

# **Réalisation d'essais de pompage intégraux (EPI) en Suisse**

**Rapport d'experts du groupe de projet ChloroNet EPI  
Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)**

**Novembre 2016**

## Auteurs

Groupe de travail EPI (2015-2016)

Jürgen Abrecht	GEOTEST AG
Gabriele Büring	Cheffe de projet ChloroNet
Bettina Flury	AWEL Zurich (direction)
Uwe Hekel	HPC AG (expert externe et rédaction finale)
Daniel Hunkeler	CHYN, Université de Neuchâtel
Walter Labhart	Dr Heinrich Jäckli AG

## Suivi à l'Office fédéral de l'environnement (OFEV):

Reto Tietz	OFEV, Division Sols et biotechnologie
Monika Schwab-Wyssner	OFEV, Division Sols et biotechnologie / Gestion du projet ChloroNet

Ce rapport d'experts a été élaboré par le groupe d'experts EPI dans le cadre du projet ChloroNet, sur mandat de l'OFEV. La responsabilité du contenu incombe entièrement au mandataire. Le rapport reflète l'avis du groupe d'experts EPI.

## Table des matières

Résumé.....	8
1. Introduction et cahier des charges.....	10
2. Manière de procéder .....	11
3. Définition des essais de pompage intégraux.....	13
<b>3.1 Principe</b> .....	13
<b>3.2 Principe du procédé</b> .....	14
<b>3.3 EPI réalisés en Suisse jusqu'à présent</b> .....	17
4. Exigences relatives au site .....	18
<b>4.1 Critères d'application</b> .....	18
<b>4.2 Aide à la décision pour la planification des EPI</b> .....	22
<b>4.3 Analyse de sensibilité - Influence de différents facteurs hydrogéologiques sur la largeur de la zone d'appel</b> .....	23
<b>4.4 Évaluation du site pour les projets pilotes</b> .....	26
5. Priorisation des sites nécessitant investigation au moyen des EPI .....	28
<b>5.1 Situation initiale et objectifs</b> .....	28
<b>5.2 Conditions pour les essais pilotes</b> .....	29
<b>5.3 Recherche de sites au moyen d'analyses SIG</b> .....	29
<b>5.4 Aide à la décision pour les EPI en vue de la priorisation des sites HCC</b> .....	32
6. Utilisation des EPI au stade de l'investigation de détail (ID).....	35
<b>6.1 Choix des projets pilotes</b> .....	35
<b>6.2 Site A</b> .....	35
<b>6.2.1 Situation du site</b> .....	35
<b>6.2.2 Planification des essais</b> .....	37
<b>6.2.3 Réalisation des essais</b> .....	37
<b>6.2.4 Interprétation et résultats</b> .....	38
<b>6.2.5 Discussion et évaluation</b> .....	42
<b>6.3 Site B</b> .....	44
<b>6.3.1 Situation du site</b> .....	44
<b>6.3.2 Planification des essais</b> .....	45
<b>6.3.3 Réalisation des essais</b> .....	46
<b>6.3.4 Interprétation et résultats</b> .....	46
<b>6.3.5 Discussion et évaluation</b> .....	52
<b>6.4 Site C</b> .....	53

6.4.1	<b>Situation du site</b> .....	53
6.4.2	<b>Interprétation et résultats</b> .....	53
6.4.3	<b>Discussion et évaluation</b> .....	56
6.5	<b>Site D</b> .....	57
6.5.1	<b>Situation du site</b> .....	57
6.5.2	<b>Interprétation et résultats</b> .....	58
6.5.3	<b>Discussion et évaluation</b> .....	60
7.	<b>Bilan et recommandations</b> .....	61
7.1	<b>Conditions d'application en Suisse</b> .....	61
7.2	<b>Recommandations pour la réalisation d'EPI lors du traitement des sites contaminés</b> .....	62
7.3	<b>Lacunes et mesures à prendre</b> .....	63
8.	<b>Bibliographie</b> .....	65
	Annexe A: Évaluation des sites qui n'ont pas été retenus comme projets pilotes.....	67
	Annexe B: Recommandations pour la planification, la réalisation et l'interprétation des EPI .....	71
	Annexe C: Indications pour le calcul de la perméabilité .....	75

## Tableaux:

<b>Tableau 4-1:</b>	Critères pour le domaine relatif aux polluants (énumération et évaluation) ..	19
<b>Tableau 4-2:</b>	Critères relatifs à la situation hydrogéologique (énumération et évaluation).	20
<b>Tableau 4-3:</b>	Critères pour le domaine situation relative site (énumération et évaluation).	21
<b>Tableau 4-4:</b>	Évaluation des sites possibles selon les principaux critères de réalisation pour les EPI (en vert: exigences minimales pour les EPI remplies; en jaune: EPI réalisables, mais avec restrictions; en rouge: exigences minimales pour les EPI non remplies) .....	27
<b>Tableau 6-1:</b>	Données d'essai pour les EPI sur le site A .....	37
<b>Tableau 6-2:</b>	Valeurs de la transmissivité pour les EPI sur le site A.....	39
<b>Tableau 6-3:</b>	Données d'essai pour les EPI sur le site B .....	46
<b>Tableau 6-4:</b>	Valeurs de transmissivité pour les EPI sur le site B .....	48

## Illustrations:

<b>Figure 2-1:</b>	Phases du projet .....	11
<b>Figure 3-1:</b>	Panache de pollution dans les eaux souterraines à l'aval (aquifère hétérogène) d'un site dont la position du foyer de pollution n'est pas connue avec exactitude (selon Teutsch et al., 2000 [3]) .....	13
<b>Figure 3-2:</b>	Principe d'un essai de pompage intégral avec trois points de mesure des eaux souterraines (PMES) placés le long d'une section de contrôle (d'après Teutsch et al., 2000 [3]) .....	15
<b>Figure 3-3:</b>	Types de courbes caractéristiques des concentrations et panaches de pollution correspondants (d'après Teutsch et al., 2000 [3]).....	16
<b>Figure 4-1:</b>	Domaines pour lesquels des conditions de réalisation ont été formulées (source: OFEV, légèrement modifié) .....	18
<b>Figure 4-2:</b>	Arbre de décision pour la planification d'EPI .....	22
<b>Figure 4-3:</b>	Évolution temporelle de la largeur de la zone d'appel en fonction de la durée du pompage, solution analytique de l'équation du flux des eaux souterraines pour un puits de pompage. Formules pour calculer la largeur maximale de la zone d'appel $B_{max}$ et la durée nécessaire pour que la zone d'appel atteigne une certaine largeur, par ex. 2/3 de son étendue maximale ( $B_{2/3}$ ). La durée est exprimée comme fonction d'une constante temporelle caractéristique qui dépend de différents facteurs.....	23
<b>Figure 4-4:</b>	(a) Évolution de la largeur maximale de la zone d'appel en fonction de la vitesse d'écoulement et du débit de pompage spécifique (débit de pompage divisé par la longueur crépinée). (b) Durée de pompage nécessaire pour atteindre les 2/3 de la largeur maximale de la zone d'appel. ....	24
<b>Figure 4-5:</b>	Largeur de la zone d'appel en fonction de la vitesse d'écoulement et de la durée de pompage pour trois différents débits de pompage spécifiques: 0.25 L/m/s (a), 0.5 L/m/s (b) et 1 L/m/s (c) .....	25
<b>Figure 5-1:</b>	Approche régionale pour la réalisation d'EPI .....	28
<b>Figure 5-2:</b>	Périmètre de projet pour l'étude de faisabilité des EPI dans le canton de Zurich .....	30
<b>Figure 5-3:</b>	Résultat de l'analyse SIG relativement au respect des critères hydrogéologiques.....	30
<b>Figure 5-4:</b>	Analyse SIG avec des zones tampon de 100 m autour des sites HCC nécessitant investigation ; en jaune : densité de sites favorable (2 ou plusieurs sites < 100 m) .....	31
<b>Figure 5-5:</b>	Résultat de l'analyse SIG sur la densité de sites dans les régions où l'épaisseur des aquifères se situe entre 2 et 10 m (pourcentages avec 0, 1 resp. 2 autres sites HCC dans une zone tampon de 100 m) .....	32
<b>Figure 5-6:</b>	Arbre de décision pour la réalisation d'EPI en vue de la priorisation des sites IP .....	33

<b>Figure 6-1:</b>	Points de mesure et étendue approximative du foyer (en rouge), section de contrôle, direction d'écoulement des eaux souterraines (flèche bleue) et points de mesure utilisés (écrit en grand) .....	36
<b>Figure 6-2:</b>	Profil géologique de la section de contrôle, avec les points de mesure des eaux souterraines .....	36
<b>Figure 6-3:</b>	Variation du niveau des eaux souterraines aux puits de pompage et points de mesure durant l'EPI sur le site A .....	38
<b>Figure 6-4:</b>	Évolution du rabattement du niveau de la nappe dans le puits Kb 05/3 (à gauche) et courbe diagnostique (à droite) avec le rabattement (en bleu) et sa dérivée (en rouge) .....	39
<b>Figure 6-5:</b>	Concentrations en uranine au point Kb 99/3 pendant l'essai de pompage (à gauche) et courbe de percée modélisée (à droite).....	40
<b>Figure 6-6:</b>	Concentrations en HCC aux points Kb 05/3 et Kb 99/3 pendant les essais de pompage .....	41
<b>Figure 6-7:</b>	Isochrones et zones de flux pour les deux EPI sur le site A .....	42
<b>Figure 6-8:</b>	Situation du site B avec les points de mesure des eaux souterraines, le foyer présumé (étoile), la section de contrôle (ligne en pointillé rouge passant par les points de mesure) et la direction d'écoulement des eaux souterraines (flèche bleue).....	44
<b>Figure 6-9:</b>	Profil géologique de la section de contrôle, avec les points de mesure des eaux souterraines .....	45
<b>Figure 6-10:</b>	Variation du niveau des eaux souterraines aux puits de pompage et points de mesure durant l'EPI sur le site B .....	47
<b>Figure 6-11:</b>	Évolution du rabattement du niveau de la nappe dans le puits Kb 04/1 (à gauche) et courbe diagnostique (à droite) avec le rabattement (bleu) et sa dérivée (rouge) .	47
<b>Figure 6-12:</b>	Évolution de la conductivité électrique et de la température pour l'EPI en Kb 04/1 .....	48
<b>Figure 6-13:</b>	Concentrations en HCC aux points Kb 04/1 et Kb 08/1 pendant les essais de pompage .....	<<<<<49
<b>Figure 6-14:</b>	Isochrones et bandes de flux pour les HCC (somme) sur le site B.....	51
<b>Figure 6-15:</b>	Isochrones et bandes de flux pour le R113 (en bas) sur le site B.....	51
<b>Figure 6-16:</b>	Rabattement (à gauche) et interprétation hydraulique (à droite) pour l'EPI réalisé en décembre 2010 dans le puits 12.P.33 .....	54
<b>Figure 6-17:</b>	Concentrations en PCE pour les EPI de décembre 2010.....	54
<b>Figure 6-18:</b>	Concentrations en PCE pour les EPI de décembre 2013.....	55
<b>Figure 6-19:</b>	Zones d'appel des EPI de décembre 2010 (à gauche) et décembre 2013 (à droite). Les isochrones marquent chaque fois la zone d'appel concernée aux moments des échantillonnages .....	55
<b>Figure 6-20:</b>	Répartition des concentrations calculée avec C-SET pour les EPI de décembre 2010 (à gauche) et décembre 2013 (à droite).....	56

<b>Figure 6-21:</b>	Rabattement (à gauche) et interprétation hydraulique (à droite) pour l'EPI de mars 2016 au point Pt 2 .....	58
<b>Figure 6-22:</b>	Concentrations en PCE pour l'EPI de mars 2016 au point Pt 2.....	59
<b>Figure 6-23:</b>	Zone d'appel de l'EPI en Pt 2. Les isochrones (image de gauche) marquent les zones d'appel correspondant aux moments des prises d'échantillons après 0.6 h, 2.5 h, 6 h, 11 h, 21 h, 31 h et 47 h de pompage. Le plan de droite montre la répartition des concentrations calculée avec C-SET.....	59
<b>Figure A-1:</b>	Estimation des isochrones pour des EPI de 3 à 4 jours .....	67
<b>Figure A-2:</b>	Estimation des isochrones pour un EPI de 7 jours .....	69
<b>Figure A-3:</b>	Estimation des zones d'appel avec C-SET pour des EPI de 1, 2 et 3 jours..	70
<b>Figure C-1:</b>	Exemple de détermination de la perméabilité par une méthode stationnaire .....	75
<b>Figure C-2:</b>	Exemple d'une analyse non stationnaire avec la méthode de la droite .....	76
<b>Figure C-3:</b>	Exemple d'une analyse avec la courbe diagnostique.....	77

## Résumé

Les essais de pompage intégraux (EPI) sont une méthode permettant de déterminer directement la charge polluante dans les eaux souterraines. Son avantage par rapport aux mesures ponctuelles traditionnelles est que le flux massique de polluants est enregistré «sans lacunes» sur toute la section du panache. L'interprétation d'un EPI donne en outre des informations sur la distribution des concentrations dans la zone d'appel d'un ou plusieurs essais de pompage, et permet de tirer des conclusions sur l'emplacement des panaches et des foyers de pollution.

