

Etude de la qualité des eaux souterraines à proximité du champ captant de Villeneuve-la-Garenne (92)

Avis technique relatif à l'essai d'interprétation des
principaux résultats par la DDASS

BRGM/RP-56013-FR
décembre 2007

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du
BRGM n°07EAUG15

C. Nowak et J.J. Seguin

Vérificateur :

Nom : S. Colombano

Date : 10 décembre 2007

Original signé par S. Colombano

Approbateur :

Nom : M. Le Nir

Date : 18 décembre 2007

Original signé par M. Le Nir

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : Avis technique, Pollution des eaux souterraines, Solvants chlorés, Champ captant, Villeneuve-la-Garenne, Hauts-de-Seine, Atténuation naturelle.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

BRGM (2007) – C. Nowak et J.J. Seguin. Etude de la qualité des eaux souterraines à proximité du champ captant de Villeneuve-la-Garenne (92) - Avis technique relatif à l'essai d'interprétation des principaux résultats par la DDASS. Rapport BRGM/RP-56013-FR, 32 pages, 6 fig., 1 annexe.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

En 2004, une pollution en chlorure de Vinyle a été détectée dans la nappe du Lutétien sur des forages du champ captant de Villeneuve-la-Garenne (92) exploité par la Lyonnaise des eaux. La DDASS des Hauts-de-Seine (Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales) avait en 2005 sollicité du BRGM une assistance sur la caractérisation des aquifères au droit du champ captant et sur la réalisation de la campagne d'analyses et la production d'un rapport de résultats par le laboratoire CAR.

Dans le cadre des actions du BRGM d'appui aux administrations, la DDASS des Hauts-de-Seine sollicite de nouveau du Service Géologique Régional d'Ile de France un avis technique concernant l'étude de la qualité des eaux souterraines à proximité du champ captant de Villeneuve-la-Garenne (92), spécifiquement concernant l'essai d'interprétation des principaux résultats du rapport CAR par la DDASS.

Les points sollicitant l'appui du BRGM décrits dans le courrier du 28 août 2007 et dans le résumé de l'essai d'interprétation sont les suivants :

- Apporter un avis et des éventuelles compléments d'interprétation des résultats, notamment sur la discussion de l'hypothèse posée pour les COHV et sur une modélisation des transferts entre nappes ;
- Donner des propositions quant à des suites possibles en termes d'investigations complémentaires.

L'avis technique rappelle succinctement le contexte hydrogéologique du secteur de façon à mettre en avant **certaines spécificités** qui pourraient avoir une quelconque influence sur la compréhension de la migration des polluants dans le sous-sol. Il s'avère que les hétérogénéités du contexte géologique, la méconnaissance des écoulements souterrains au droit de la zone d'étude fortement influencée par les pompages du champ captant, ainsi que sa position géographique en bordure de la Seine **suggèrent fortement le calage d'un modèle hydrodynamique (en mode transitoire)**.

Afin d'apprécier l'hypothèse posée par la DDASS pour les COHV, l'analyse cartographique de certaines séquences de dégradation de substances chlorées observées sur la zone d'étude en octobre 2006 a rapidement été menée sur la zone d'étude. Pour chaque formation aquifère, elle met en évidence des secteurs sur lesquels des mécanismes de biodégradation peuvent être suspectés du fait de la présence de métabolites de dégradation. Toutefois, que ce soit pour les alluvions ou le Lutétien, il n'est pas possible d'établir de continuité spatiale entre les différents points d'eau qui suggérerait un unique panache. De même, seul le point A&D met en évidence une potentielle migration de polluants de la nappe des alluvions vers celle du Lutétien.

Dans l'état actuel des connaissances, il est difficile de valider de façon certaine l'hypothèse posée par la DDASS pour les COHV, seule la confrontation des résultats obtenus au cours de **prochaines campagnes de suivi des eaux souterraines avec ceux des paramètres physico-chimiques** analysés dans les ouvrages impactés pourrait être révélatrice de l'existence de mécanismes de biodégradation des COHV (pour les zones les plus polluées), à savoir :

- des conditions réductrices (Eh négatif) ;
- des processus de dénitrification (ratio $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ relativement élevé) ;
- des processus de réduction de fer ;
- la présence de méthane à des concentrations localement élevées, témoin d'une méthanogénèse en cours.

Pour valider le schéma conceptuel proposé, une **analyse complémentaire** doit être menée en prenant en compte :

- le sens d'écoulement des eaux souterraines ;
- les relations hydrogéologiques entre les différents aquifères concernées ;
- la non-utilisation par les industriels (y compris dans le passé) des produits de dégradation (Chlorure de Vinyle en particulier) au droit ou en amont hydraulique des « points noirs » observés ;
- la mise en place d'un suivi de l'évolution (dans le temps et l'espace) des concentrations des différentes substances chlorées ;
- La mise en évidence de paramètres microbiologiques concernant la densité de population bactérienne, ainsi que l'identification des populations présentes sur le site.

En vue d'améliorer la connaissance du milieu souterrain au niveau du champ captant, les **pistes de travail** suivantes sont proposées :

- Le calage d'un modèle hydrodynamique ;
- Des compléments de piézométrie ;
- La collecte de données analytiques complémentaires ;
- L'intégration des indicateurs d'une éventuelle dégradation (notamment via l'utilisation du logiciel BIOCLOR®) ;
- La réalisation d'analyses isotopiques.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Contexte hydrogéologique	9
2.1. DESCRIPTION SUCCINTE	9
2.2. SPECIFICITES A CONSIDERER DANS L'ANALYSE.....	9
2.2.1. Contexte très hétérogène de l'Yprésien	9
2.2.2. Contact Yprésien / Lutétien	10
2.2.3. Bancs de gypse des marnes et caillasses.....	10
2.2.4. Ecoulement des eaux	11
2.2.5. Risque inondation de la zone	11
2.2.6. Conclusions	11
3. Analyse des résultats de la campagne	13
3.1. RAPIDE RAPPEL DU CONTENU DE LA CAMPAGNE ANALYTIQUE.....	13
3.2. RESULTATS RELATIFS AUX COHV	15
3.2.1. Hypothèse de la DDASS	15
3.2.2. Biodégradation des solvants chlorés.....	15
3.2.3. Cas des Chloroéthylènes	16
3.2.4. Cas du 1,1-DCE	18
3.2.5. Cas des Chloroéthanes	20
3.2.6. Cas des Chlorométhanes	22
3.2.7. Conclusions	24
4. Synthèse concernant les propositions de pistes de travail pour l'amélioration de la connaissance du secteur	27
4.1. CALAGE D'UN MODELE HYDRODYNAMIQUE.....	27
4.2. COMPLEMENTS DE PIEZOMETRIE.....	27
4.3. COLLECTE DE DONNEES ANALYTIQUES COMPLEMENTAIRES.....	27
4.4. UTILISATION DU LOGICIEL BIOCLOR®.....	28
4.5. REALISATION D'ANALYSES ISOTOPIQUES	28

Liste des illustrations

Figure 1 : Cartes de localisation des forages d'eau	14
Figure 2 : Cartes de la séquence de dégradation du Perchloroéthylène.....	17
Figure 3 : Cartes de la séquence de dégradation du 1,1-DCE en Chlorure de Vinyle	19
Figure 4 : Cartes de la séquence de dégradation du 1,1,1-Trichloroéthane.....	21
Figure 5 : Cartes de la séquence de dégradation du Tétrachlorure de Carbone.....	23
Figure 6 : Cartes de présence de l'ammonium sur les forages d'eau analysés.....	26

Liste des annexes

Annexe 1 - Exemple de transformation des solvants chlorés dans les sols et les eaux-souterraines selon *Wiedemeier T.H., Rifal H.S., Newell C.J. and Wilson J.W. (1999) Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents, John Wiley & Sons, New York*

1. Introduction

En 2004, une pollution en chlorure de Vinyle a été détectée dans la nappe du Lutétien sur des forages du champ captant de Villeneuve-la-Garenne (92) exploité par la Lyonnaise des eaux. La DDASS des Hauts-de-Seine (Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales) avait en 2005 sollicité du BRGM une assistance sur la caractérisation des aquifères au droit du champ captant et sur la réalisation de la campagne d'analyses et la production d'un rapport de résultats par le laboratoire CAR.

Par courrier en date du 28 août 2007, la DDASS des Hauts-de-Seine (Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales), sollicite un avis technique du BRGM au titre des actions d'appui aux administrations concernant l'étude de la qualité des eaux souterraines à proximité du champ captant de Villeneuve-la-Garenne (92), et spécifiquement concernant l'essai d'interprétation des principaux résultats du rapport CAR par la DDASS.

Les deux points sollicitant l'appui du BRGM sont les suivants :

- Apporter un avis et des éventuelles compléments d'interprétation des résultats, notamment sur la discussion de l'hypothèse posée pour les COHV et sur une modélisation des transferts entre nappes ;
- Donner des propositions quant à des suites possibles en termes d'investigations complémentaires.

