pour quels traitement – Analyse coûts-bénéfices**, Juin 2010, 403 pages p. 77-87 et p

[www.developpement-durable.gouv.fr/Presentation,22076.html](http://www.developpement-durable.gouv.fr/Presentation,22076.html), Portail d'information du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'énergie

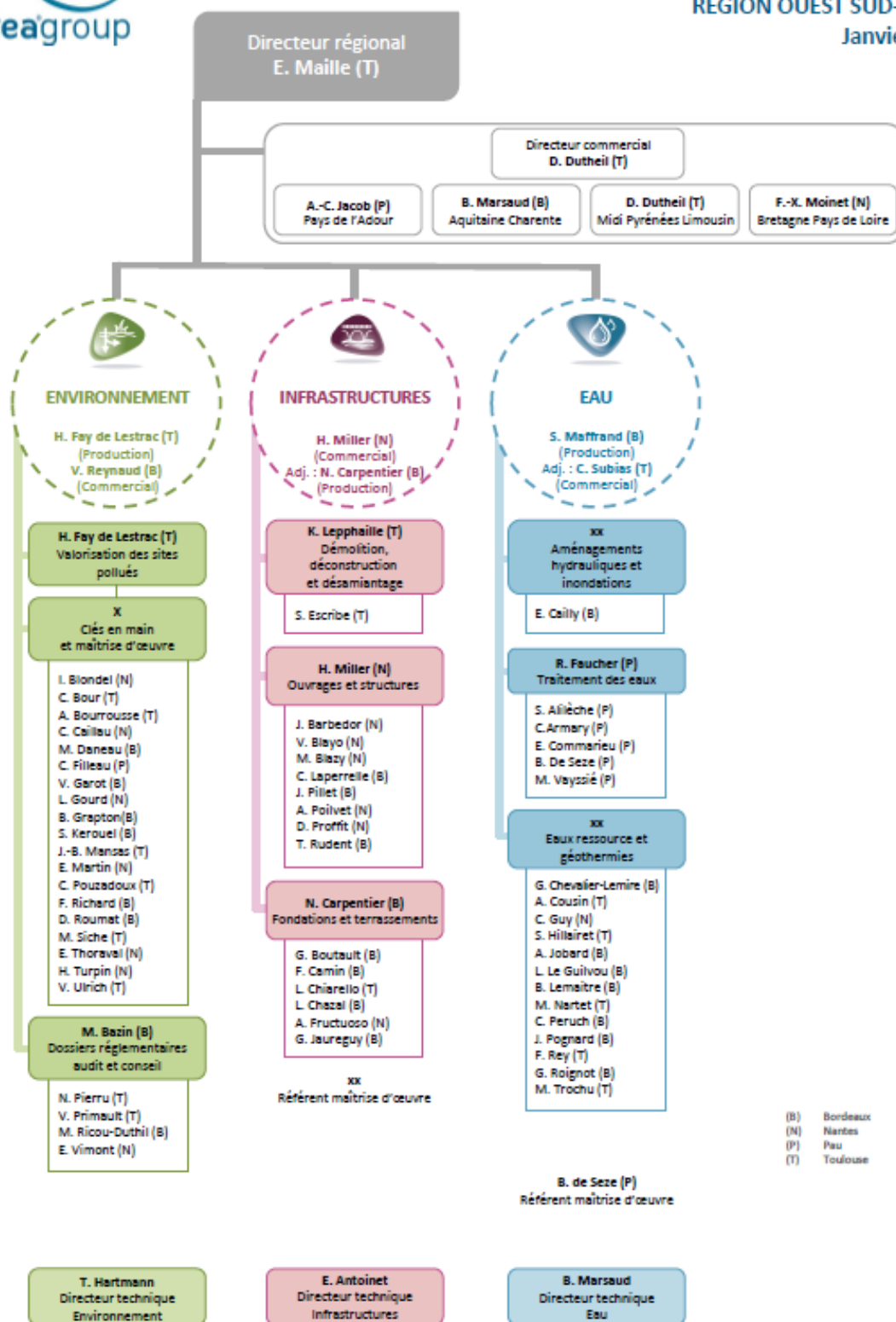
[www.infoterre.brgm.fr](http://www.infoterre.brgm.fr), Infoterre, le visualiseur des données géoscientifiques (Banque de Données du Sous-Sol ...) du BRGM,