Les objectifs du projet ChloroNet «EPI» étaient de concrétiser les critères d'application pour les EPI en Suisse et de sélectionner des sites pilotes appropriés (phase 1), de réaliser des projets pilotes dans les cantons (phase 2), et finalement d'évaluer les résultats et élaborer des recommandations pour la réalisation de tels essais (phase 3). Le présent rapport d'experts doit servir d'aide à la décision aux experts et autorités, et constituer une base de discussion pour la réalisation d'EPI à différents niveaux de la législation sur les sites contaminés.

La condition fondamentale lors de la vérification des critères de réalisation et de la planification des EPI est que la situation hydrogéologique et les paramètres hydrauliques du secteur à investiguer soient suffisamment connus. Les conditions de réalisation suivantes doivent être remplies sur le site:

- Hypothèse ou certitude d'une pollution des eaux souterraines avec des substances hydrosolubles dont la concentration dépasse la limite de détection d'au moins un ordre de grandeur
- Un apport d'eau suffisant pour les essais de pompage; le débit réalisable doit se situer entre 1 et 5 l/s
- Une homogénéité suffisante de l'aquifère
- Une épaisseur moyenne de l'aquifère d'env. 2 - 10 m
- Une vitesse d'écoulement des eaux souterraines pas trop élevée

L'efficacité de la méthode EPI dépend de la perméabilité et de la largeur de la zone d'appel que l'on peut atteindre lors du pompage. Les diagrammes développés dans le cadre d'une analyse de sensibilité montrent que la largeur de la zone d'appel augmente avec le débit de pompage et avec la durée du pompage, pour autant que l'effet de la vitesse d'écoulement ne soit pas prépondérant. La largeur de la zone d'appel diminue si l'épaisseur de l'aquifère et la vitesse d'écoulement des eaux souterraines augmentent.

Sur la base de 270 sites pollués aux hydrocarbures chlorés (HCC) dans le canton de Zurich, on a examiné si les EPI pouvaient être utilisés pour la priorisation des sites HCC nécessitant investigation à l'étape de l'investigation préalable (IP). Les conditions essentielles à remplir pour une mise en œuvre rentable sont des conditions hydrogéologiques adéquates à large échelle, ainsi qu'une densité de sites suffisamment élevée. Pour l'un des essais pilotes dont le but était de prioriser les sites IP, la densité de sites et par là-même le rapport coût-bénéfice ont été jugés insuffisants.

Sept sites ont été évalués au niveau de l'investigation de détail (ID). Deux de ces sites rempissaient les critères de réalisation pour les EPI et ont pu être financés comme projets pilotes.



Deux autres sites avaient déjà fait l'objet d'EPI lors d'investigations antérieures et ont également pu être utilisés comme projets pilotes pour vérifier les conditions d'application et les résultats.

Les essais pilotes ont montré que la réalisation d'EPI posait certes des exigences spécialisées élevées, mais qu'ils fournissaient en contrepartie des résultats robustes et fiables. Malgré les éventuelles restrictions liées à l'homogénéité de l'aquifère, les EPI ont permis de déterminer les emplacements des panaches, la répartition des concentrations et des charges de manière plausible et cohérente avec les résultats des investigations antérieures.

On a constaté qu'il est particulièrement important de déterminer les paramètres hydrauliques avec suffisamment de précision. Comme ces paramètres ont une influence considérable sur les résultats des calculs, en particulier en ce qui concerne la charge polluante, la qualité de leur détermination a une grande importance. Il est recommandé de mesurer en continu le rabattement du niveau de la nappe au moyen de sondes piézométriques pendant les essais de pompage. Pour analyser les données des mesures, il faut utiliser des méthodes aussi sensibles que possible (par ex. courbe diagnostique) permettant de reconnaître et d'éliminer les écarts par rapport aux conditions d'homogénéité et d'infinité du procédé (par ex. influence des puits, fuites ou bords d'aquifères).

Selon les expériences tirées des sites pilotes, on peut recommander la réalisation d'EPI au stade de l'ID après avoir vérifié au préalable les conditions d'application et le rapport coût-bénéfice.

En Suisse, c'est dans les aquifères poreux comme les roches meubles du Plateau que les conditions pour la réalisation d'EPI sont le mieux remplies. Les gradients d'écoulement plus forts et des perméabilités élevées limitent par endroit la largeur de la zone d'appel qui peut être atteinte. Les aquifères fissurés ou karstiques ne remplissent à priori pas les conditions de réalisation.

Sur la base des expériences tirées des essais pilotes, le rapport donne finalement des recommandations pour la planification, la réalisation et l'interprétation des EPI.

## 1. Introduction et cahier des charges

Le présent rapport d'experts présente les résultats des discussions et les conclusions du groupe de projet ChloroNet Essais de pompage intégraux (EPI), y compris les résultats des projets pilotes effectués sur le terrain.

Le projet est né d'une présentation faite lors de la Journée technique ChloroNet 2014 sur le principe de fonctionnement et les possibilités d'application des EPI dans le cadre de l'investigation intégrale d'un site contaminé en Allemagne [1]. L'exposé a suscité un vif intérêt dans la communauté suisse des spécialistes des sites contaminés. L'OFEV et quelques cantons se sont demandé si les EPI pourraient aussi être utilisés en Suisse comme méthode d'investigation appropriée, en premier lieu pour les sites pollués avec des hydrocarbures chlorés (HCC). Comme ChloroNet recherche de nouvelles méthodes et techniques d'investigation et d'assainissement des sites pollués aux HCC, il a été décidé de créer un groupe de projet dédié.

Les objectifs du groupe de projet EPI étaient de :

- analyser le degré d'expérience actuel avec les EPI en Suisse,
- définir des conditions-cadres en vue de la réalisation d'EPI,
- mettre en évidence les possibilités et les limites,
- vérifier l'applicabilité des EPI par rapport aux différents niveaux de la législation sur les sites contaminés,
- vérifier l'utilité/le gain de connaissances apportés par les EPI dans le cas de sites HCC complexes,
- réaliser des projets pilotes dans les cantons, et
- analyser les résultats et faire des recommandations pour la réalisation des EPI

Les résultats du projet ont été présentés dans le cadre des Journées techniques ChloroNet 2015 et 2016. Tous les exposés sont publiés sur la page internet de ChloroNet:

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/sites-contamines/info-specialistes/chloro-net.html>

Le présent rapport d'experts doit servir d'aide à la décision aux experts et autorités, et constituer une base de discussion pour la réalisation des EPI. Le rapport ne constitue toutefois ni un guide pratique ni une directive d'exécution. Les résultats seront intégrés dans les prochains travaux de ChloroNet.

## 2. Manière de procéder

Le projet EPI comprend trois phases. Les phases 1 et 3 ont été élaborées au sein du groupe de projet, et la phase 2 a été réalisée individuellement dans les cantons (voir figure 2-1). Le groupe de projet a été soutenu par un expert externe.

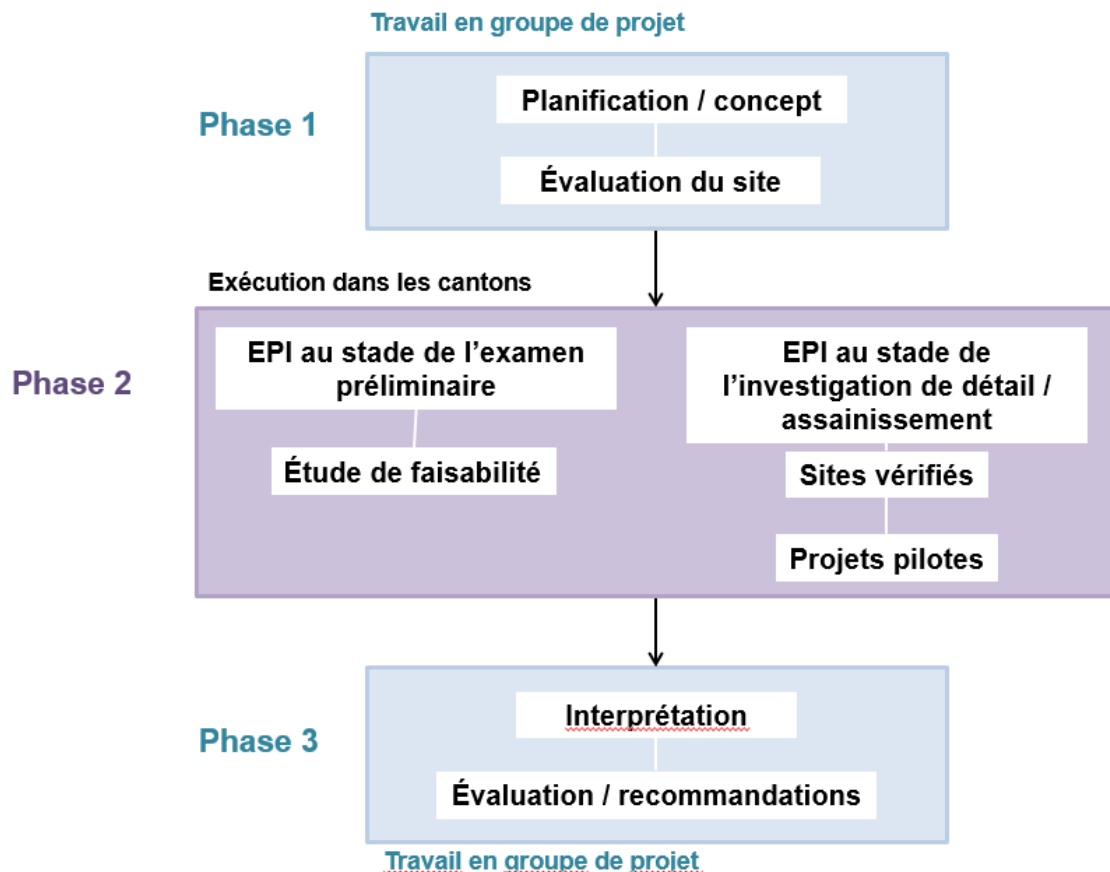


Figure 2-1: Phases du projet

### Phase 1: Planification/concept/évaluation du site

La première phase a servi à analyser la situation actuelle en Suisse, fixer des conditions-cadres spécifiques pour les projets pilotes et définir des critères pour les sites appropriés. Dans ce but, le groupe de projet a développé des critères d'application pour la réalisation des EPI en Suisse en s'appuyant sur les travaux de l'Office de l'environnement, des mesures et de la protection de la nature du Land de Baden-Wurttemberg (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg LUBW [2]). Ces critères renseignent sur les propriétés que le site doit posséder pour que les EPI puissent fournir des résultats probants.

Sur la base de ces critères, on a ensuite pu sélectionner les sites pour les projets pilotes (évaluation). Les zones et sites potentiels de différents cantons ont été vérifiés quant à leur aptitude et évalués par le groupe de projet. En ont résulté des aides à la décision supplémentaires pour la réalisation d'EPI sur des sites pollués.

L'OFEV a au préalable informé tous les cantons sur la possibilité de participer au projet en mettant à disposition des sites appropriés. Ce rapport a tenu compte de données des cantons d'Aarau, Bâle-Campagne, Bâle-Ville, Berne, Neuchâtel et Zurich.

### Phase 2: Réalisation

La planification, l'exécution ainsi que la détermination des objectifs concrets ont eu lieu individuellement dans les cantons. Le canton de Zurich a testé l'application des EPI pour une première évaluation des sites contaminés, au stade de l'investigation préliminaire. Ce test a été effectué sur la base d'une étude de faisabilité. Mais les conditions appropriées pour la réalisation d'un projet pilote n'ont pas pu être trouvées. Les cantons de Bâle-Campagne et Neuchâtel ont mis des données d'essais de pompage déjà réalisés à disposition pour des vérifications par calcul avec le programme C-SET. Le canton de Berne a réalisé des projets pilotes sur deux sites pollués différents, au stade de l'investigation de détail.

### Phase 3: Interprétation des résultats et évaluation/Recommandations

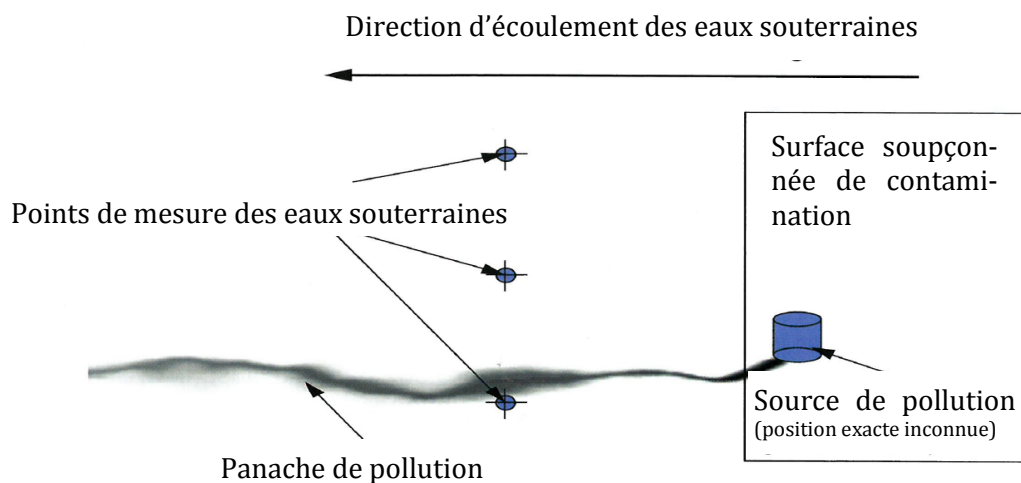
Lors de la troisième phase, le groupe de projet a procédé à une interprétation des résultats et a évalué l'applicabilité des EPI dans les conditions spécifiques présentes en Suisse. On a donc discuté des conditions dans lesquelles les EPI pouvaient constituer une méthode d'investigation appropriée pour localiser les foyers et les panaches de pollution, et quantifier les charges.