L'avis technique exposé dans le présent document s'appuie sur (1)- les documents mis à disposition par la DDASS 92 dans le cadre de cette demande, à savoir :

- Centre d'Analyses et de Recherches (CAR). (2006). Consultation pour la réalisation d'analyses de chlorure de Vinyle et de 18 autres paramètres sur les nappes alluviales et du Lutétien. Rapport H06181/A. 9 p., 2 annexes.
- Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales des Hauts-de-Seine (DDASS 92). (août 2007). Etude de la qualité des eaux des nappes alluviales et du Lutétien à proximité du champ captant pour l'alimentation en eau potable de Villeneuve-la-Garenne (étude de novembre à janvier 2006). Essai d'interprétation des principaux résultats par la DDASS. Réf. SE/07/BVG/DT. 44 p. 4 annexes.
- Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales des Hauts-de-Seine (DDASS 92). (août 2007). Etude de la qualité des eaux des nappes alluviales et du Lutétien à proximité du champ captant pour l'alimentation en eau potable de Villeneuve-la-Garenne. Cartographie des résultats. 17 p.

(2)- ceux issus du précédent appui et/ou sur les rapports existants au sein du Service Géologique Régional d'Ile-de-France :

- ATOS Environnement – Résultats des campagnes de suivi des eaux souterraines réalisées par sur 3 piézomètres du site HOWMET en mars 2004, septembre 2004, mars 2005, août 2005, mars 2006 et octobre 2006.
- BRGM. (2006). Assistance pour le suivi et l'interprétation d'une campagne d'analyses des eaux souterraines dans la boucle de Gennevilliers - Préparation de la campagne d'analyses des eaux souterraines dans la boucle de Gennevilliers. Compléments pour l'extension de la campagne. SGR/IDF 06 FA/JFV/CN. 54 p.
- BRGM (2005 - 2006) Appui à la DDASS dans le cadre du programme d'appui aux Services chargés de la Police de l'eau.
- Lemière, B., Seguin, J.J., Le Guern, C., Guyonnet, D., Baranger, P. (2001). Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes – Applications dans un contexte d'Evaluation Détaillée des Risques pour les ressources en eau. BRGM/RP-50662-FR. 103 p.
- Nowak C., Mossmann J.-R., Saada A., 2002. Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle : mécanismes et mise en œuvre. BRGM/RP-51960-FR, 97 p., 9 fig., 10 tabl., 4 ann.
- BRGM (2004). La nappe d'eau souterraine de l'Yprésien en Ile de France - Bilan et prospective. BRGM/RP-53437-FR.

Aucune visite de terrain n'a été menée.

2. Contexte hydrogéologique

Cette partie vise principalement à faire un rapide rappel du contexte hydrogéologique du secteur étudié **en mettant l'accent sur ses spécificités**. L'information contenue dans ce chapitre provient principalement des travaux réalisés lors des précédents appuis du BRGM qui s'inspiraient eux-mêmes d'une synthèse réalisée en 2004 pour le compte du SEDIF - Syndicat des Eaux d'Ile de France - (BRGM/RP-53437-FR).

2.1. DESCRIPTION SUCCINTE

Le champ captant, situé sur les communes de Villeneuve-la-Garenne et de Gennevilliers, est composé d'un forage dans l'Albien, de 9 à l'Yprésien et de 8 au Lutétien. La pollution en chlorure de vinyle identifiée ne concerne pas le forage captant l'Albien profond de 782 mètres.

Au plan hydrogéologique on retrouve à l'échelle locale, au voisinage du champ captant, les formations aquifères décrites à l'échelle régionale, en particulier les calcaires grossiers du Lutétien inférieur séparés des sables de l'Yprésien sous-jacents par les Argiles de Laon.

A l'échelle du champ captant, la première nappe rencontrée en partant de la surface est la nappe libre des alluvions sablo-graveleuses qui n'est pas exploitée par la Lyonnaise des eaux. Ensuite, le toit des calcaires du Lutétien se rencontre à une profondeur comprise entre 20 et 30 mètres. Ces calcaires sont séparés des formations plus superficielles (alluvions et Sables de Beauchamp) par les Marnes et Caillasses du Lutétien supérieur. Les niveaux de la nappe du Lutétien, mesurés en périodes de fortes réductions des prélèvements, sont compris entre 22 et 24 m NGF, voisins de ceux de la nappe des alluvions. En dehors de ces périodes, les différentiels de niveaux entre les 3 nappes (celle des **alluvions**, celle du **Lutétien** et celle de **l'Yprésien**), induisent une drainance orientée vers l'Yprésien (flux d'eau descendants).

2.2. SPECIFICITES A CONSIDERER DANS L'ANALYSE

2.2.1. Contexte très hétérogène de l'Yprésien

La nappe d'eau souterraine de l'Yprésien est contenue dans les formations sableuses définies en plusieurs lieux (Cuise, Soissons, Auteuil) qui sont décrits « en lentilles ». Leur continuité est difficile à suivre, voire impossible dans les forages, principalement sous Paris, malgré le grand nombre de forages étudiés. Il s'agit donc vraisemblablement de chenaux de sables ou cordons littoraux s'imbriquant dans un ensemble argileux, au gré de la morphologie des reliefs et des courants.

Le contexte très hétérogène des horizons sableux constituant la nappe de l'Yprésien peut avoir une influence majeure sur la migration des polluants au sein de la zone saturée (espace et temporel).

2.2.2. Contact Yprésien / Lutétien

Au-dessus des sables de l'Yprésien, la formation des calcaires et grès du Lutétien inférieur (désignée par le terme de "Calcaire grossier") se compose de 2 bancs distincts (1)- le calcaire très fissuré en haut et (2)- les grès ou calcaire sableux en bas.

Le "Calcaire grossier" est en contact direct avec les Sables de l'Yprésien chaque fois que les Argiles de Laon sont absentes. Or la continuité du banc des argiles de Laon qui compose le toit de l'Yprésien n'existe plus en Ile-de-France, ce qui amène à dire que **les deux formations constituent un système unique.**

2.2.3. Bancs de gypse des marnes et caillasses

Les calcaires du Lutétien se poursuivent vers le haut par la formation des Marnes-et-Caillasses, constituée par une alternance de bancs marneux et calcaro-marneux. C'est une formation stratifiée où alternent des couches perméables et des couches imperméables. Les Marnes et Caillasses sont considérées comme un aquifère médiocre, mais un aquifère tout de même (y compris là où les bancs de gypse sont abondants). Cette formation contient en région parisienne des bancs de gypse qui peuvent atteindre au nord de Paris une épaisseur de près de 25 mètres.

La formation en profondeur de karsts (vides de dissolution) gypseux par la dissolution du gypse **pourrait potentiellement être des voies préférentielles de migration des polluants vers les formations sous-jacentes.** Même si cette spécificité géologique est à vérifier de façon plus détaillée sur la zone d'étude dans le cadre de travaux complémentaires (analyse des logs géologiques inventoriés dans la banque du sous-sol afin de vérifier la présence et l'épaisseur des bancs gypseux), elle ne doit pas être écartée d'autant plus que la dissolution du gypse est un phénomène fortement dépendant de l'accélération des écoulements de la nappe (gradient hydraulique) qui sont très influencés depuis 1930 par le fonctionnement en alternance des forages du champ captant.

Ces phénomènes de dissolution de gypse contenu dans la formation des Marnes et caillasses sont connus depuis longtemps sur la Plaine Saint-Denis et sur la commune de Sevran (93) en particulier.

2.2.4. Ecoulement des eaux

La nappe superficielle des alluvions, en relation hydraulique directe avec la Seine, semble plutôt s'écouler du Sud-Ouest vers le Nord-Est selon certaines études¹, alors que le rapport CAR indique plutôt une tendance du Nord vers le Sud (campagne d'octobre 2006). Ce constat met en évidence un manque certain d'information sur le secteur qui **nécessiterait un complément approfondi en piézométrie**.

L'écoulement général du système Lutétien / Yprésien est dirigé du Nord-Est vers le Sud-Ouest avec un gradient hydraulique plus faible pour le Lutétien.

Le point important à considérer sur la zone d'étude est la **très grande influence des pompages en alternance du champ captant** qui perturbent considérablement les écoulements souterrains.

2.2.5. Risque inondation de la zone

La situation du champ captant, localisée dans le méandre de la Seine à proximité immédiate avec le fleuve, ainsi que la présence d'une nappe superficielle, rend sa position très vulnérable face aux inondations. En effet, plusieurs crues ont été enregistrées dans le passé, notamment celles de 1910 (crue centennale) et de 1955 (crue cinquantiennale).

Les **secteurs industriels utilisant des produits de surface et/ou des cuves en sous-sols ont pu être touchés par des épisodes de crue mettant en contact les produits et le milieu eau**, ce qui pourrait être une explication sur l'existence de plusieurs sources de pollution.

2.2.6. Conclusions

Les hétérogénéités du contexte géologique, la méconnaissance des écoulements souterrains au droit de la zone d'étude fortement influencée par les pompages du champ captant, ainsi que sa position géographique en bordure de la Seine suggèrent fortement le calage d'un modèle hydrodynamique qui permettrait également d'évaluer les transferts entre nappes.

¹ Campagnes de suivi des eaux souterraines réalisées par ATOS Environnement sur 3 piézomètres du site HOWMET en mars 2004, septembre 2004, mars 2005, août 2005, mars 2006 et octobre 2006.