# Annexes

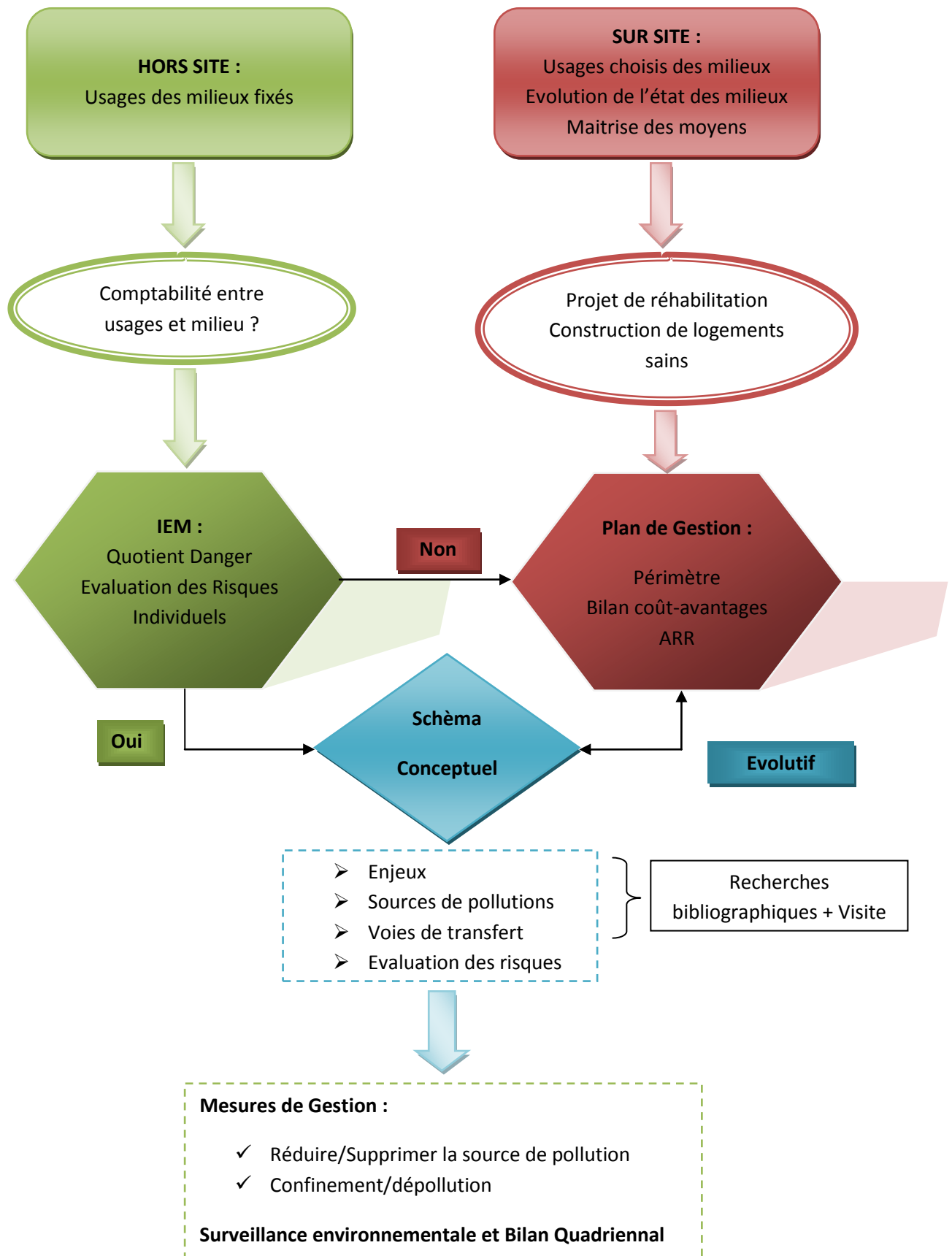
**ANNEXE 1 :**  
**ORGANIGRAMME REGION OSO D'ANTEA GROUP**

**(1 PAGE)**



**ANNEXE 2 :**  
**SYNTHESE DE LA METHODOLOGIE RELATIVE A LA GESTION DES SITES ET**  
**SOLS POLLUES**

**(1 PAGE)**



### ANNEXE 3 :

## ESQUISSE PIEZOMETRIQUE ETABLIE A PARTIR DES MESURES EFFECTUEES SUR LES OUVRAGES CAPTANT LES DEUX NAPPES



**ANNEXE 4 :**  
**RESULTATS D'ANALYSES DE LA CAMPAGNE DE SUIVI DES EAUX**  
**SOUTERRAINES**

**(2 PAGES)**

Mémoire de fin d'études

Mise en place de la circulaire du 8 Février 2007, principes et modalités de gestion de sites potentiellement pollués

Nom échantillon	PZ01	PZ02	PZ03	PZ04	PZ05	PZ08BIS	PZ09	PZ10BIS	PUITS INDUS.	PZ01SNCF	PZ03SNCF	PZ11	PZ12			OMS
Localisation	Zone source 1	Zone source 2	Zone source 3	Limite latéral est du site	Témoïn/bordur e est du site	Zone source 2	Zone source 2	Aval hydraulique sur site	Limite latéral est du site	Aval latéral hors site	Aval latéral hors site	Aval hydraulique hors site	Aval hydraulique hors site	Arrêté du 11/01/2007		
Nappe prélevée	Mixte					Sables et graves					Indéterminé		Sables et graves	Argiles et tourbes		
Température (°C)	15,5	15,4	17,2	17,9	18,3	16,1	15,4	16,4	15,0	16,7	17,4	15,3	14,8			
Conductivité (µS/cm)	1469	1715	1977	1688	1468	1417	1146	886	1720	1680	1033	1782	1430			
pH	6,6	6,5	6,6	6,7	7,1	6,8	6,8	6,7	7,1	6,6	6,5	6,7	7,0			
Eh (mV)	29	-144	-113	-182	42	24	25	71	-40	-141	-80	-116	-99	Annexe I (*)	Annexe II (**)	
Paramètre	Unité	Lq	Sur site							Hors site						
<b>COHV</b>																
Dichlorométhane	µg/l	0,5	<0,5	<50	<10	<0,5	<0,6	<50	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	20