### 3. Définition des essais de pompage intégraux

#### 3.1 Principe

Selon l'art. 14 de l'Ordonnance sur les sites contaminés (OSites) concernant l'investigation de détail (ID), les buts et l'urgence de l'assainissement sont évalués entre autres sur la base de l'identification et de l'évaluation du type des atteintes à l'environnement effectives et possibles, de la charge et de l'évolution de ces atteintes dans le temps. La charge peut en plus aussi jouer un rôle significatif lors du contrôle des résultats d'un assainissement (par ex. dans quelle mesure la charge diminue après l'assainissement).

Par rapport à l'enregistrement des concentrations de polluants à l'aval d'un site pollué, méthode depuis longtemps éprouvée, la détermination de la charge polluante constitue une tâche complexe dans le traitement des sites contaminés. Pour déterminer cette charge, on procède d'abord à une analyse des eaux souterraines prélevées à des points de mesure dans l'aquifère. Le défi est de régionaliser les concentrations polluantes déterminées dans des échantillons prélevés ponctuellement, c-à-d d'extrapoler les données établies pour des points de mesure souvent peu nombreux pour obtenir la quantité totale de polluants libérée par le site (voir Figure 3-1).



**Figure 3-1:** Panache de pollution dans les eaux souterraines à l'aval (aquifère hétérogène) d'un site dont la position du foyer de pollution n'est pas connue avec exactitude (selon Teutsch et al., 2000 [3])

Le procédé des EPI permet quant à lui une détermination spatiale intégrative du flux massique de polluants dans la zone de captage de l'essai de pompage. Ainsi, les EPI servent à déterminer la charge polluante directement et permettent en outre de localiser les panaches et les foyers de pollution. Cela peut apporter une contribution importante, autant lors de la première évaluation d'un site pollué que lors du traitement subséquent du site contaminé.

**Définition:**

Un essai de pompage intégral est un essai hydrogéologique réalisé sur le terrain dans le but de déterminer la charge polluante transitant par une section de contrôle d'un aquifère.

En plus du relevé de la charge polluante, les EPI permettent de déterminer quantitativement la répartition des concentrations (immissions) le long de la section de contrôle et de faire des déductions sur les panaches et les foyers de pollution.

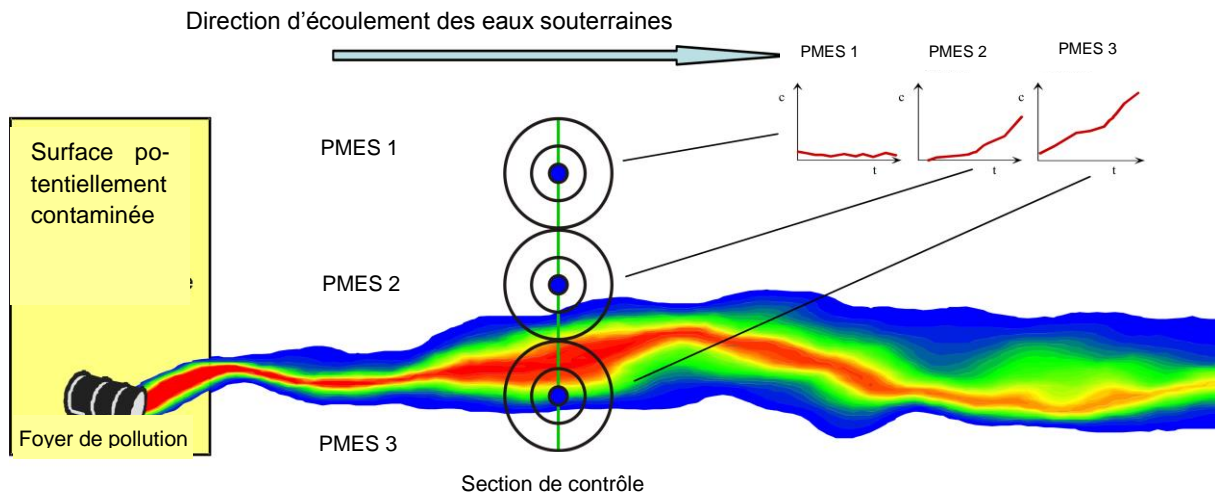
### 3.2 Principe du procédé

Le principe du procédé par EPI est décrit dans diverses publications. Les explications qui suivent sont un recoupement des explications de Ptak et al., 2013 [4] et de la publication du LUBW concernant la gestion intégrale des sites contaminés [2]. Pour plus de détails, on se référera à ces deux ouvrages.

Lors d'un EPI, l'eau souterraine pompée est échantillonnée à maintes reprises, puis on détermine la concentration des polluants à investiguer. L'évolution temporelle de la concentration contient des informations sur la répartition spatiale des concentrations dans la zone d'appel de l'essai de pompage. La zone d'appel, qui augmente avec la durée du pompage, est décrite pour chaque instant d'échantillonnage par une isochrone (ligne de temps d'écoulement égal jusqu'au puits de pompage) dont la géométrie dépend des paramètres suivants : durée du pompage, débit de pompage, épaisseur de l'aquifère, porosité, coefficient de perméabilité et pente de la nappe.

Dans le plus simple des cas, l'intégralité du panache de pollution est couverte par un seul puits de pompage positionné à l'aval de la source polluante.

Les panaches de pollution relativement larges peuvent être couverts par une série de plusieurs puits aménagés à l'aval du foyer de pollution, verticalement par rapport à la direction d'écoulement, le long de ce que l'on appelle une section de contrôle (figure 3-2). La position des puits, la durée de pompage et les débits de pompage doivent être choisis de sorte que l'ensemble de la zone aval d'un site puisse être couverte au niveau de la section de contrôle. Le nombre de puits de pompage nécessaires dépend principalement de la largeur de la section de contrôle à investiguer et de la largeur de la zone d'appel que les puits sont capables d'atteindre.



**Figure 3-2:** Principe d'un essai de pompage intégral avec trois points de mesure des eaux souterraines (PMES) placés le long d'une section de contrôle (d'après Teutsch et al., 2000 [3])

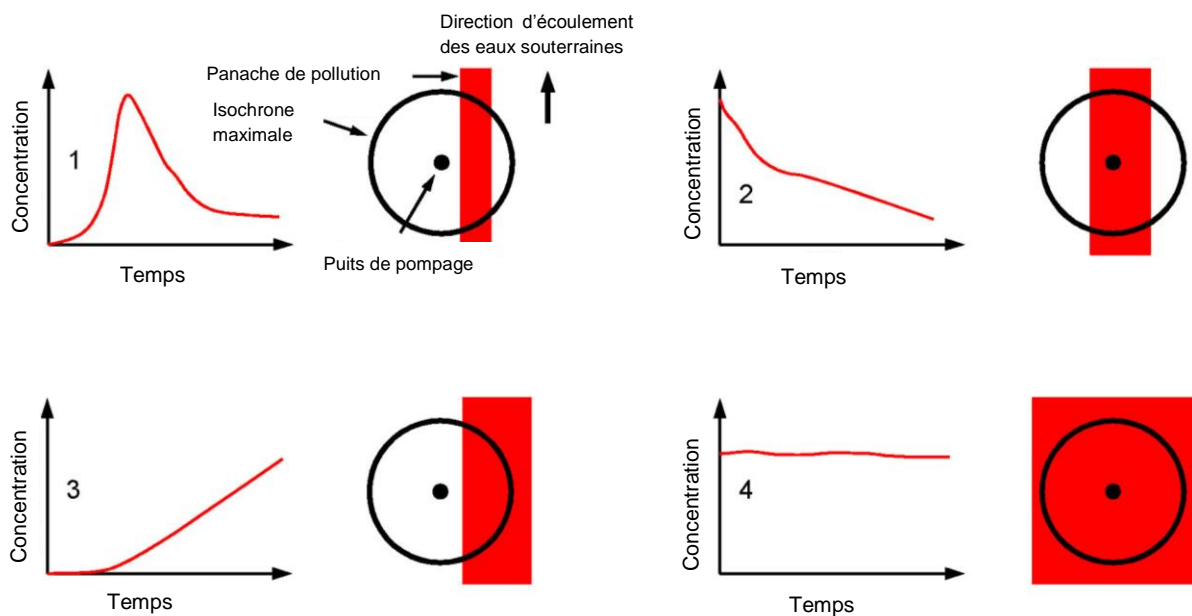
Selon la position du panache par rapport au puits, on peut distinguer différents scénarios d'évolution de la concentration dans le puits de contrôle (voir Figure 3-3):

Cas 1: Le puits de contrôle se trouve en-dehors du panache, et la zone d'appel de l'EPI s'étend jusque de l'autre côté du panache (maximum de concentration, puis dilution).

Cas 2: Le puits de contrôle se trouve à l'intérieur du panache, la zone d'appel de l'EPI s'étend au-delà du panache.

Cas 3: Le puits de contrôle se trouve en-dehors du panache, la portée de l'EPI n'atteint pas la limite extérieure du panache.

Cas 4: Le puits de contrôle se trouve à l'intérieur du panache, la portée de l'EPI n'atteint pas les bords du panache.



**Figure 3-3:** Types de courbes caractéristiques des concentrations et panaches de pollution correspondants (d'après Teutsch et al, 2000 [3])

L'interprétation de l'EPI consiste à calculer la répartition potentielle des polluants dans la zone d'appel des puits à partir des courbes de concentration mesurées. La concentration moyenne en polluant dans la section de contrôle et le flux naturel des eaux souterraines permettent de calculer la charge polluante transitant par la section de contrôle.

Il existe différents outils d'interprétation. Les différents procédés d'analyse sont énumérés et évalués dans [4]. Uwe Hekel a aussi présenté des outils usuels dans son exposé lors de la Journée technique Chloronet 2014 [1].



### **3.3 EPI réalisés en Suisse jusqu'à présent**

En Suisse, les EPI ont seulement été utilisés en de rares endroits comme moyen auxiliaire d'investigation des sites contaminés. Des essais de pompage ont toutefois été réalisés sur de nombreux sites, et l'évolution de la concentration en polluants a été analysée à l'aide de plusieurs échantillonnages. Mais la plupart du temps il ne s'agit pas d'un procédé systématique permettant de calculer des répartitions de polluants et des charges à partir de l'évolution des concentrations.

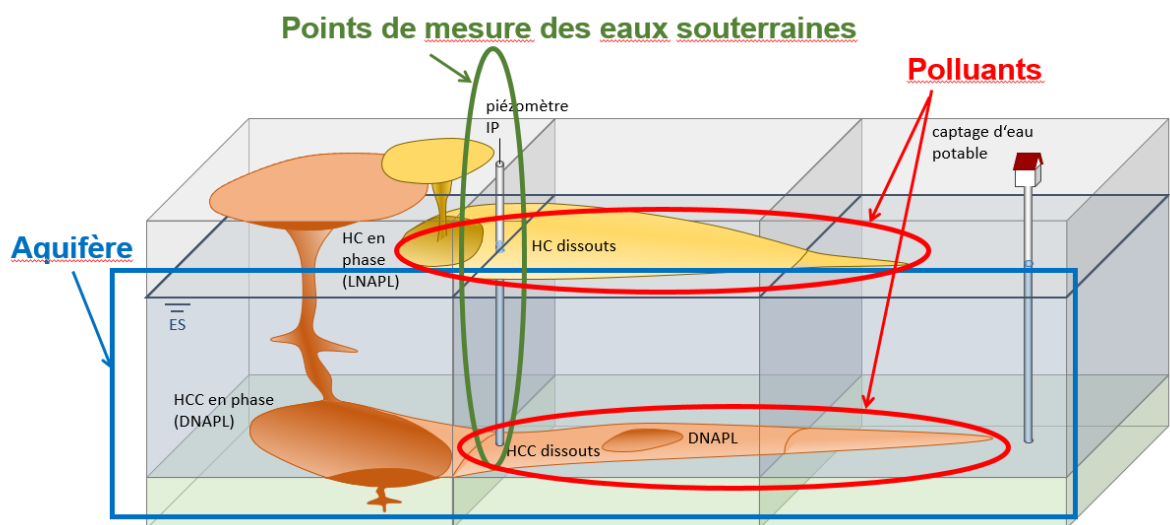
Dans le Baden-Wurtemberg (D), le procédé par EPI est appliqué depuis plus de 10 ans comme outil standard pour déterminer les émissions et les charges polluantes dans les eaux souterraines lors du traitement des sites contaminés. Sont investigués autant des sites ponctuels que des pollutions complexes des eaux souterraines en milieu urbain (approche intégrale), où l'identification des sources polluantes a souvent une importance primordiale.