3. Analyse des résultats de la campagne

Cette partie a pour objet d'apporter un avis et/ou des compléments d'interprétation concernant les conclusions émises par la DDASS sur les résultats de la campagne analytiques du laboratoire CAR. Comme souhaité par la DDASS, **l'analyse porte en priorité sur la discussion de l'hypothèse posée pour les composés Organo-Halogénés Volatils (COHV)** et sur l'intérêt d'une modélisation des transferts entre nappes.

3.1. RAPIDE RAPPEL DU CONTENU DE LA CAMPAGNE ANALYTIQUE

La campagne d'analyses réalisée en octobre 2006 par le laboratoire CAR à la demande de la mission interdépartementale InterService de l'Eau de Paris Proche Couronne, Service Navigation de la Seine a été menée sur 28 forages d'eau du secteur, comprenant certains ouvrages de la Lyonnaise des eaux et d'autres d'industriels aux alentours. Parmi ceux-ci, 14 captent la nappe des alluvions et 14 celle du Lutétien (cf. figure 1 de la page suivante).

Les paramètres suivants ont été recherchés :

Caractéristiques physico-chimiques : pH, conductivité, chlorures, sulfates, calcium et magnésium

Polluants : Arsenic, BTEX (Purge and Trap, notamment Benzène ; Toluène, Ethyl benzène, m,p-Xylène et o-Xylène), Cyanures totaux, Hydrocarbures totaux, COHV, Perchloroéthylène (PCE), Trichloroéthylène (TCE) et sous-produits (série des 3 Dischloroéthylènes, trans 1,2 -, cis1,2- et cis1,1-), les séries des 2 Dichloroéthanés (1,1- et 1,2-), des Trichloroéthanés (1,1,1- et 1,1,2-) et Chlorure de Vinyle.

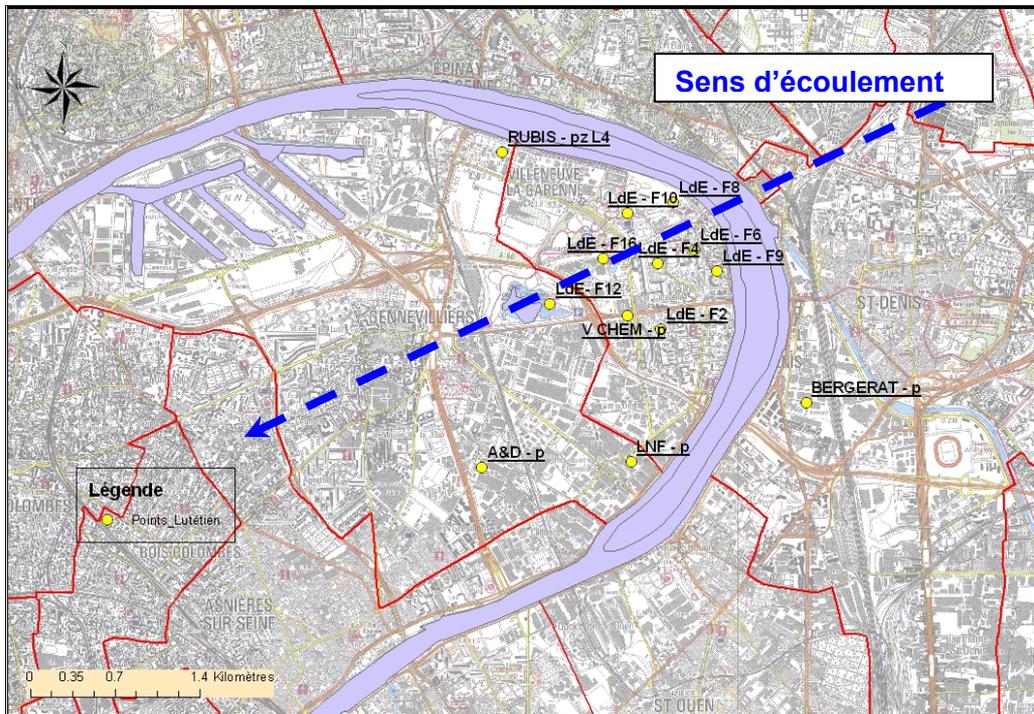
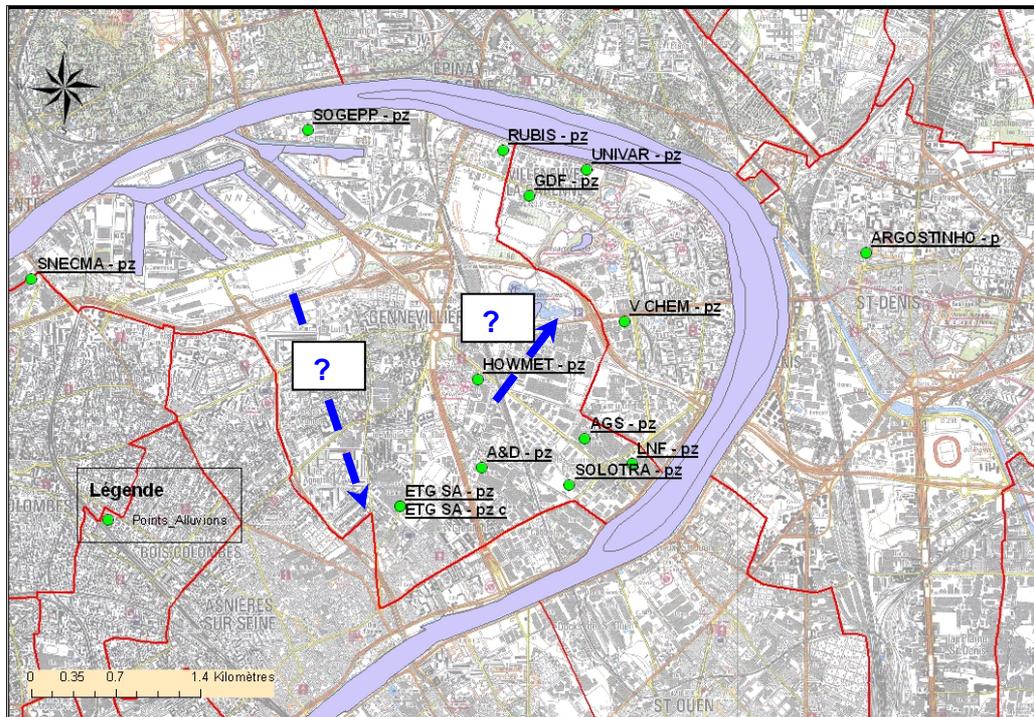


Figure 1 : Cartes de localisation des forages d'eau

3.2. RESULTATS RELATIFS AUX COHV

3.2.1. Hypothèse de la DDASS

L'essai d'interprétation réalisé par la DDASS présente les résultats analytiques relatifs aux solvants chlorés selon l'hypothèse que des processus de biodégradation ont lieu au sein des deux formations aquifères du fait de la présence du chlorure de vinyle, métabolite de dégradation des chloroéthylènes (polluants observés sur certains points). Un schéma conceptuel est proposé (DDASS 92, août 2007, pages 38-40) pour l'explication du comportement des solvants chlorés sur la zone d'étude, à savoir :

« Il est à noter que le PCE ; le TCE ; le 1,2-Cis-DCE ; le 1,2-Trans-DCE sont plus denses que l'eau, ces solvants traversent la nappe alluviale en suivant le schéma de dégradation des composés organiques chlorés volatils par voie anaérobie. Ceci peut expliquer le fait de rencontrer le chlorure de vinyle à 71,4 % dans la nappe du Lutétien et pas les PCE et TCE dans la nappe du Lutétien (sauf pour le cas particulier du site de Bergerat). Ce qui démontre que les parties de PCE et TCE solubilisées dans les eaux de la nappe alluviale avant d'atteindre les eaux de la nappe du Lutétien se transforment quantitativement en chlorure de vinyle. Le chlorure de vinyle observé dans les eaux de la nappe alluviale est donc formé par dégradation du TCE et DCE. Le chlorure de vinyle est ainsi formé avant d'atteindre la nappe du Lutétien et va se solubiliser dans les eaux. En fonction de la température de l'eau de la nappe le chlorure de vinyle peut se volatiliser des eaux de la nappe alluviale vers le haut. Ceci explique que lors des études sur certains sites de la zone, le chlorure de vinyle a été analysé dans le gaz du sol.

Il peut être posé l'hypothèse que le chlorure de vinyle volatilisé est présent dans la zone insaturée de la nappe du Lutétien. Ces poches formées favoriseraient une alimentation de la pollution de la nappe du Lutétien en fonction des variations du niveau de la nappe du fait de son exploitation et/ou de l'alimentation naturelle de la nappe.