Tétrachlorométhane	µg/l	0,1	<0,1	<10	<10	<0,1	<0,6	<10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	4
Trichlorométhane	µg/l	0,5	<0,5	<50	<10	<0,5	<0,6	<50	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	100 (****)
1,1-Dichloroéthane	µg/l	0,5	<0,5	42	520	0,5	<0,6	<50	<0,5	<0,5	3,1	<0,5	<0,5	1,3	<0,5	
1,2-Dichloroéthane	µg/l	0,5	<0,5	<50	<10	<0,5	<0,6	<50	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	3
1,1,1-Trichloroéthane	µg/l	0,5	<0,5	<50	<10	<0,5	<0,6	<50	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	30
1,1,2-Trichloroéthane	µg/l	0,5	<0,5	<50	<10	<0,5	<0,6	<50	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
1,1- Dichloroéthylène	µg/l	0,1	<0,1	160	25	<0,1	<0,6	<10	2,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Chlorure de Vinyle	µg/l	0,2	220	2 700	4 400	8,3	<0,6	58	210	9,8	63	0,7	<0,2	120	0,7	0,5
cis-1,2-Dichloroéthylèn	µg/l	0,5	7,3	28 000	7 500	5,4	<0,60	1 500	700	0,73	43	0,61	<0,50	94	0,92	
Trans-1,2-Dichloroéthyl	µg/l	0,5	28	34	96	5,7	<0,60	<50	7,5	<0,50	0,71	<0,50	<0,50	7,9	<0,50	
Somme cis/trans-1,2-Di	µg/l		35	28 000	7 600	11	n.d.	1 500	710	0,7	44	0,6	n.d.	100	0,9	50
Trichloroéthylène	µg/l	0,5	<0,5	10 000	3 800	2,3	<0,6	1 400	6,3	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	10 (***)
Tétrachloroéthylène	µg/l	0,1	0,8	24	22 000	<0,1	<0,6	4 700	38	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	40
<b>Paramètres d'atténuation naturelle</b>																
Éthène	µg/l	2	180	230	900	17	<2,0	2,4	2,9	<2,0	2,5	<2,0	<2,0	15	<2,0	
Éthane	µg/l	2	4,4	23	220	16	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	
Méthane	µg/l	2	7 400	4 200	1 900	5 400	9 100	130	85	140	200	3 800	6 800	2 700	4 000	