## 4. Exigences relatives au site

### 4.1 Critères d'application

Sur la base des expériences des projets antérieurs, le LUBW a réuni des critères essentiels qui doivent être vérifiés avant de réaliser des EPI [2]. Le groupe de projet a adapté ces critères à la situation hydrogéologique de la Suisse et a défini trois domaines pour lesquels des critères de vérification ont été élaborés et évalués en vue de la réalisation d'EPI en Suisse (Figure 4-1):

- Situation relative aux polluants
- Situation hydrogéologique (aquifère)
- Situation relative au site (infrastructure: points de mesure des eaux souterraines)



**Figure 4-1:** Domaines pour lesquels des conditions de réalisation ont été formulées (source: OFEV, légèrement modifié)

Les critères de vérification et les exigences sont exposés dans la suite, tableaux Tableau 4-1, Tableau 4-2 et Tableau 4-3. Sont décrites comme critères d'exclusion les conditions que le groupe de projet considère comme devant obligatoirement être remplies pour pouvoir planifier resp. réaliser un EPI.

**Une condition fondamentale pour la planification est de connaître la situation hydraulique et les valeurs caractéristiques du site investigué.**

Les critères d'exclusion sont par ex.

- des polluants présents en phase ou en trop faibles concentrations dans la zone de prélèvement,
- un site ne se prêtant par principe pas à des essais de pompage (par ex. sous-sol constitué de sable fin/limon)
- des informations (encore) insuffisantes (concernant par ex. l'aquifère et la direction d'écoulement) pour la planification d'un EPI.

Critère	Exigences	Base pour l'évaluation	Critère d'exclusion	Explication
<b>Concentrations</b>	Suffisamment élevées également à l'aval du site (au minimum 1 ordre de grandeur au-dessus des limites de détection)	Analyses des eaux souterraines sur le site	oui	En cas de concentrations trop faibles, il n'est pas possible d'établir une courbe de transit probante.
<b>Présence de polluants</b>	Pas de HCC en phase dans la zone de prélèvement	Analyses des matières solides sur le site	oui	La présence de HCC en phase dans la zone de prélèvement mène à des résultats erronés (immission et émission)
<b>Répartition des polluants</b>	Répartition des polluants aussi constante que possible sur toute l'épaisseur de l'aquifère considérée	Informations tirées d'analyses en profondeur des eaux souterraines (par ex. échantillonnage multi-niveaux)	non	Incertitudes dues au calcul de la moyenne lors de l'interprétation
<b>Dégradation</b>	Si possible pas de gradient de concentration dans la direction d'écoulement à l'intérieur de la zone d'appel	Analyses des eaux souterraines sur le site	non	La dégradation à l'intérieur de la zone d'appel n'est pas prise en compte lors de l'interprétation et mène à des erreurs

**Tableau 4-1:** Critères pour le domaine relatif aux polluants (énumération et évaluation)

Critère	Exigence	Base pour l'évaluation	Critère d'exclusion	Explication
<b>Aquifère</b>	Aquifère poreux	Carte hydrogéologique/carte des eaux souterraines	oui	Pas d'aquifère fissuré / karstique
<b>Composition et perméabilité de l'aquifère</b>	Exigences minimales concernant la perméabilité: Gravier ou sable grossier/moyen	Connaissance des propriétés hydrauliques (valeur $k_f$ , porosité). Détermination par essais de pompage représentatifs.	oui	Perméabilité trop faible: zone d'appel restreinte Perméabilité trop grande: quantités d'eau très élevées, coûts importants
<b>Épaisseur de l'aquifère</b>	Épaisseur idéale entre 2 et 10 m	Profils de forage sur le site		Colonne d'eau faible : rabattement et débit de pompage limités, portée plus faible Épaisseur importante: portée plus faible en fonction du temps

Critère	Exigence	Base pour l'évaluation	Critère d'exclusion	Explication
<b>Homogénéité de l'aquifère</b>	Idéalement aquifère ± homogène	Analyse de la matière forée		Homogène: sans différences lithologiques facilement différenciables à l'échelle macroscopique (par ex. lentilles de matériaux fins dans une couche de matériaux grossiers dans la zone appel)
<b>Flux des eaux souterraines</b>	La direction d'écoulement et le gradient hydraulique doivent être connus	Mesures à dates fixées, év. essais de traçage		Une vitesse d'écoulement très élevée donne une zone de prélèvement étroite
<b>Niveau de la nappe souterraine</b>	Idéalement pas trop profond		non	Une nappe profonde engendre des coûts élevés (par ex. les forages plus profonds)

**Tableau 4-2:** Critères relatifs à la situation hydrogéologique (énumération et évaluation)

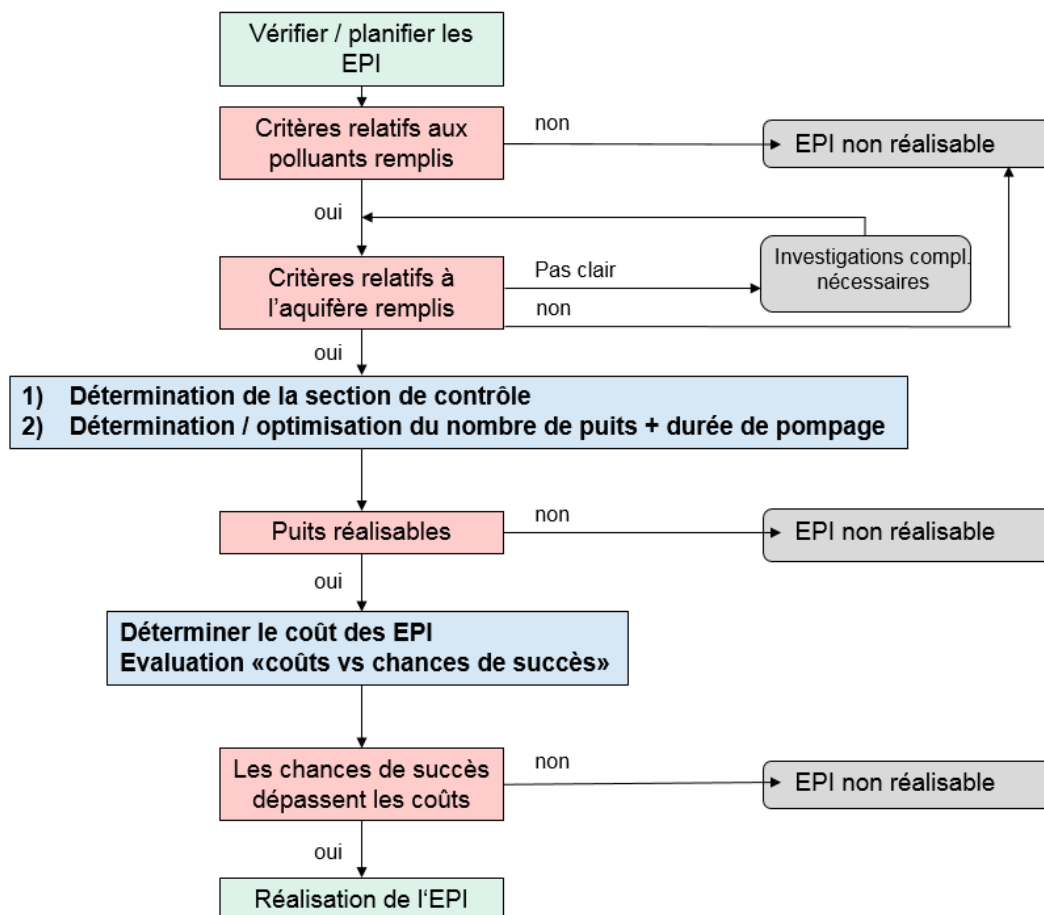
Critère	Exigence	Base pour l'évaluation	Critère d'exclusion	Explication
<b>Puits complets</b>	Puits crépiné jusqu'au niveau du plancher inférieur sur toute la profondeur de l'aquifère	Profils de forage sur le site	non	Pour les puits incomplets, les conclusions se limitent à la zone crépinée
<b>Nombre / disposition</b>	Couverture de l'intégralité de la zone aval prévue; section de contrôle ⊥ à la direction d'écoulement	Connaissance de la longueur approximative du panache de pollution (sur la base d'analyses d'eau souterraine)	oui	Le nombre requis de points de mesure dépend de la largeur du panache et de la zone d'appel possible
<b>Diamètre</b>	Doit permettre un débit de pompage suffisamment élevé (idéalement tubes filtrants min. 4.5")		non	Pour les plus petits diamètres, le débit de pompage est limité et la portée est plus faible
<b>Accessibilité</b>	Doit être assurée pendant toute la durée de l'essai de pompage (plusieurs jours)	Clarifier l'affectation du site et la nécessité d'obtenir d'éventuelles autorisations à l'avance	oui	Il ne faut pas interrompre le pompage, sinon difficultés lors de l'interprétation

<b>Aménagement des points de mesure</b>	Points de mesure hydrauliquement fonctionnels  Le matériau utilisé pour le revêtement ne doit pas avoir d'influence sur les polluants		oui	Pas de sorption des polluants sur le revêtement/pas de dépôts dans le puits
<b>Colonne d'eau</b>	Colonne d'eau suffisamment importante et rabattable requise		oui	Voir épaisseur de l'aquifère

**Tableau 4-3:** Critères pour le domaine situation relative site (énumération et évaluation)

## 4.2 Aide à la décision pour la planification des EPI

Un arbre de décision pour la planification des EPI a été développé sur la base des conditions et critères de vérification présentés au chap. 4.1 (Figure 4-2). Cet arbre représente le déroulement lors du choix des sites pilotes, mais peut aussi être utilisé de manière générale comme aide à la décision pour la planification d'EPI.

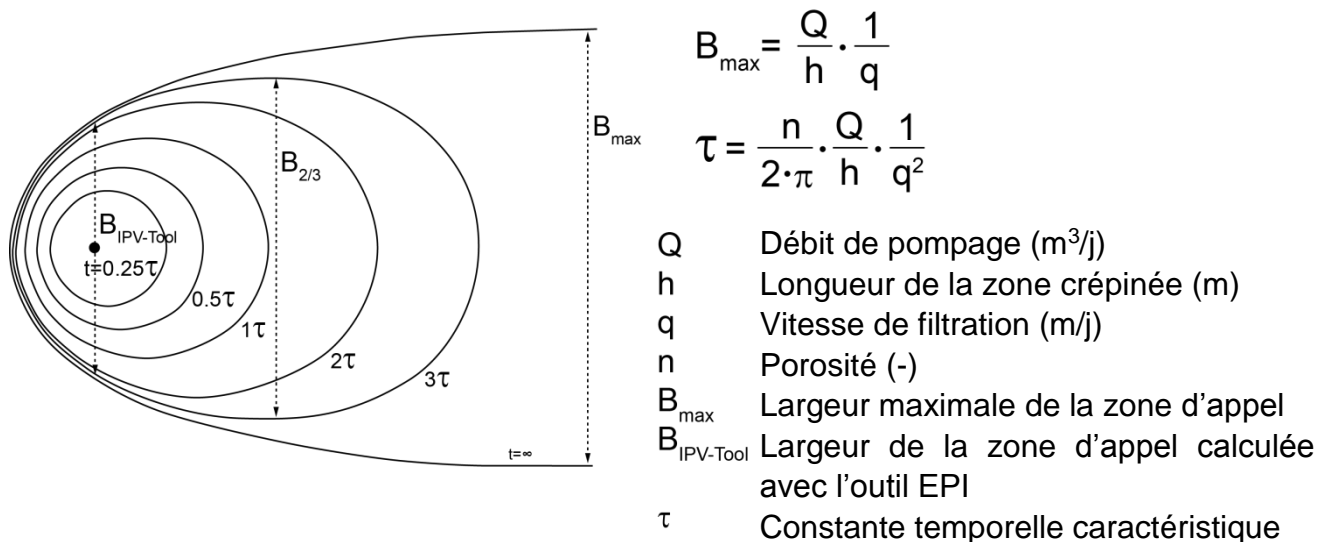


**Figure 4-2:** Arbre de décision pour la planification d'EPI

Certaines étapes de vérification de l'arbre de décision requièrent une évaluation quantitative des zones d'appel pouvant être couvertes par les EPI. Ceci concerne la vérification des conditions hydrogéologiques, la détermination du nombre de puits et des durées de pompage nécessaires et finalement l'évaluation des coûts. Une première appréciation peut être faite sur la base des diagrammes développés dans le chap. 4.3 qui montrent l'influence des facteurs hydrogéologiques sur la largeur de la zone d'appel couverte par un EPI.