La rapidité de la propagation du polluant dépendra de l'hétérogénéité et du degré de fissuration des couches. »

3.2.2. Biodégradation des solvants chlorés

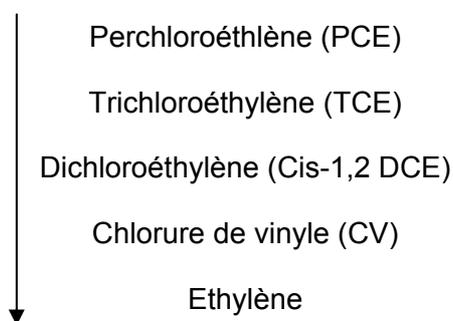
La relative solubilité de cette famille de polluants, ainsi que leur volatilité importante, font que les processus prépondérants dans le transport/dégradation sont la dispersion, la dilution, la volatilisation et la biodégradation. La biodégradation des solvants chlorés se traduit par une élimination progressive des atomes de chlore de la structure des solvants. Cette élimination du chlore se fait essentiellement par un processus de déhalogénéation réductive, mettant en jeu des bactéries (conditions biotiques / anaérobie). Ainsi, la mise en évidence de la biodégradation des solvants chlorés se fait par la détection de séquences où les solvants les plus halogénés sont prépondérants en début de panache (à proximité de la source), et disparaissent progressivement au profit de solvants moins halogénés au fur et à mesure que l'on avance dans le

panache. Pour ce type de polluants, des conditions réductrices, ainsi que la présence de bactéries adaptées sont nécessaires (notamment au démarrage de la dégradation et pour les produits les plus chlorés). L'annexe 1 illustre un exemple de transformation des solvants chlorés dans les sols et les eaux-souterraines.

Afin d'apprécier l'hypothèse posée par la DDASS, **une rapide analyse cartographique de différentes séquences de dégradation de solvants chlorés en conditions anaérobies est menée**. Elle vise, d'une part à présenter le type de produits retrouvés sur le secteur, et d'autre part à apprécier leur distribution spatiale au sein des deux nappes mais également les relations qui pourraient exister entre-elles.

3.2.3. Cas des Chloroéthylènes

En conditions anaérobies, la séquence de dégradation du Perchloroéthylène est :



La carte associée à cette séquence est présentée en figure 2.

Nappe des alluvions : la séquence des chloroéthylènes s'observe principalement en deux endroits de la zone d'étude, (1)- d'ETG SA vers Howmet en passant par A&D ; (2)- plus au Nord aux alentours des points Univar et GDF. **On considère comme séquence, la coexistence d'au moins deux métabolites de dégradation sur un même point de mesure**. Ailleurs, les concentrations observées pour les 5 produits n'ont, soit pas été détectées ou alors de façon insignifiante, soit n'existent qu'individuellement. La distribution spatiale des polluants au sein de la zone d'étude ne permet pas d'établir de lien entre les points de mesures d'autant plus que le sens d'écoulement des eaux est incertain. Ce qui peut toutefois être dit, c'est que de façon ponctuelle, il y a une forte présomption d'existence de phénomènes de biodégradation.

Nappe du Lutétien : la séquence des chloroéthylènes peut être observée en trois points de mesures de la zone d'étude, au piézomètre de A&D, autour du forage LdE F9 et au point Bergerat localisé de l'autre côté de la Seine en Seine-Saint-Denis (93). Pour les deux premiers, on note la présence de 1,2 Cis DCE et de chlorure de Vinyle, par contre pour le troisième il s'agit du Trichloroéthylène et 1,2 Cis Dichloroéthylène. Comme pour les alluvions, il n'est pas possible de mettre en évidence une continuité spatiale entre les différents points qui suggérerait un unique panache.

Relation Alluvions / Lutétien : Seul le point A&D suggère une éventuelle migration de polluants entre les deux nappes car les mêmes polluants sont retrouvés.

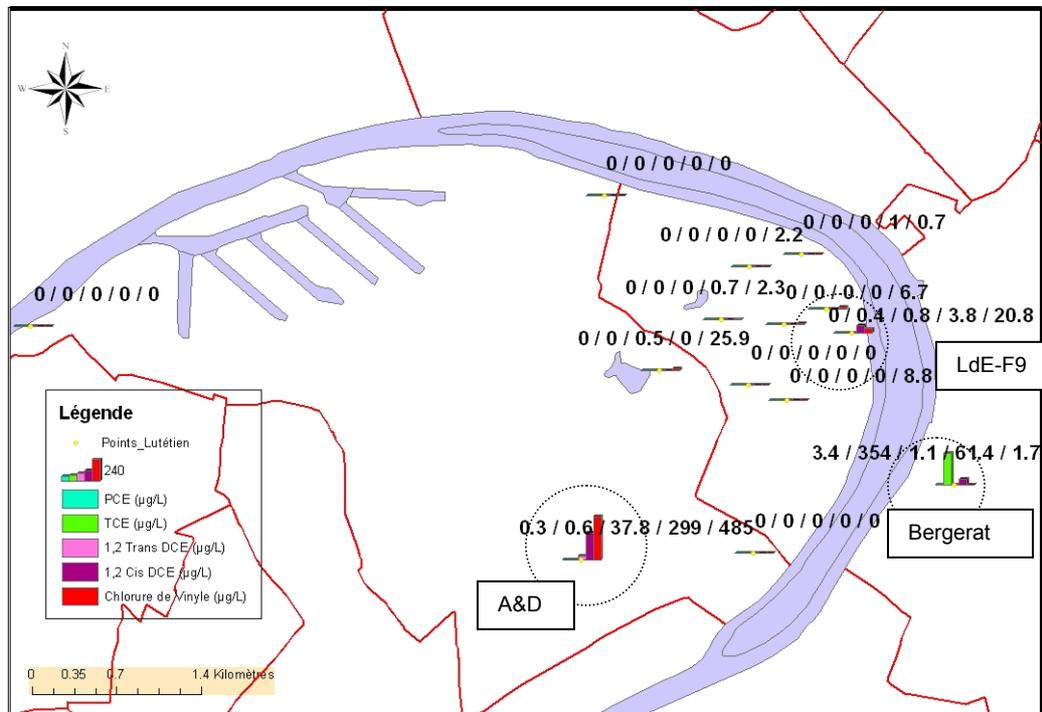
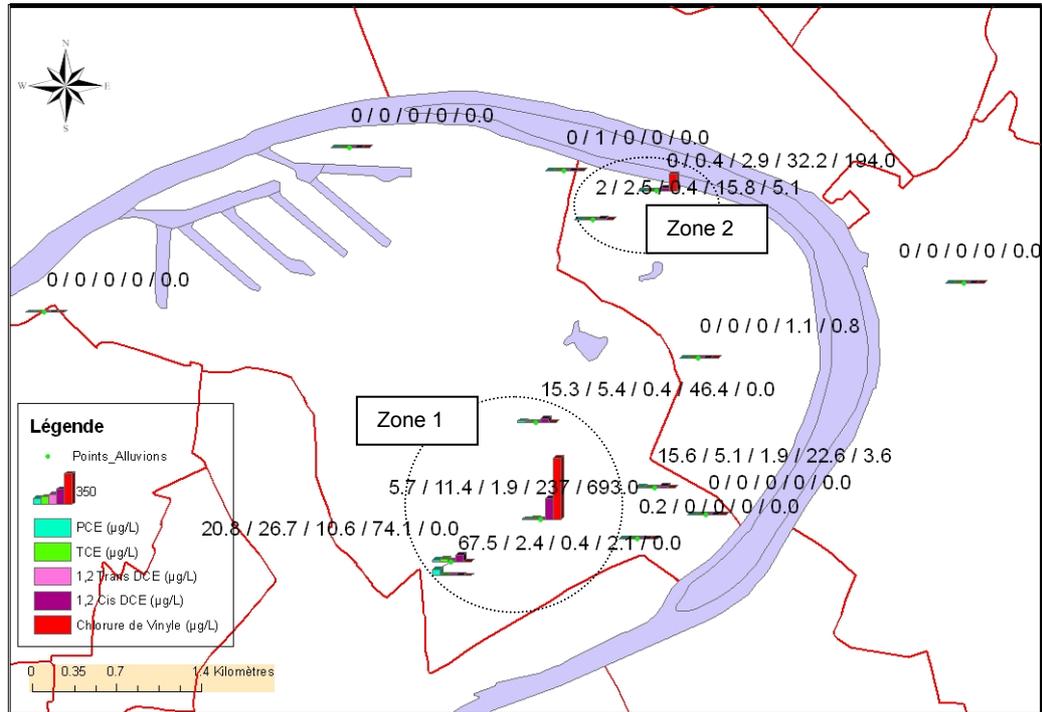
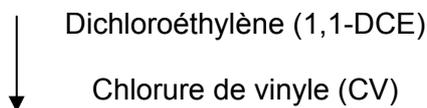


Figure 2 : Cartes de la séquence de dégradation du Perchloroéthylène

3.2.4. Cas du 1,1-DCE

En conditions anaérobies, la présence du Chlorure de Vinyle peut également être liée à la déchloration du 1,1-Dichloroéthylène. La séquence est donc la suivante :



La carte associée à ces deux substances est présentée en figure 3.

Nappe des alluvions : la coexistence des deux polluants (1,1-DCE et CV) est également observée à deux endroits de la zone d'étude, au point d'eau A&D et sur celui de GDF (mais en faibles concentrations). Au point Univar, seul du Chlorure de Vinyle est mesuré. Compte tenu de la quantité disproportionnée entre les deux substances (notamment sur le point A&D), la biodégradation du 1,1- Dichloroéthylène en Chlorure de Vinyle n'apparaît pas aussi évidente. Ailleurs, les concentrations pour les 2 produits n'ont, soit pas été détectées ou alors de façon insignifiante, soit n'existent qu'individuellement.