Mémoire de fin d'études

Mise en place de la circulaire du 8 Février 2007, principes et modalités de gestion de sites potentiellement pollués

Nom échantillon	PZ01	PZ02	PZ03	PZ04	PZ05	PZ08BIS	PZ09	PZ10BIS	PUITS INDUS.	PZ01SNCF	PZ03SNCF	PZ11	PZ12	Arrêté du 11/01/2007		OMS		
Localisation	Zone source 1	Zone source 2	Zone source 3	Limite latéral est du site	Témoïn/bordur e est du site	Zone source 2	Zone source 2	Aval hydraulique sur site	Limite latéral est du site	Aval latéral hors site	Aval latéral hors site	Aval hydraulique hors site	Aval hydraulique hors site					
Nappe prélevée	Mixte					Sables et graves					indéterminé		Sables et graves					Argiles et tourbes
Température (°C)	15,5	15,4	17,2	17,9	18,3	16,1	15,4	16,4	15,0	16,7	17,4	15,3	14,8					
Conductivité (µS/cm)	1469	1715	1977	1688	1468	1417	1146	886	1720	1680	1033	1782	1430					
pH	6,6	6,5	6,6	6,7	7,1	6,8	6,8	6,7	7,1	6,6	6,5	6,7	7,0					
Eh (mV)	29	-144	-113	-182	42	24	25	71	-40	-141	-80	-116	-99					
Paramètre	Unité	Lq	Sur site								Hors site						Annexe I (*)	Annexe II (**)
<b>Minéralisation</b>																		
Chlorures	mg/l	1	93	150	130	110	77	100	100	110	93	97	67	89	44	250	200	
Nitrates - N	mg/l	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	50	100	50
Sulfates	mg/l	1	<1,0	100	160	34	6,8	280	280	270	150	38	38	180	31	250	250	
<b>Métaux</b>																		
Cadmium (Cd)	µg/l	0,1	0,78	0,17	0,28	<0,10	<0,10	0,14	0,7	0,14	<0,10	0,28	<0,10	<0,10	<0,10	5	5	3
Nickel (Ni)	µg/l	5	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	20		70
<b>BTEX</b>																		
Benzène	µg/l	0,2	<0,2	<20	15	<0,2	<0,6	<20	<0,8	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	1		10
Toluène	µg/l	0,5	<0,5	<50	<10	<0,5	<0,6	<50	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5			700
Ethylbenzène	µg/l	0,5	<0,5	<50	<10	<0,5	<0,6	<50	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5			300
m,p-Xylène	µg/l	0,2	<0,2	<20	<10	<0,2	<0,60	<20	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2			
o-Xylène	µg/l	0,5	<0,50	<50	<10	<0,50	<0,60	<50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50			
Somme Xylènes	µg/l		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			500
<b>Hydrocarbures totaux</b>																		
Hydrocarbures totaux C	µg/l	50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50		1 000	
Fraction C10-C12	µg/l	10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10			
Fraction C12-C16	µg/l	10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10			
Fraction C16-C20	µg/l	5	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0			
Fraction C20-C24	µg/l	5	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0			
Fraction C24-C28	µg/l	5	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0			
Fraction C28-C32	µg/l	5	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0			
Fraction C32-C36	µg/l	5	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0			
Fraction C36-C40	µg/l	5	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0			

**ANNEXE 5 :**  
**EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN PCE, TCE, CIS-1,2-DCE ET CV**  
**DE 2007 A 2015**

**(2 PAGES)**