### 4.3 Analyse de sensibilité - Influence de différents facteurs hydrogéologiques sur la largeur de la zone d'appel

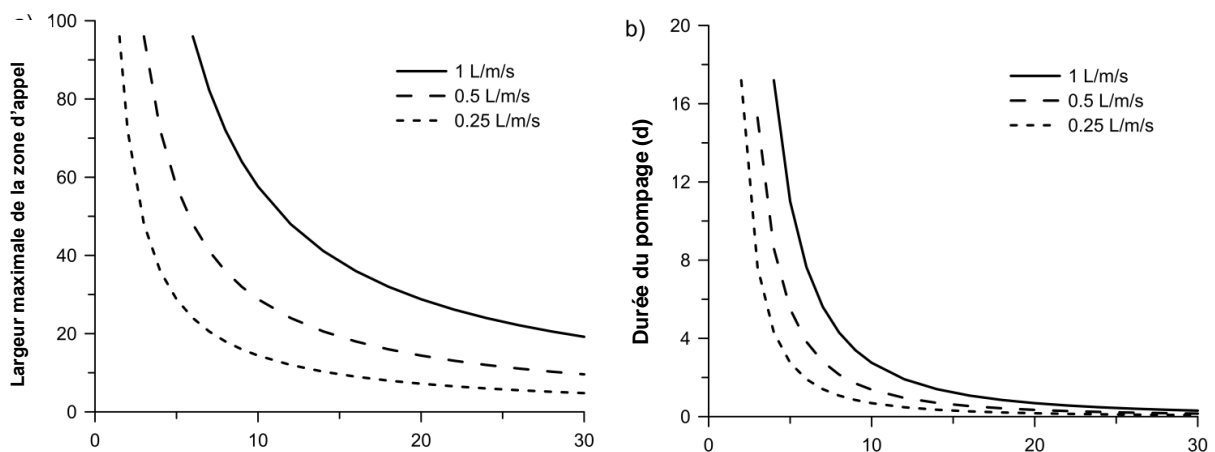
Pour que la méthode EPI soit efficace, la zone d'appel couverte par chaque EPI doit être le plus large possible. Dans cette partie, on discute de la manière dont les différents facteurs hydrogéologiques influencent la largeur de la zone d'appel. La discussion repose sur des calculs avec une solution analytique de l'équation du flux des eaux souterraines pour un puits de pompage. Les solutions analytiques ont l'avantage de pouvoir montrer directement la relation entre différents facteurs d'influence. Les résultats restent toutefois approximatifs car le calcul repose sur l'hypothèse que les conditions sont homogènes. Les calculs permettent d'évaluer rapidement s'il est possible d'atteindre une zone d'appel suffisamment large avec un EPI dans des conditions hydrogéologiques données, et comment on peut influencer la largeur de la zone d'appel lors de la réalisation d'un EPI.



**Figure 4-3:** Évolution temporelle de la largeur de la zone d'appel en fonction de la durée du pompage, solution analytique de l'équation du flux des eaux souterraines pour un puits de pompage. Formules pour calculer la largeur maximale de la zone d'appel  $B_{\max}$  et la durée nécessaire pour que la zone d'appel atteigne une certaine largeur, par ex. 2/3 de son étendue maximale ( $B_{2/3}$ ). La durée est exprimée comme fonction d'une constante temporelle caractéristique qui dépend de différents facteurs.

La Figure 4-3 montre comment la largeur de la zone d'appel s'étend en fonction du temps jusqu'à atteindre une zone d'afflux constante. Pour comprendre les possibilités et les limites d'un EPI, il est instructif de considérer la largeur de la zone d'appel maximale théoriquement atteignable et la vitesse à laquelle on s'approche de cette largeur maximale. La largeur maximale de la zone d'appel correspond au produit du débit de pompage spécifique (débit de pompage divisé par la longueur de la zone crépinée ( $Q/h$ )) par l'inverse de la vitesse de filtration ( $1/q$ ). Un débit de pompage élevé ne sert donc pas seulement à réduire la durée d'un EPI, mais aussi, de manière générale, à atteindre une largeur importante pour la zone d'appel. Cela est le cas en particulier lorsque la vitesse de filtration est élevée, donc  $1/q$  petit, et qu'il faut mathématiquement parlant un rapport  $Q/h$  élevé pour compenser la faible valeur de  $1/q$ .

La Figure 4-4a montre comment la largeur maximale de la zone d'appel se comporte en fonction du débit de pompage spécifique et des conditions d'écoulement; pour des raisons de commodité, on a choisi de reporter la vitesse d'écoulement  $v (=q/n)$  sur l'axe des x. Les débits de pompage spécifiques appliqués correspondent par exemple à un débit de pompage de 5 L/s réparti sur une longueur crépinée de 5 m (1 L/m/s), 10 m (0.5 L/m/s) et 20 m (0.25 L/m/s) dans un puits entièrement crépiné. Des vitesses d'écoulement faibles permettent d'obtenir des largeurs maximales élevées; en cas de vitesses d'écoulement élevées, ces largeurs maximales diminuent jusqu'à 5 - 20 m selon le débit de pompage spécifique. La rapidité avec laquelle la zone d'appel maximal possible est atteint dépend fortement de la vitesse de filtration, qui apparaît avec un exposant 2 au dénominateur de l'équation de la durée de pompage (Figure 4-3). Avec de faibles vitesses de filtration, il faut >10 jours pour atteindre les 2/3 de la largeur maximale de la zone d'appel (Figure 4-4b), alors qu'avec des vitesses de filtration élevées l'accroissement de la largeur du front est déjà limité après moins de 2 jours.



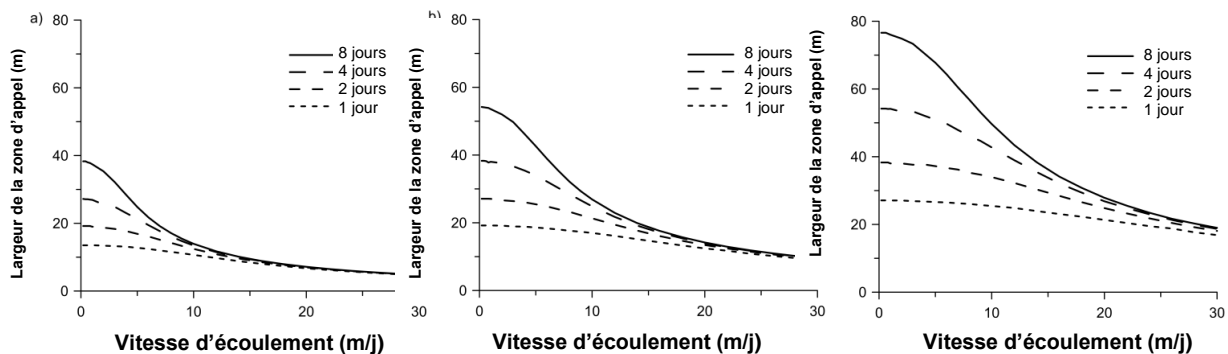
**Figure 4-4:** (a) Évolution de la largeur maximale de la zone d'appel en fonction de la vitesse d'écoulement et du débit de pompage spécifique (débit de pompage divisé par la longueur crépinée).  
(b) Durée de pompage nécessaire pour atteindre les 2/3 de la largeur maximale de la zone d'appel.

La Figure 4-5 représente la largeur de la zone d'appel en fonction de la vitesse d'écoulement pour différentes durées de pompage<sup>1</sup>. Avec des vitesses d'écoulement élevées, la largeur maximale de la zone d'appel est rapidement atteinte. Une durée de pompage plus longue n'apporte donc aucun gain supplémentaire d'information et ne fait qu'augmenter les coûts. Il est uniquement possible d'accroître la largeur de la zone d'appel en augmentant le débit de pompage, comme l'illustre la comparaison entre la Figure 4-5a (0.25 L/m/s) et la Figure 4-5c (1 Lm/s). Avec des vitesses d'écoulement plus faibles, la largeur de la zone d'appel augmente

<sup>1</sup> La largeur de la zone d'appel correspond ici à la largeur maximale d'une isochrone (correspond à  $B_{2/3}$  dans la Figure 4-3). Dans les outils de calcul téléchargeables sur le site internet du LUBW, la largeur de la zone d'appel est toutefois définie différemment. Le programme C-SET utilise la largeur de la zone d'appel de manière correcte selon la définition ci-dessus. Par contre, l'«outil EPI» utilise la largeur de la zone d'appel au niveau du puits de pompage, ce qui mène à une nette sous-estimation de la charge calculée en cas d'isochrones non concentriques (flux souterrain plus élevé).



en continu. Cette largeur n'augmente toutefois qu'avec la racine carrée du temps en raison de la forme elliptico-radiale de la zone d'appel.



**Figure 4-5:** Largeur de la zone d'appel en fonction de la vitesse d'écoulement et de la durée de pompage pour trois différents débits de pompage spécifiques: 0.25 L/m/s (a), 0.5 L/m/s (b) et 1 L/m/s (c)

### Efficacité de la méthode EPI

L'efficacité de la méthode EPI dépend de la largeur du zone d'appel atteignable lors du pompage:

- Les vitesses d'écoulement  $>10$  m/j permettent seulement d'atteindre une largeur limitée du zone d'appel, qui dépend essentiellement du débit de pompage spécifique. Pour un débit de pompage donné, la largeur du zone d'appel est inversement proportionnelle à la longueur crépinée. Cela signifie qu'une vitesse d'écoulement élevée combinée à une longue partie crépinée donnent une zone d'appel restreinte qui est atteinte assez rapidement.
- Les vitesses d'écoulement  $<10$  m/j permettent d'atteindre de plus grandes largeurs, qu'il est possible d'étendre encore en prolongeant la durée du pompage. Mais la largeur du zone d'appel n'augmente qu'avec la racine carrée du produit du débit de pompage spécifique par la durée de pompage.

#### 4.4 Évaluation du site pour les projets pilotes

Les sites pour les projets pilotes ont été sélectionnés selon l'arbre de décision décrit dans la figure 4-2. Idéalement, les sites recherchés devaient remplir les critères relatifs à l'aquifère, aux polluants et aux points de mesure des eaux souterraines. Mais il est rare de trouver de tels sites dans la pratique. Il a donc fallu faire des concessions lors du choix des sites pour les projets pilotes. Ce sont en premier lieu les critères d'exclusion qui ont été déterminants pour décider si la réalisation d'EPI sur un site promettait d'être pertinente resp. efficace (voir Tableau 4-1 à Tableau 4-3). Dépenses (coûts) et valeur informative de l'essai doivent faire l'objet d'une pesée d'intérêts.

Les résultats de l'évaluation des sites sont représentés dans le tableau 4-4. La représentation se limite aux principaux critères relatifs aux polluants, à l'hydrogéologie et au site:

- Les **sites A et B** remplissaient les critères de réalisation pour les EPI et ont donc été choisis pour les projets pilotes (chap. 6.2 et 6.3)
- Les **sites C et D** remplissaient partiellement les critères de réalisation. Des EPI y avaient déjà été réalisés lors d'investigations antérieures. Ces sites offraient donc l'occasion de vérifier et d'évaluer les critères de réalisation et les résultats des anciens EPI (chap. 6.4 et 6.5).
- Les **sites E, F et G** ont été mis de côté dans la procédure d'évaluation pour diverses raisons (annexe A).

Les critères faisant le plus souvent défaut pour de nombreux sites étaient :

- faible épaisseur de l'aquifère/faible perméabilité
- forte hétérogénéité
- couverture du panache impossible, resp. pas rentable
- connaissances imprécises du flux des eaux souterraines/direction d'écoulement
- perméabilité mal connue

En plus

- rapport coûts/bénéfice défavorable, coûts très élevés resp. manque de financement
- problèmes juridiques (par ex. désaccord avec le propriétaire du site)

Critère		Site A	Site B	Site C	Site D	Site E		Site F	Site G
						près du foyer	plus à l'aval		
Situation relative aux polluants	Concentrations en polluants suffisamment élevées	PCE 1,7 - 30 µg/l	$\Sigma$ CKW 7,5 - 93 µg/l R113 0 - 27 µg/l	PCE 0,4 - 37 µg/l	PCE 17 - 26 µg/l	PCE 500 - > 1000 µg/l	PCE < 10 - 100 µg/l	PCE 0,1 - 640 µg/l	HCC jusqu'à > 1000 µg/l
	DNAPL's dans la zone d'appel	non, car section de contrôle plus loin à l'aval	pas déterminant dans la zone de la section de contrôle	peu vraisemblable dans la zone du panache	peu vraisemblable dans la zone du panache	OK sur roche, écoulement de phase pas exclu	peu vraisemblable plus loin à l'aval	pas dans la zone de la source polluative, rien n'indique la présence de PER en phase	peu vraisemblable dans la zone de la section de contrôle
Situation hydrogéologique	Exigences minimales relatives à l'aquifère	Gros gravier très perméable $k=3 \cdot 10^{-3}$ m/s	Gravier sableux très perméable $k=3 \cdot 10^{-3}$ m/s	Gravier limono-sableux très perméable $k=1 \cdot 10^{-3}$ m/s	Gravier pierreux extrêmement perméable $k=1 \cdot 10^{-2}$ m/s	Gravier silteux	Gravier sableux	Gravier sableux très perméable $k=1 \cdot 10^{-3}$ m/s	Gravier sableux probabl. bien perméable
	Epaisseur de l'aquifère 2-10 m	4,6 - 5,3 m	3,3 - 3,5 m	env. 2 m dans la zone du panache	env. 3 m	0 - 2 m plancher de l'aquifère avec relief marqué	4 - 5 m	8,7 m	3 - 4 m
	Aquifère ± homogène	± homogène le long de la section de contrôle, tenir compte du seuil latéral en base de l'aquifère	± homogène le long de la section de contrôle	± homogène; selon profils de forage, dépôts de même structure	limité, les forages voisins présentent de plus grandes teneurs en limon	éboulis de pente inhomogènes	Gravier ± homogène; Direction d'écoulement incertaine en raison du relief du plancher de l'aquifère et des infiltrations du Rhin	± homogène: gravier fluviatile avec teneurs en sable variables, partie fine argilo-limoneuse très faible	± homogène le long de la section de contrôle
Situation du site	Puits complets	oui	oui	oui	oui	(probabl.) oui	(probabl.) oui	oui	oui, à reconstruire en partie
	Couverture de l'ensemble de la section aval prévue	oui, par 2 puits, zones d'appel se chevauchent	oui, par 2 puits, zones d'appel se chevauchent	oui, par 2-3 puits, zones d'appel se chevauchent	non, un seul EPI à l'intérieur du panache, les bords ne sont pas atteints	pas possible, car les zones d'appel des EPI sont tout au plus très petites	pas possible avec les puits existants, car pas de section de contrôle fermée	probabl. oui; selon planification, un seul puits permettrait de couvrir une section de contrôle large de 60 m	oui, par 3 puits, zones d'appel se chevauchent
	Accessibilité garantie	oui	oui	oui	oui	probabl. oui	probabl. oui	Zone de livraison et de transbordement	avec réserve
	Essais pilotes finançables	oui	oui	EPI déjà disponibles	EPI déjà disponibles	non	non	non	non