Nappe du Lutétien : la coexistence des deux polluants dans les eaux du Lutétien est observée sur deux points d'eau, A&D et LdE-F9, par contre à la différence de la séquence des chloroéthylènes ils sont à peine présents sur le forage Bergerat (93). De la même façon que pour les alluvions, la quantité disproportionnée entre ces deux substances ne permet pas d'affirmer de façon certaine de la présence de la séquence de dégradation. Ailleurs, les concentrations pour les 2 produits n'ont, soit pas été détectées ou alors de façon insignifiante, soit n'existent qu'individuellement.

Relation Alluvions / Lutétien : Comme dit dans le paragraphe précédent, le point A&D suggère une éventuelle migration de chlorure de Vinyle entre les deux nappes.

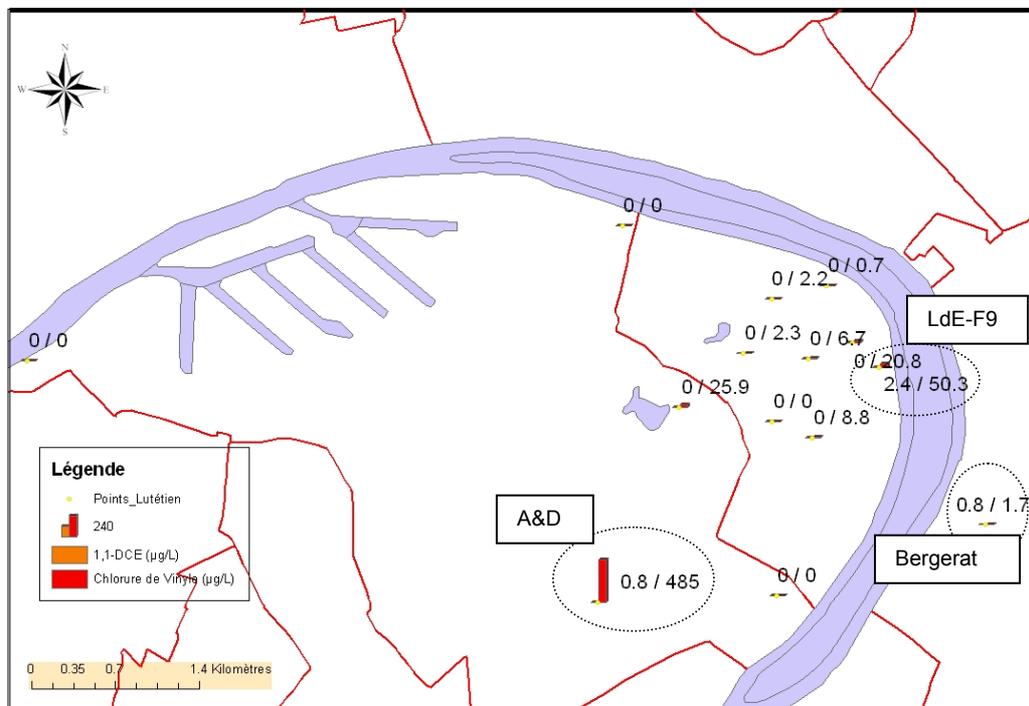
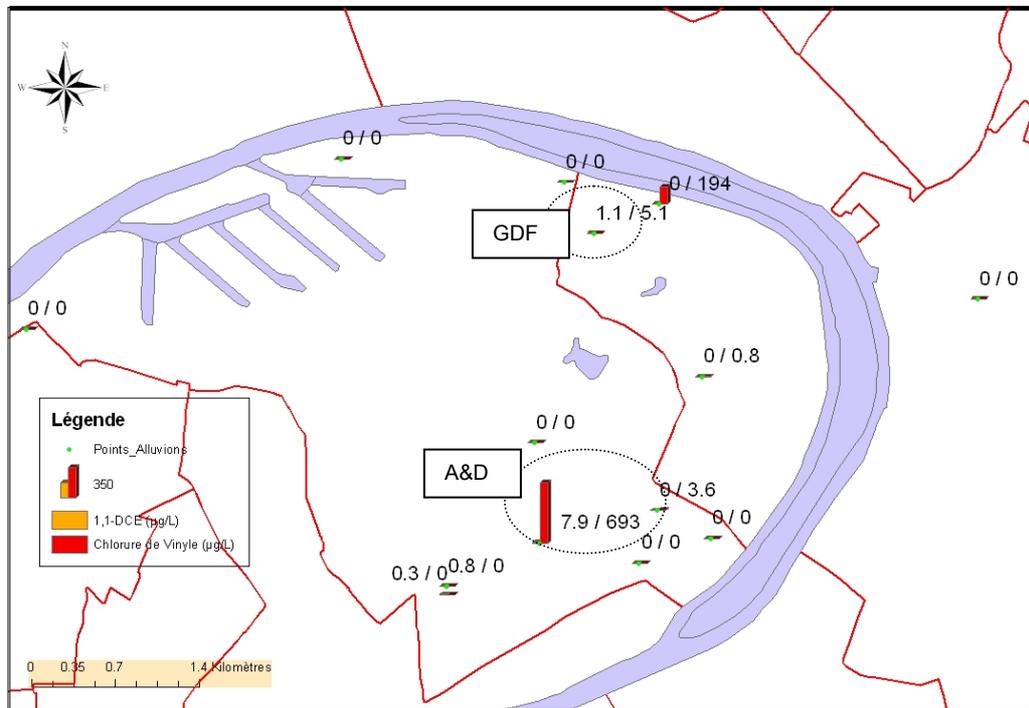
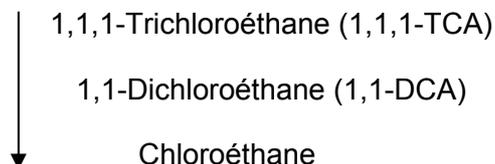


Figure 3 : Cartes de la séquence de dégradation du 1,1-DCE en Chlorure de Vinyle

3.2.5. Cas des Chloroéthanés

La séquence de dégradation du 1,1,1-Trichloroéthane en conditions ananérobie est la suivante :



La carte associée à cette séquence est présentée en figure 4.

Nappe des alluvions : la séquence de dégradation du 1,1,1-Trichloroéthane s'observe sur les deux mêmes secteurs que ceux des chloroéthylènes, avec des valeurs les plus fortes toujours au point A&D. Ailleurs les concentrations pour les 3 produits n'ont, soit pas été détectées ou alors de façon insignifiante, soit n'existent qu'individuellement. On remarque que pour le secteur 1 (alentours d'A&D) le Chloroéthane n'a pas été identifié, alors que sur le secteur 2 (alentours d'Univar et GDF) il n'existe pas de 1,1,1-Trichloroéthane. Ce constat vient renforcer l'hypothèse privilégiant le fait qu'il n'y a probablement pas de relation entre les points des deux secteurs et qu'il pourrait exister plusieurs sources de pollution. De la même façon, la présence de processus de dégradation peut être suspectée de façon ponctuelle.

Nappe du Lutétien : en comparaison des autres produits (chloroéthylènes principalement), les valeurs observées pour le 1,1,1-TCA, le 1,1-DCA et le Chloroéthane ne sont pas élevées, à l'exception du point A&D qui montre une concentration plus élevée en 1,1-Dichloroéthane. La coexistence des produits s'observe toutefois aux alentours des points LdE-F9 et Bergerat même si les concentrations restent faibles.

Relation Alluvions / Lutétien : Le point A&D suggère de nouveau une éventuelle migration de 1,1-Dichloroéthane entre les deux nappes.

Remarque : les chloroéthylènes pouvant également être à l'origine des chloroéthanés (cf. annexe 1), une autre approche pourrait également être menée dans ce sens.