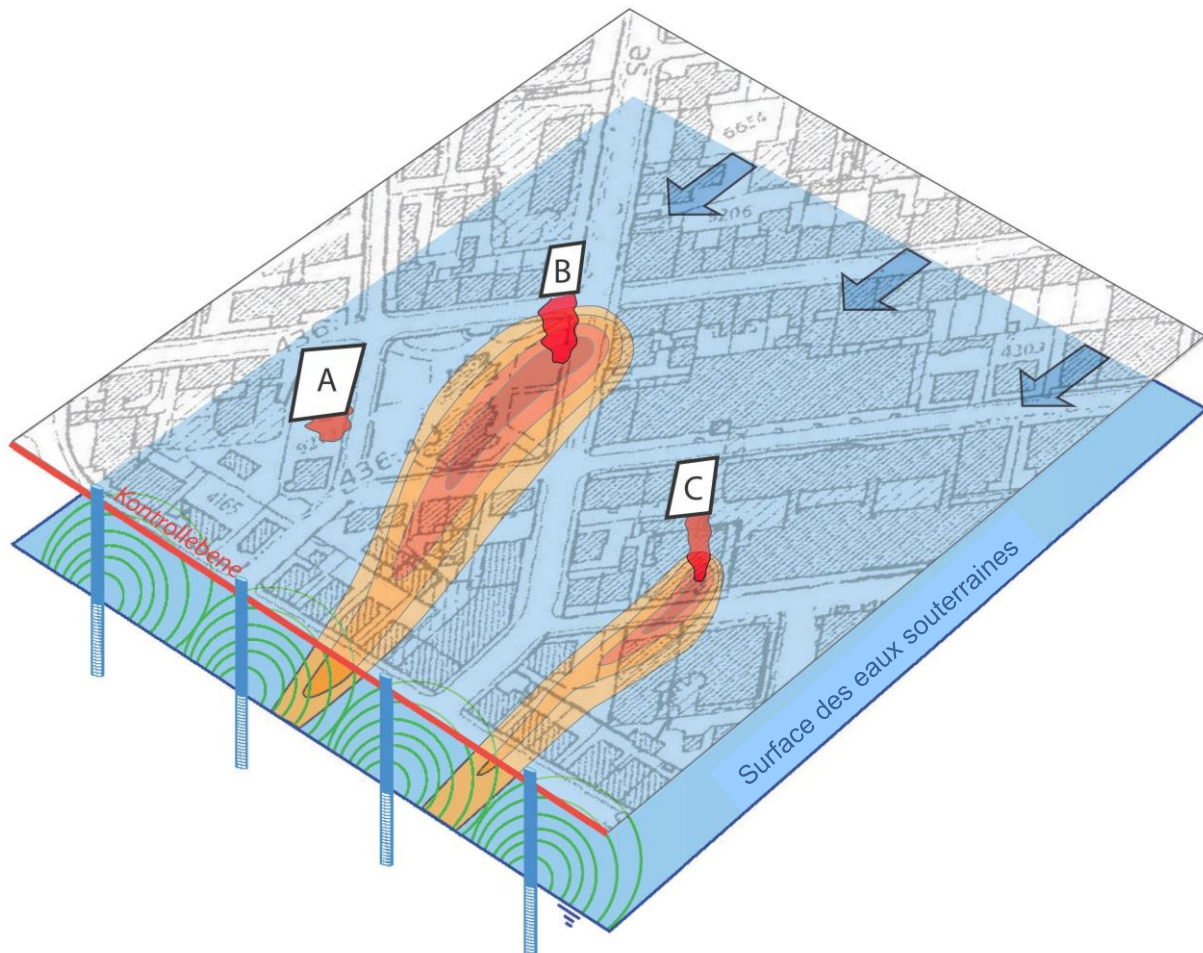
**Tableau 4-4:** Évaluation des sites possibles selon les principaux critères de réalisation pour les EPI (en vert: exigences minimales pour les EPI remplis; en jaune: EPI réalisables, mais avec restrictions; en rouge: exigences minimales pour les EPI non remplis)

## 5. Priorisation des sites nécessitant investigation au moyen des EPI

### 5.1 Situation initiale et objectifs

Dans le canton de Zurich, env. 400 sites pollués aux HCC sont actuellement encore classés comme nécessitant investigation. Au vu du grand nombre de sites restant à investiguer, la question s'est posée de savoir s'il était possible de clarifier à l'avance par EPI les immissions libérées par plusieurs sites, puis, sur la base des résultats des EPI, d'établir des priorités concernant l'urgence des investigations préalables des sites contaminés (IP).

Pour répondre à la question susmentionnée, il faudrait pouvoir vérifier l'applicabilité des EPI resp. les sections de contrôle au moyen de plusieurs EPI dans le cadre d'une étude de faisabilité (Figure 5-1). Pour cela, on a planifié d'évaluer les sites potentiels dans une première phase, et d'effectuer des essais pilotes avec réalisation et interprétation d'EPI sur la base d'exemples concrets dans une seconde phase.



**Figure 5-1:** Approche régionale pour la réalisation d'EPI

## 5.2 Conditions pour les essais pilotes

Comme indiqué dans le chap. 4.1, divers critères doivent être remplis pour que les EPI donnent de bons résultats. Au stade de l'IP, ni la situation relative aux polluants ni la situation hydrogéologique ne sont évidemment suffisamment connues. En outre, il n'y a la plupart du temps pas encore de points de mesure ou de puits à disposition, ce qui a une incidence négative sur l'efficacité des coûts.

C'est pourquoi les régions prioritaires pour un essai pilote devaient avoir plusieurs sites pollués par des HCC à proximité les uns des autres, au moins un site déjà bien étudié, et une pollution des eaux souterraines aux HCC facile à détecter. Le but était de pouvoir capter au moyen des EPI le panache s'échappant du site connu dans une section de contrôle à l'aval des sites (Figure 5-1).

La recherche de sites potentiels pour la réalisation d'EPI s'est dans un premier temps basée sur des analyses SIG. Les zones qui entraient en ligne de compte ont ensuite été soumises à un examen plus détaillé : autant les documents disponibles concernant les sites pollués que les données sur les conditions hydrogéologiques et la situation des points de mesure ont été évalués.

## 5.3 Recherche de sites au moyen d'analyses SIG

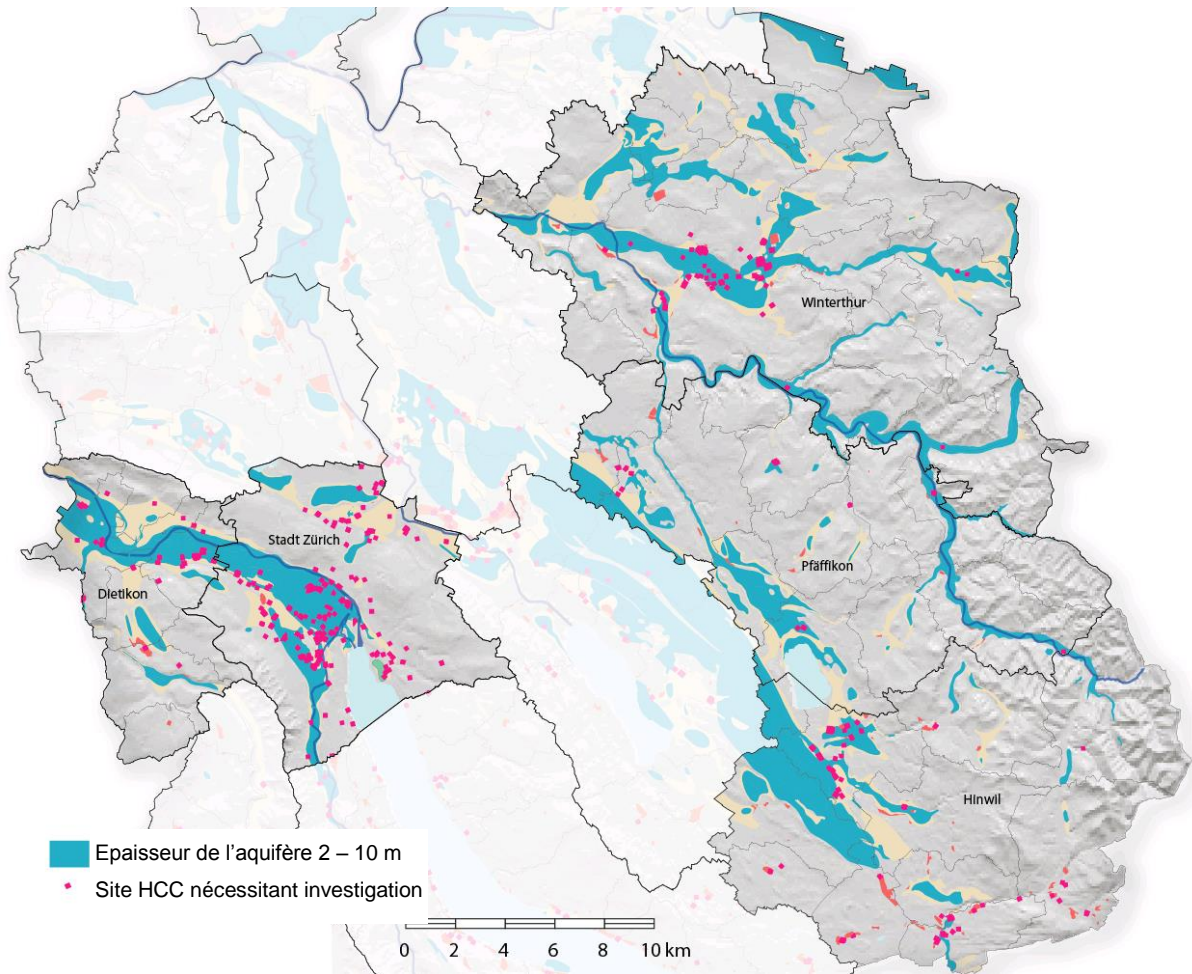
Les analyses SIG se sont basées sur le cadastre des sites pollués et sur la carte des eaux souterraines du canton de Zurich (maps.zh.ch). Le périmètre considéré, resp. le périmètre de projet englobait les districts de Dietikon, Zurich, Winterthur, Pfäffikon et Hinwil, car ils comprennent relativement beaucoup de sites HCC nécessitant investigation situés sur des nappes phréatiques exploitables (Figure 5-2).

Les évaluations relatives au critère «épaisseur de l'aquifère» ont donné le résultat suivant : parmi environ 270 sites HCC considérés, seuls 73 resp. 27% étaient situés sur une nappe phréatique présentant une épaisseur exploitable entre 2 et 10 m (en moyennes eaux). Le classement correspond aux classes d'épaisseur répertoriées dans le SIG. Une différenciation plus détaillée n'était pas possible dans le cadre de l'étude de faisabilité. Mais on peut en principe partir de l'idée qu'en présence de l'épaisseur de nappe citée, les conditions de réussite des EPI étaient généralement remplies.

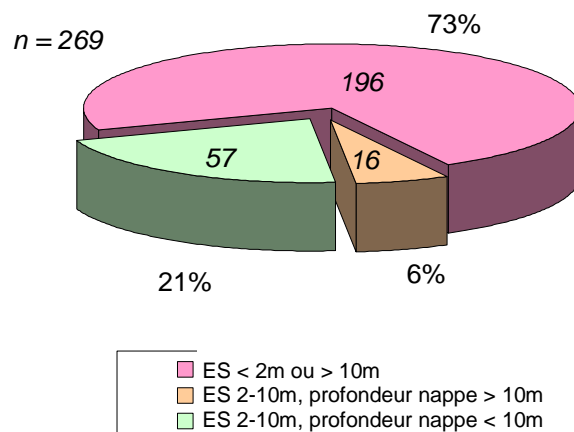
57 des 73 sites avec l'épaisseur de nappe requise présentaient une profondeur de nappe de 10 m au maximum. Il est certes possible de réaliser des EPI avec des aquifères plus profonds, mais les coûts augmentent considérablement; les sites présentant une profondeur de nappe > 10 m n'ont donc pas été retenus pour la suite de l'étude de faisabilité en raison de leur rapport coût/bénéfice.

De manière globale, les conditions hydrogéologiques pour une réalisation réussie des EPI à l'intérieur du périmètre considéré étaient donc remplies dans 21% des cas, resp. pour 57 sites HCC nécessitant investigation (Figure 5-3).