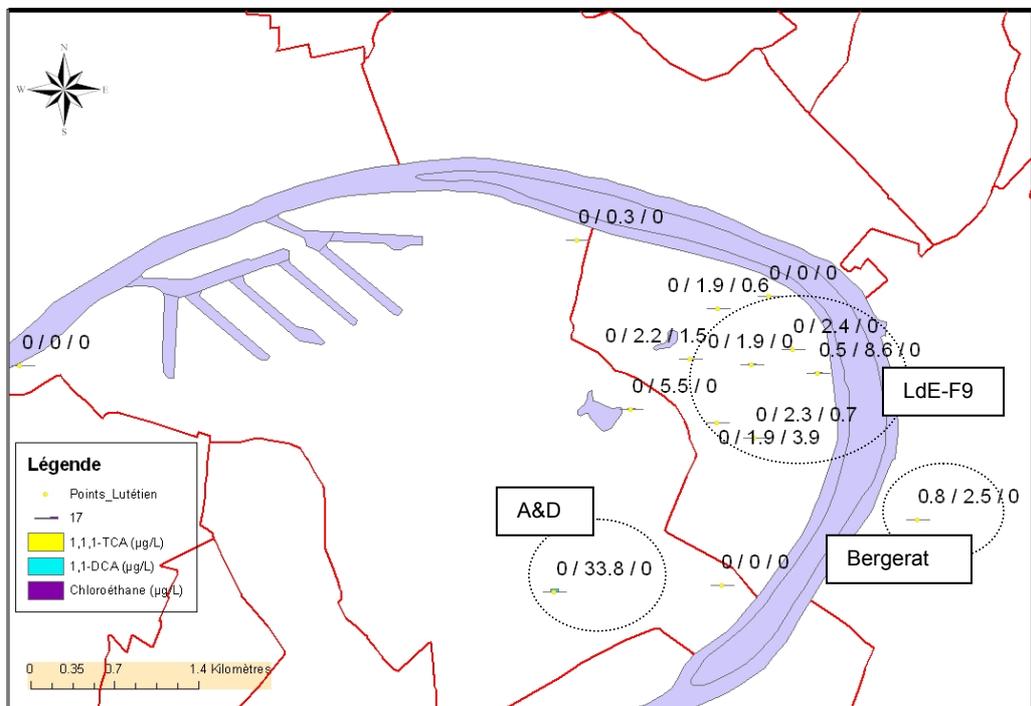
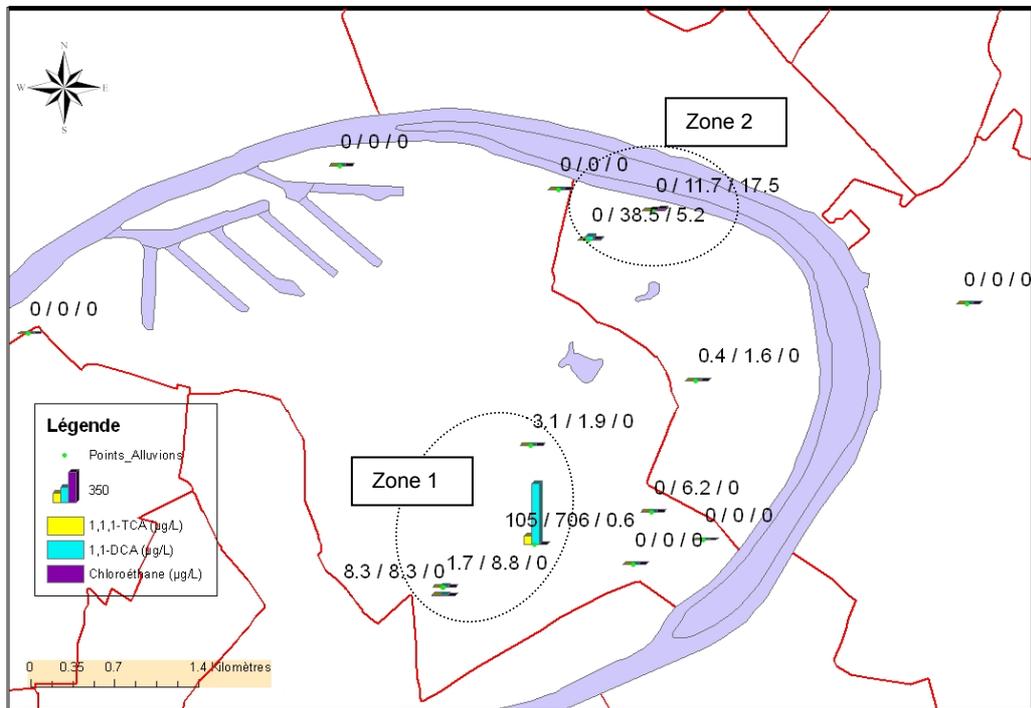
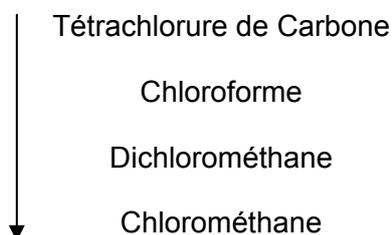


Figure 4 : Cartes de la séquence de dégradation du 1,1,1-Trichloroéthane

3.2.6. Cas des Chlorométhanes

La présence de chloroforme pourrait également suggérer l'existence de phénomènes de biodégradation du fait de la présence du chloroforme, métabolite du tétrachlorure de Carbone (CCl_4). Le CCl_4 est un polluant pouvant faire l'objet d'un processus d'atténuation naturelle, à condition que des conditions biogéochimiques favorables soient présentes. La bibliographie fait apparaître que l'atténuation naturelle du CCl_4 nécessite des conditions réductrices, et que des bactéries peuvent être mises en jeu en particulier en formant des nanoparticules minérales réactives aidant à la déchlorination du solvant.

La séquence de dégradation du Tétrachlorure de Carbone pourrait être la suivante :



La carte associée à cette séquence est présentée en figure 5.

On peut noter que la séquence associée à la dégradation du CCl_4 n'a pas été retrouvée, que ce soit pour la nappe des alluvions ou celle du Lutétien. Seules de faibles concentrations en chloroforme sont observées principalement dans les eaux de la nappe des alluvions (valeur maximale de $4,3 \mu\text{g/L}$). Les résultats des analyses d'octobre 2006 ne permettent pas de conclure sur l'existence de phénomènes de biodégradation pour ces deux substances chimiques.

Remarque : les chloroéthylènes pouvant également être à l'origine des chlorométhanes (cf. annexe 1), une autre approche pourrait également être menée dans ce sens.

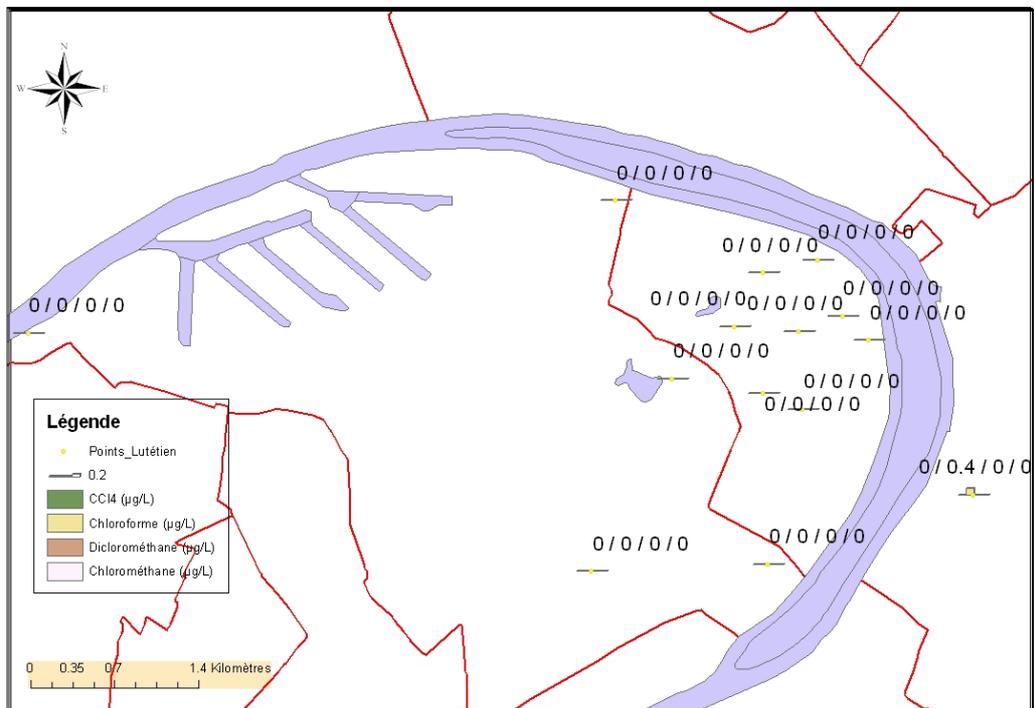
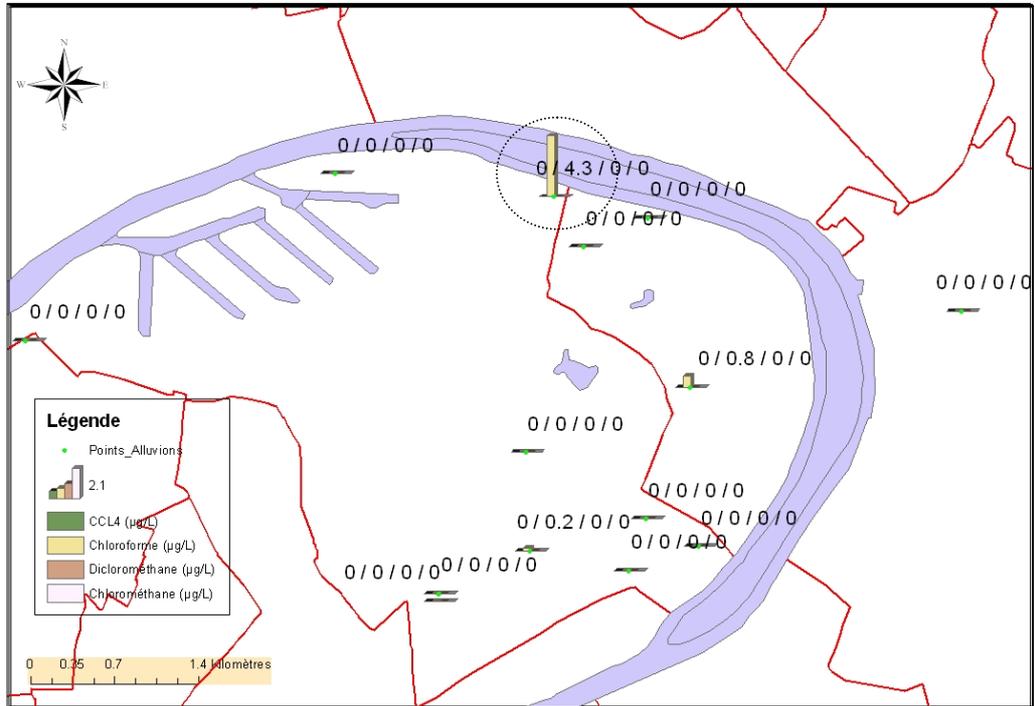