**Figure 5-2:** Périmètre de projet pour l'étude de faisabilité des EPI dans le canton de Zurich



**Figure 5-3:** Résultat de l'analyse SIG relativement au respect des critères hydrogéologiques

Pour des raisons de coûts également, il est important que les sites à investiguer ne soient pas trop éloignés les uns des autres. Les coûts à prévoir pour un EPI ont été évalués pour un exemple de cas dans la vallée zurichoise de la Limmat, où les foyers de HCC étaient distants de plusieurs centaines de mètres. Pour couvrir les panaches de HCC, il aurait fallu une section de contrôle de 600 m de long avec un total de 10 - 12 puits filtrants. Une durée de 7 jours par

puits a été calculée pour les essais de pompage. Au total, la réalisation d'EPI pour analyser seulement 3 sites HCC aurait entraîné des coûts de l'ordre de CHF 250'000 et il en aurait résulté un rapport coût/bénéfice défavorable.

Il découle des considérations précédentes que la réalisation d'EPI pour une première évaluation de sites HCC nécessitant investigation requiert une densité minimale de sites ainsi qu'une disposition spatiale optimale des panaches de pollution. On a donc fixé les critères supplémentaires suivants pour le projet pilote :

- distance maximale entre les sites HCC: 50 - 100 m (Figure 5-4)
- disposition des sites HCC: le plus transversalement possible par rapport au champ d'écoulement

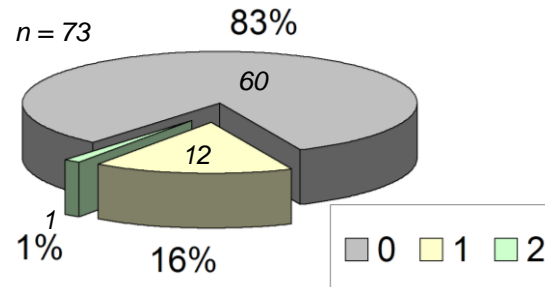


**Figure 5-4:** Analyse SIG avec des zones tampon de 100 m autour des sites HCC nécessitant investigation ; en jaune : densité de sites favorable (2 ou plusieurs sites < 100 m)

L'évaluation de tous les sites HCC avec une nappe d'épaisseur 2 - 10 m (sans tenir compte de la profondeur de la nappe) a montré que la distance au site HCC voisin était supérieure à 100 m pour 83% des 73 sites entrant en ligne de compte. C'est seulement dans 16% des cas que la distance entre 2 sites est inférieure à 100 m, et un seul cas comprend trois sites HCC distants de 50 - 100 m les uns des autres (Figure 5-5).

Les exigences pour la réalisation d'un essai pilote stipulaient en plus que le niveau de pollution aux HCC des eaux souterraines devait être bien connu grâce à de précédentes investigations, et que le site devait disposer des points de mesure correspondants. Après vérification des sites HCC nécessitant investigation entrant encore en ligne de compte, il s'est avéré que ce n'était le cas pour aucun d'entre eux.

**Figure 5-5:** Résultat de l'analyse SIG sur la densité de sites dans les régions où l'épaisseur des aquifères se situe entre 2 et 10 m (pourcentages avec 0, 1 resp. 2 autres sites HCC dans une zone tampon de 100 m)



Comme il n'est pas possible de réaliser des EPI dans le périmètre considéré malgré des conditions relativement favorables (grand nombre de sites HCC nécessitant investigation situés sur des aquifères exploitables), on évalue comme faible la probabilité de trouver des sites IP qui se prêteraient à la réalisation d'EPI selon l'approche régionale dans le reste du canton de Zurich.

#### Utilisation des EPI en vue de la priorisation:

L'étude de faisabilité des EPI en vue de la priorisation des sites HCC nécessitant investigation dans le canton de Zurich a montré qu'aucun des environ 270 sites n'était adapté pour réaliser des essais pilotes prometteurs.

Les principales raisons étaient que :

- les conditions hydrogéologiques (épaisseur et perméabilité idéales de l'aquifère, profondeur de la nappe < 10 m) ne sont pas respectées.
- la densité de sites est trop faible (la distance entre les sites HCC voisins dépasse les 100 m).

#### 5.4 Aide à la décision pour les EPI en vue de la priorisation des sites HCC

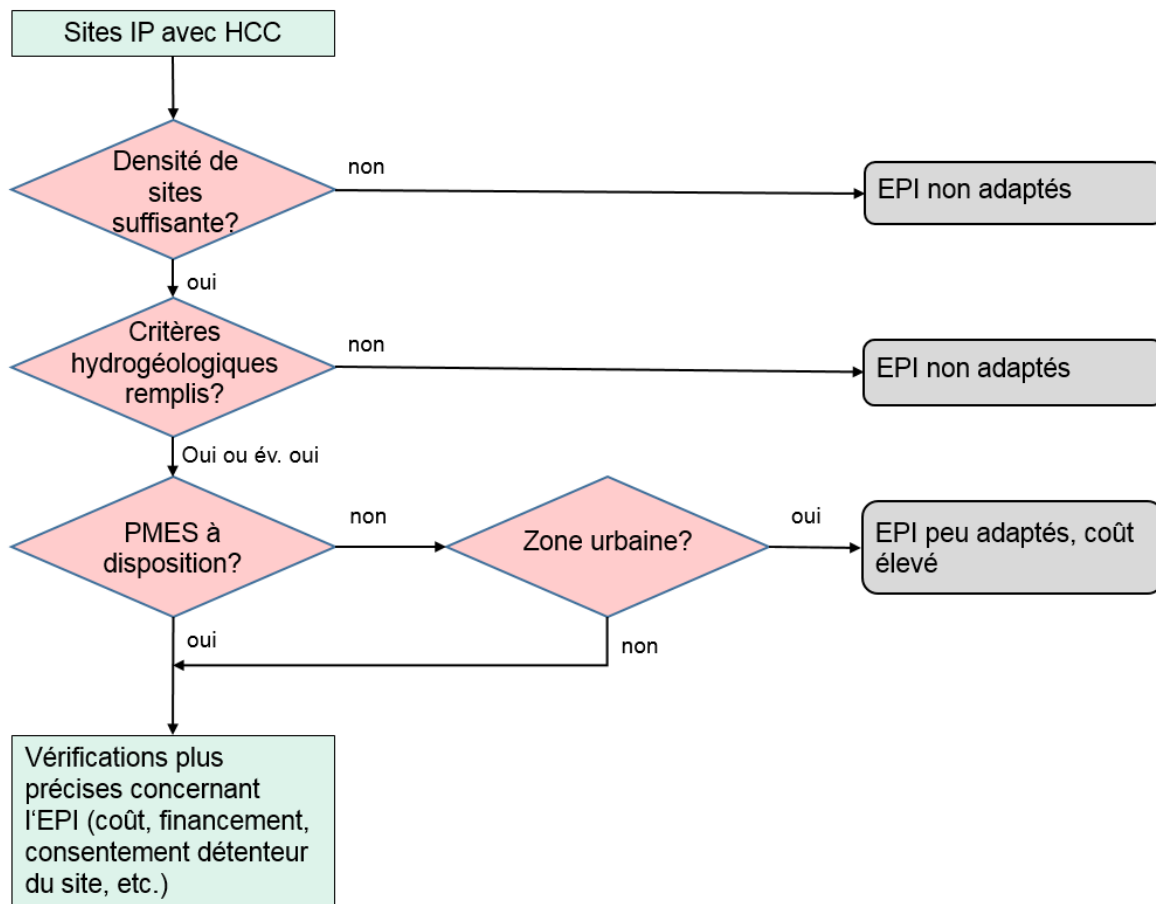
Même si les critères de réalisation d'EPI en vue de l'évaluation simultanée de plusieurs sites HCC nécessitant investigation dans le cadre du projet pilote n'étaient nulle part remplis, la méthode élaborée dans ce contexte peut servir à vérifier l'applicabilité des EPI dans d'autres cas. L'arbre de décision représenté dans la Figure 5-6 permet de vérifier s'il est en principe possible de faire une première évaluation régionale des sites HCC au moyen des EPI.

Dans un premier temps, il est recommandé de vérifier la *densité de sites* existante. En règle générale, il faut qu'une section de contrôle puisse couvrir les panaches d'au moins 3 sites HCC nécessitant investigation sur une longueur maximale d'env. 200 - 250 m. Cela présuppose que les sites ne soient pas éloignés de plus d'env. 100 m les uns des autres. De plus, les champs d'écoulement des sites ne doivent pas se trouver les uns derrière les autres, pour éviter que les éventuels panaches ne se superposent directement. Si les critères mentionnés ne sont pas remplis, les EPI ne constituent généralement pas une méthode appropriée en raison de leur rapport coût/bénéfice, et il est quasiment inutile de poursuivre dans cette direction.



Si la densité de sites est suffisante et que plusieurs sites HCC nécessitant investigation se trouvent proches les uns des autres, il convient dans un deuxième temps de vérifier les *conditions hydrogéologiques*. Sur la base des informations disponibles (forages, essais de pompage, mesures du niveau des nappes etc.), il faut évaluer si la structure de l'aquifère est  $\pm$  homogène, si ce dernier a une épaisseur idéale d'env. 5 -10 m, et également si la nappe ne se situe pas à une profondeur trop élevée (voir Tableau 4-1 à Tableau 4-3). Si ces conditions ne sont pas ou seulement partiellement remplies dans le périmètre considéré pour les EPI, ou s'il manque encore des données de base essentielles pour l'évaluation, alors il faut renoncer à recourir aux EPI.

Si la densité de sites et les conditions hydrogéologiques permettent en principe de réaliser des EPI, il reste finalement à vérifier s'il existe déjà des points de mesure appropriés à l'aval des sites HCC. En milieu urbain ou densément bâti en particulier, la construction de nouveaux puits et la réalisation d'EPI sont en général liées à des complications et à des coûts nettement plus élevés. Dans de tels cas et pour des raisons de coûts, le manque de points de mesure oblige presque toujours à renoncer aux EPI pour une première évaluation des sites IP.



**Figure 5-6:** Arbre de décision pour la réalisation d'EPI en vue de la priorisation des sites IP

Si l'on dispose de points de mesure appropriés ou s'il est possible de construire de nouveaux points de mesure moyennant des dépenses raisonnables, on peut alors poursuivre l'idée de réaliser des EPI. Au cours de la planification concrète, il convient de déterminer le nombre de puits nécessaires, la durée de pompage requise par EPI et par là-même les coûts qu'engendrera la réalisation des EPI. C'est seulement sur la base du concept d'essai détaillé et d'une évaluation sérieuse des coûts que l'on pourra finalement trancher sur la réalisation d'EPI en vue de la priorisation des sites IP en discussion.

Il ne faut pas non plus oublier que le risque d'obtenir des résultats négatifs au terme des EPI est relativement élevé en raison des incertitudes concernant l'ampleur des charges polluantes et l'écoulement des eaux souterraines. Si les EPI aboutissent à des résultats positifs, il faut en outre examiner s'il existe des chances de pouvoir affecter les pollutions détectées à un site en particulier.

## **6. Utilisation des EPI au stade de l'investigation de détail (ID)**

### **6.1 Choix des projets pilotes**

Après évaluation des sites, les sites A et B ont été retenus car ils remplissaient les conditions de réalisation pour les EPI et offraient la possibilité de comparer les résultats de la méthode EPI avec les résultats d'investigations antérieures effectuées avec d'autres méthodes. Ces sites ont donc été choisis comme projets pilotes et analysés au moyen d'EPI.

En ce qui concerne les sites C et D, des investigations par EPI avaient déjà été réalisées dans le cadre d'investigations antérieures. Les conditions de réalisation et les résultats des EPI ont donc aussi pu être vérifiés et évalués pour ces sites.

Les investigations et les résultats des essais pilotes sont décrits dans les chapitres suivants.

### **6.2 Site A**

#### **6.2.1 Situation du site**

Entre 1964 et 1983, le site A avait été le lieu d'utilisation de près de 250 tonnes de Tétrachloroéthylène (PCE) par an. Le PCE avait été stocké dans des séparateurs avec des eaux industrielles et des déchets dans le but d'être récupéré. Le PCE s'est retrouvé en quantités importantes directement dans les eaux souterraines après s'être infiltré à travers les parois bétonnées de ces bassins ou être passé par les conduites d'eaux usées.

Un projet d'assainissement des eaux souterraines par ISCO («in-situ chemical oxidation») est en cours de réalisation sur le site depuis 2007. Une section de contrôle comprenant 4 points de mesure des eaux souterraines été aménagée env. 80 m en aval du foyer de pollution afin de capter le flux du panache et de contrôler les résultats de l'assainissement (Figure 6-1). Les points de mesure ont été réalisés sous la forme de puits filtrants de 4½" fonctionnant comme puits complets et dont la partie crépinée couvre toute l'épaisseur de l'aquifère.