Figure 5 : Cartes de la séquence de dégradation du Tétrachlorure de Carbone

3.2.7. Conclusions

L'interprétation des résultats relatifs aux solvants chlorés par la DDASS est principalement fondée sur le fait qu'il existe des phénomènes de biodégradation des polluants en conditions anaérobies. L'analyse cartographique de certaines séquences de dégradation de substances observées sur la zone d'étude en octobre 2006 met en évidence des secteurs sur lesquels des mécanismes de biodégradation peuvent être suspectés du fait de la présence de métabolites de dégradation.

Pour les alluvions, il s'agit (1)- des alentours du point d'eau A&D et (2)- plus au Nord vers les points Univar et GDF. Pour le Lutétien, il s'agit de (1)- du point d'eau A&D, (2)- des alentours du forage LdE F9 et (3)- du point Bergerat localisé de l'autre côté de la Seine en Seine-Saint-Denis (93).

A la lecture des cartes, que ce soit pour les alluvions ou le Lutétien, il n'est toutefois pas possible d'établir de continuité spatiale entre les différents points d'eau qui suggèrerait un unique panache. Il est non seulement indispensable d'améliorer la connaissance des écoulements souterrains aux alentours du champ captant (pour les deux formations), mais il est surtout fondamental de pouvoir suivre l'évolution des concentrations au cours du temps afin d'affirmer la réduction de masse des contaminants au profit des métabolites de dégradation. Ce point s'avère à l'heure actuelle difficile à appréhender compte tenu de la non connaissance de la (ou des) sources de pollution.

Seul le point A&D suggèrerait une éventuelle migration de polluants de la nappe des alluvions vers celle du Lutétien.

Dans l'état actuel des connaissances, il est difficile de valider de façon certaine l'hypothèse posée par la DDASS pour les COHV, seule la confrontation des résultats obtenus au cours de prochaines campagnes de suivi des eaux souterraines avec ceux des paramètres physico-chimiques analysés dans les ouvrages impactés pourrait être révélatrice de l'existence de mécanismes de biodégradation des COHV, à savoir :

- des conditions réductrices (Eh négatif) ;
- des processus de dénitrification² (ratio $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ relativement élevé) ;
- des processus de réduction de fer ;
- la présence de méthane à des concentrations localement élevées, témoin d'une méthanogénèse en cours.

² En ce qui concerne les nitrates comme accepteurs d'électrons, deux voies sont possibles, la dénitrification qui transforme les nitrates en azote, et la réduction qui transforme les nitrates en ammonium. La préférence d'une de ces deux voies ne repose pas sur la thermodynamique mais sur les conditions physico-chimiques de l'aquifère. La réduction sera favorable quand la concentration en nitrates sera relativement faible et quand le carbone organique métabolisable sera abondant. La dénitrification sera au contraire favorisée quand le rapport carbone organique / $[\text{NO}_3^-]$ sera faible (McGuire et al., 1999).

Le paramètre NH_4^+ mesurés sur la zone dans les deux formations aquifères, par exemple, ne va pas dans le sens de l'hypothèse de la DDASS, car les plus fortes valeurs mesurées ne sont pas retrouvées au droit des points comme pouvant être le lieu de mécanismes de biodégradation des solvants chlorés (cf. cartes en figure 6, page suivante), à l'exception du point de Seine-Saint-Denis.

Pour valider l'hypothèse proposée, seule une analyse complémentaire doit être menée en prenant en compte :

- le sens d'écoulement des eaux souterraines (actuellement pas considéré) ;
- la non-utilisation par les industriels des produits de dégradation (Chlorure de Vinyle en particulier) au droit ou en amont hydraulique des « points noirs » observés ;
- la mise en place d'un suivi de l'évolution (dans le temps et l'espace) des concentrations des différentes substances chlorées.

De même certaines interrogations doivent encore être levées, telles que :

- Le Chlorure de Vinyle est-il un métabolite de dégradation ou est-ce une molécule mère utilisée par les industriels dans le passé ?
- S'agit-il d'un contexte mono ou multi sources ?
- L'hétérogénéité évidente des milieux souterrains fragmente-t-elle le(s) panache(s) de pollution ?
- La (les) source(s) de pollution est (sont)-elle forcément issue(s) de la surface ou n'existerait-il pas d'autres voies de transfert des polluants (dissolution du gypse, présence d'anciens puisards, etc.) ?

L'analyse de paramètres microbiologiques concernant la densité de population bactérienne, ainsi que l'identification des populations présentes sur le site en vue de compléter les informations précédentes pourraient s'avérer également intéressantes.

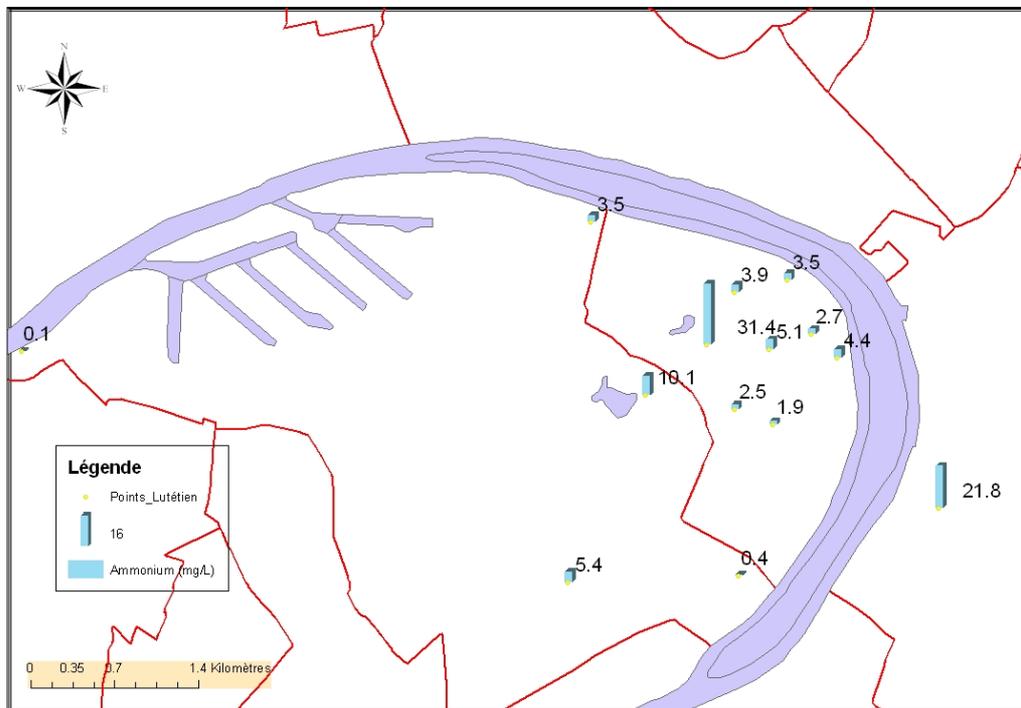
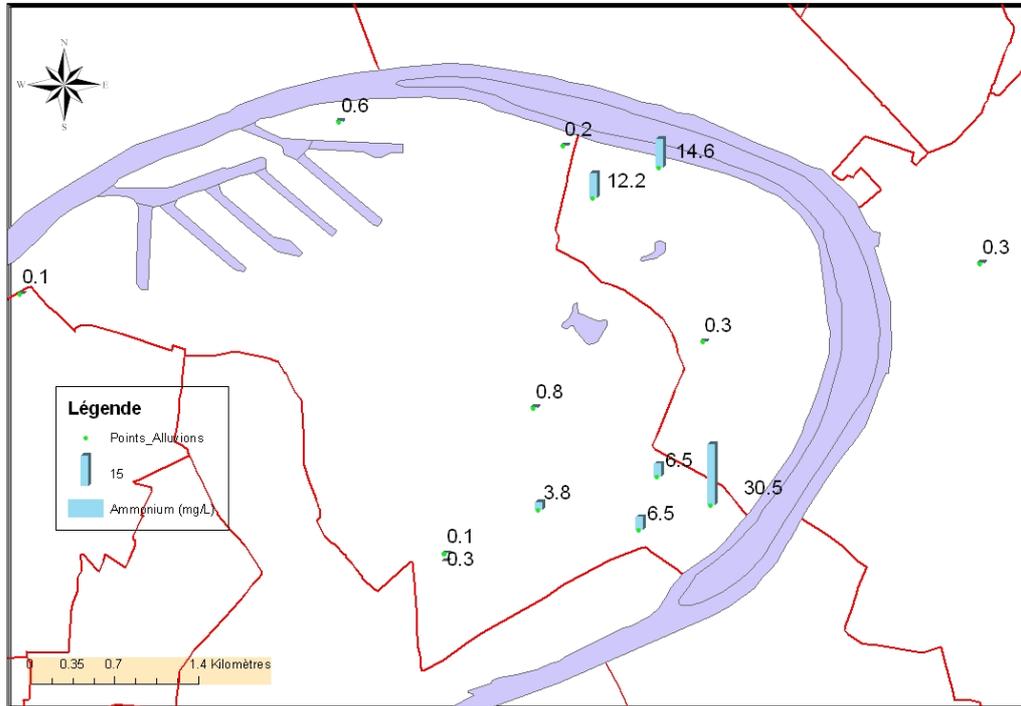


Figure 6 : Cartes de présence de l'ammonium sur les forages d'eau analysés

4. Synthèse concernant les propositions de pistes de travail pour l'amélioration de la connaissance du secteur

En vue d'améliorer la connaissance du milieu souterrain au niveau du champ captant, les pistes de travail suivantes sont proposées.

4.1. CALAGE D'UN MODELE HYDRODYNAMIQUE

La construction d'un modèle hydrodynamique sur la base de la connaissance de la géologie régionale et locale et sur les données hydrogéologiques disponibles devrait permettre de mieux comprendre les écoulements souterrains (directions, échanges entre couches, variabilité au cours du temps, flux,...). Cela nécessitera un calage en régime transitoire sur les mesures faites et sur celles qu'il est proposé de réaliser (§ 4.2 ci-dessous). La connaissance des séquences de pompages du champ captant (arrêts, reprises, débits) sera bien sûr indispensable.

4.2. COMPLEMENTS DE PIEZOMETRIE

Des compléments en piézométrie pour les deux formations aquifères donneront, associés aux cartes élaborées dans le passé, un ensemble de situations piézométriques qui aidera au calage du modèle hydrodynamique et qui permettra d'apprécier les impacts des modifications d'exploitation des captages AEP :

- **nappe alluviale** : élaboration d'une carte piézométrique en basses eaux et hautes eaux (2 campagnes de mesures pour avoir des résultats synchrones à deux dates données) ;
- **nappe du Lutétien et celle de l'Yprésien** : équipement d'un piézomètre au sein de chaque nappe et enregistrement à petit pas de temps (horaire) sur un cycle hydrologique (1 an).

4.3. COLLECTE DE DONNEES ANALYTIQUES COMPLEMENTAIRES

En vue d'apporter des éléments de réponse sur la distribution spatiale des différents polluants au sein des deux nappes mais également pour compléter la connaissance de la situation piézométrique du secteur, il serait intéressant de constituer une base de données inventoriant l'ensemble des mesures déjà existantes (qualité et quantité) sur la zone d'étude. Cette tâche pourrait s'intégrer dans la cadre du projet de bancarisation des données « qualité » des eaux-souterraines au droit des installations classées et sites pollués, avec toutes les réserves concernant les disparités relatives aux méthodes d'échantillonnage des eaux souterraines, aux méthodes d'analyse et aux seuils de détection des différents laboratoires intervenants.

4.4. UTILISATION DU LOGICIEL BIOCLOR©

Des essais de compréhension des mécanismes de pollution pourraient être réalisés via un modèle de transfert et du potentiel de dégradation des solvants chlorés (ex. BIOCLOR© de l'USEPA) mis en évidence par les analyses, associé au modèle hydrodynamique. Les objectifs visés sont l'analyse des cinétiques de dégradation, l'interprétation des conditions d'oxydoréduction, des accepteurs d'électrons et des sous-produits de dégradation.

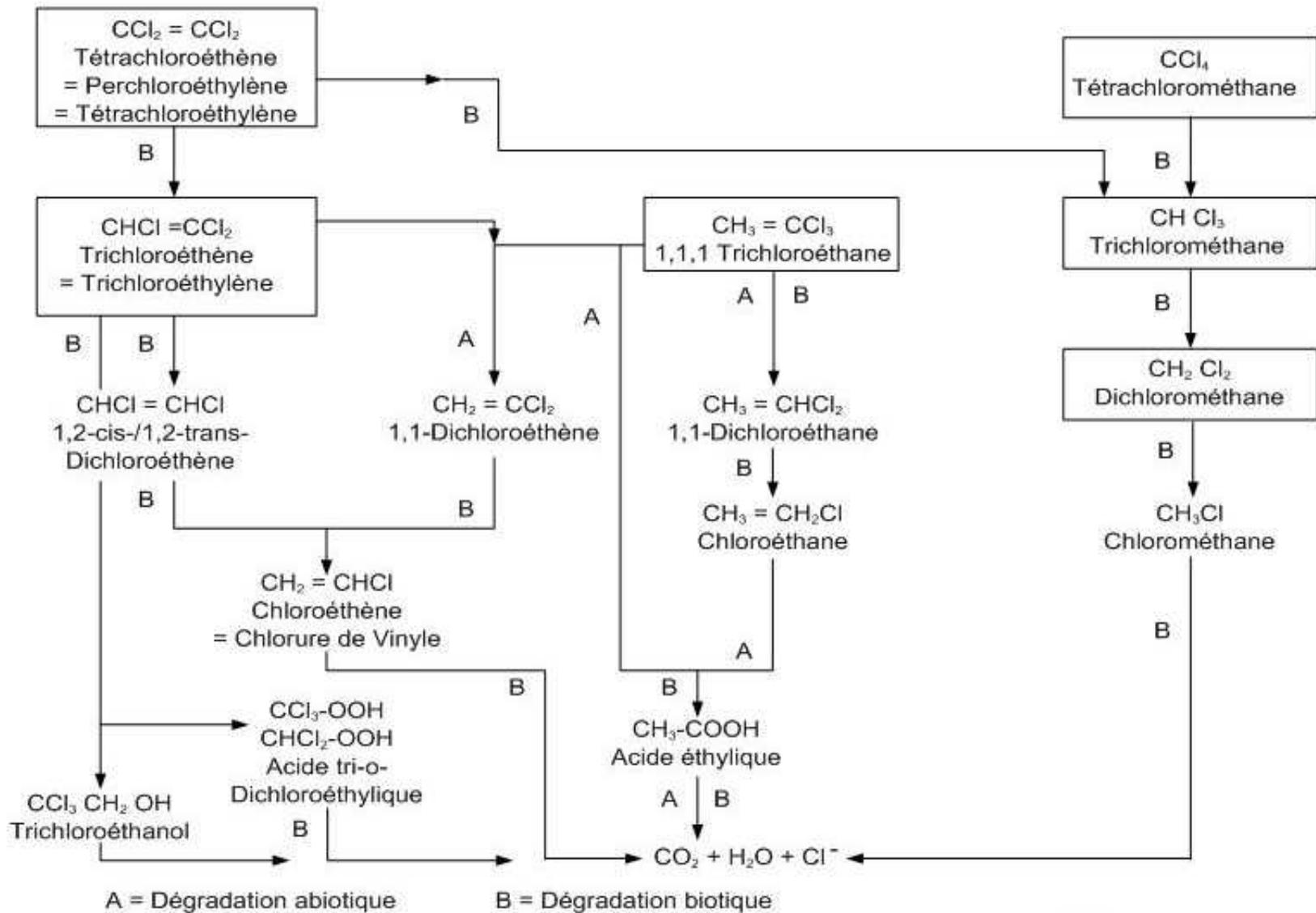
Des prélèvements d'eau et analyses complémentaires doivent être menés selon les paramètres suivants : *Nitrate, Iron II, Sulfate, Sulfide, Methane, Oxidation, Reduction, Potential (ORP), pH, TOC, Temperature, Carbon Dioxide, Alkalinity, Chloride, Hydrogen, Volatile Fatty Acids, BTEX, PCE, TCE, DCE, VC, 1,1,1-Trichloroethane, DCA, Carbon, Tetrachloride, Chloroethane, Ethene/Ethane, Chloroform, Dichloromethane.*

4.5. REALISATION D'ANALYSES ISOTOPIQUES

La réalisation d'analyses isotopiques peut également être proposée en vue d'améliorer la connaissance sur la chaîne de dégradation des produits identifiés de manière à vérifier l'unicité ou la pluralité de l'origine de la pollution, à préciser si le Chlorure de Vinyle est un produit mère ou s'il est un métabolite de dégradation.

Annexe 1

**Exemple de transformation des solvants chlorés
dans les sols et les eaux-souterraines
selon *Wiedemeier T.H., Rifal H.S., Newell C.J. and
Wilson J.W. (1999) Natural Attenuation of Fuels
and Chlorinated Solvents, John Wiley & Sons,
New York***





Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional d’Ile-de-France
7, rue du Théâtre
91884 – Massy Cedex – France
Tél. : 01 69 75 10 25