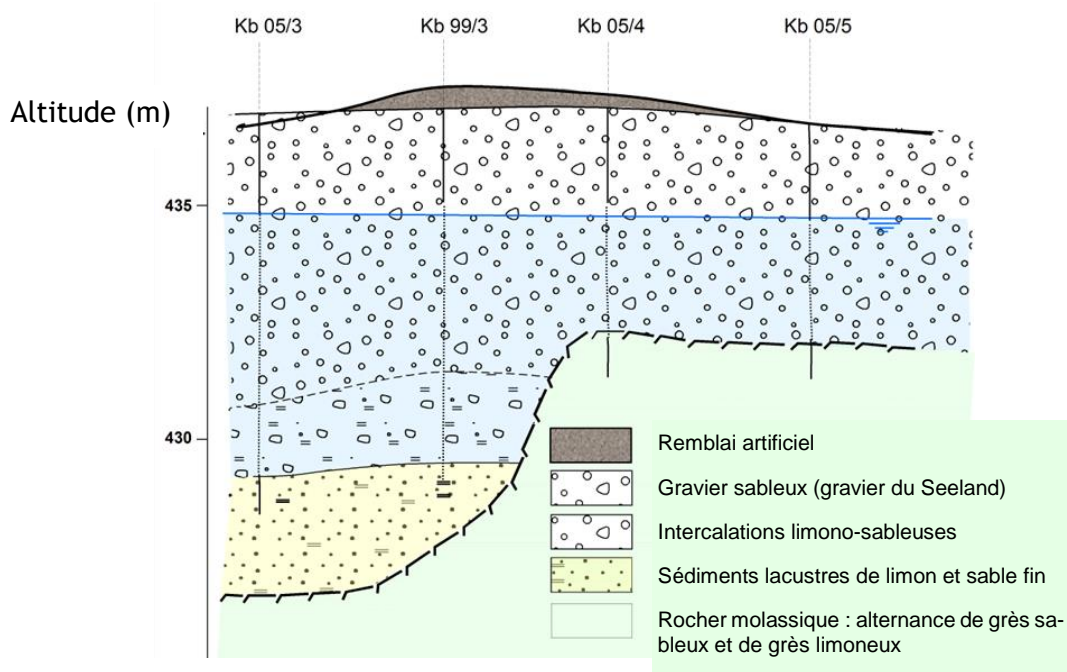
Des échantillons d'eau de cette section ont été prélevés à l'aide de systèmes de packer en disques à différentes profondeurs de l'aquifère, et analysés quant à leur teneur en HCC. Combinées avec les données hydrauliques récoltées sur le site, ces données ont permis d'évaluer la charge de HCC transitant à travers la section de contrôle.

L'objectif était aussi de comparer les résultats des essais pilotes avec les charges qui avaient été déterminées au moyen d'une tout autre méthode.

L'aquifère du site A est composé de gros gravier bien perméable reposant sur du rocher massique à 5 - 6 m de profondeur (Figure 6-2). A l'aval indirect, le rocher est aussi recouvert d'une couche de sédiments lacustres moins perméables. Le niveau de la nappe se situe en moyenne à 2.2 m au-dessous du niveau du terrain, avec un battement de moins de 1 m depuis 1999.



**Figure 6-1:** Points de mesure et étendue approximative du foyer (en rouge), section de contrôle, direction d'écoulement des eaux souterraines (flèche bleue) et points de mesure utilisés (écrit en grand)



**Figure 6-2:** Profil géologique de la section de contrôle, avec les points de mesure des eaux souterraines

### 6.2.2 Planification des essais

Le budget à disposition a permis de réaliser des EPI pilotes en 2 points de mesure de la section de contrôle. Le choix s'est porté sur les points de mesure Kb 05/3 et Kb 99/3, situés au nord-ouest de la section ; ce sont en effet ces deux points qui offraient les meilleures conditions pour les EPI car l'aquifère y est plus épais. De plus, les forages effectués en 2012 et 2013 ont montré que le point Kb 99/3 présentait les concentrations en HCC les plus élevées.

La planification des essais englobait les travaux mentionnés dans l'Annexe B. Les prévisions par calcul des zones d'appel ont montré que des essais de pompage de 4 jours permettaient de capter les 2/3 du flux des eaux souterraines à travers la section de contrôle. Un essai de traçage a été planifié pour compléter le premier EPI en vue de déterminer la porosité efficace (porosité où l'eau circule). Il s'agissait d'introduire une solution de 30 kg de NaCl / 500 - 1'000 L d'eau par le point de mesure Pm 02/2 lors du 1<sup>er</sup> EPI, ce qui n'a finalement pas pu être réalisé en raison du diamètre trop petit. On a finalement utilisé l'alternative du traceur uranine, qui a été introduit par le point de mesure Kb 04/5.

### 6.2.3 Réalisation des essais

Les deux EPI ont été réalisés l'un après l'autre pendant 4 jours chacun; le 1<sup>er</sup> essai a débuté le 16.11.2015 au point Kb 05/3, et le second le 06.12.2015 au point Kb 99/3. On avait au préalable mesuré les niveaux de la nappe dans tous les piézomètres disponibles. Ces mesures ont servi de base pour la détermination de la direction et du gradient de l'écoulement souterrain.

Des débits de pompage de 4.3 L/s ont pu être atteints pour les deux EPI (Tableau 6-1).

	1 <sup>er</sup> EPI: Kb 05/3	2 <sup>ème</sup> EPI: Kb 99/3
<b>Débit de pompage Q (L/s)</b>	4.3	4.3
<b>Débit de pompage Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	15.45	15.48
<b>Durée de pompage (h)</b>	96	96
<b>Volume pompé total (m<sup>3</sup>)</b>	1'483	1'486

**Tableau 6-1:** Données d'essai pour les EPI sur le site A

L'eau pompée a été évacuée du site d'essai par un tuyau souple de 100 m de long, puis réinfiltrée.

L'abaissement du niveau de la nappe a été enregistré toutes les minutes dans le puits de pompage Kb 05/3 et aux points de mesure Kb 99/3, Kb 05/4, Kb 04/5 et Pm 02/2 à l'aide de sondes piézométriques. Une autre sonde a été installée en un point de référence plus éloigné afin de répertorier les variations du niveau de la nappe hors de la zone d'influence de la pompe.

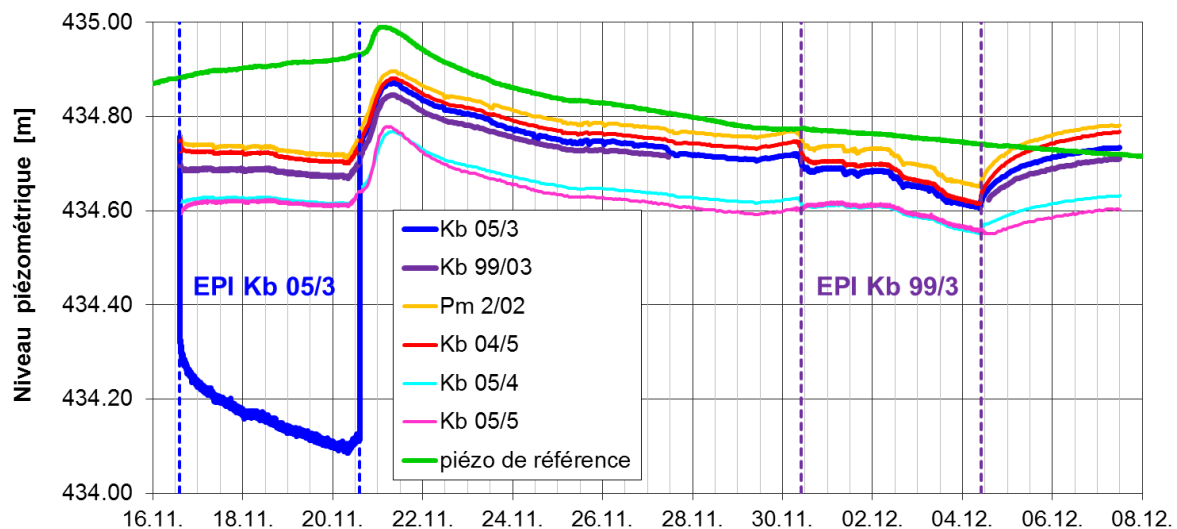
10 échantillons ont été prélevés dans chaque puits pendant la durée du pompage afin d'enregistrer l'évolution de la concentration en polluants en fonction du temps ; ces échantillons ont ensuite été analysés pour les paramètres PCE, TCE, cis-DCE et R113. Les moments des prises d'échantillons ont été fixés pour correspondre à des paliers d'accroissement équidistants de la largeur du zone d'appel des EPI.

Peu après le début de l'essai en Kb 05/3, on a introduit de l'uranine au point de mesure des eaux souterraines Kb 04/5 situé à 36 m du puits. La quantité d'uranine introduite était de 50 g, dissoute dans 0.5 L d'eau (solution à 10 %). Le passage du traceur dans le puits de pompage a été enregistré par le biais des analyses des échantillons EPI. Comme le passage du traceur était indétectable en Kb 05/3, on a aussi procédé à des analyses d'uranine dans les échantillons du second EPI en Kb 99/3.

## 6.2.4 Interprétation et résultats

### Paramètres hydrauliques:

Les rabattements du niveau de la nappe enregistrés en continu par les sondes piézométriques dans le puits de pompage et les points de mesure voisins constituent une très bonne base pour déterminer les paramètres hydrauliques. Les niveaux mesurés par les piézomètres sont documentés dans la figure Figure 6-3; le point de mesure référence est représenté avec un décalage vertical de 3 m.



**Figure 6-3:** Variation du niveau des eaux souterraines aux puits de pompage et points de mesure durant l'EPI sur le site A

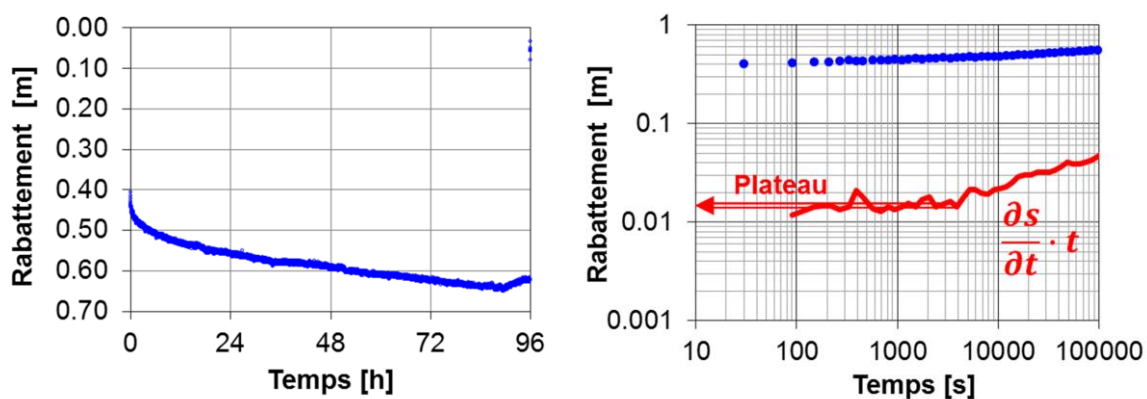
Lors du 1<sup>er</sup> EPI en Kb 05/3, le rabattement maximal dans le puits de pompage a été de 0.68 m. Le niveau de la nappe a réagi de manière significative aux points de mesure Kb 99/3, Kb 04/5 et Pm 02/2 (fourchette de quelques cm). Au point de mesure de référence, on a constaté une élévation régionale du niveau de la nappe d'env. +1 cm/jour pendant l'essai de pompage. Il a été tenu compte de cette tendance lors de l'interprétation des données de mesure.

Le 2<sup>ème</sup> EPI en Kb 99/3 est moins bien documenté, car la sonde de mesure placée dans le puits de pompage est tombée en panne avant l'essai pour des raisons inconnues; elle s'est probablement retrouvée à sec à cause du fort rabattement de la nappe en cet endroit et n'a recommencé à fournir des données qu'une fois que le niveau est remonté après la fin de l'essai; ces dernières données ont pu être utilisées pour déterminer les paramètres hydrauliques. Aux points de mesure voisins Kb 05/3, Kb 04/5, Pm 02/2 et Kb 05/4, on a pu mesurer des



rabattements de quelques cm causés par les essais. La tendance régionale durant le 2<sup>ème</sup> essai de pompage était d'env. -1 cm/jour et il n'en a pas été tenu compte dans l'interprétation des résultats.

Les paramètres hydrauliques ont été déterminés selon la méthode de la courbe diagnostique (voir Annexe C). On donne une illustration à titre d'exemple pour le rabattement du niveau de la nappe dans le puits Kb 05/3 (Figure 6-4). Sur la courbe diagnostique, le tracé horizontal de la 1<sup>ère</sup> dérivée de la courbe de diminution de pression a permis d'identifier des conditions homogènes dans l'aquifère sans autres influences perturbatrices entre env. 100 et 4'000 secondes. Les conditions d'application de la méthode d'analyse sont remplies pour cette phase; l'ordonnée de la dérivée  $\frac{\partial s}{\partial t} \cdot t$  se situe aux environs de 0.014 m. Avec un débit de pompage de 0.0043 m<sup>3</sup>/s, on obtient une valeur de  $2.4 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s pour la transmissivité.



**Figure 6-4:** Évolution du rabattement du niveau de la nappe dans le puits Kb 05/3 (à gauche) et courbe diagnostique (à droite) avec le rabattement (en bleu) et sa dérivée (en rouge)

Les valeurs de transmissivité déterminées selon la même méthode pour les points d'observation et l'EPI dans le puits Kb 99/3 sont indiquées dans le Tableau 6-2:

Puits de pompage	Point de mesure	Transmissivité
Kb 05/3	Puits de pompage	$2.4 \cdot 10^{-2}$ m <sup>2</sup> /s
	Kb 04/5	$1.7 \cdot 10^{-2}$ m <sup>2</sup> /s
	Kb 08/2	$1.7 \cdot 10^{-2}$ m <sup>2</sup> /s
	Pm 02/2	$1.4 \cdot 10^{-2}$ m <sup>2</sup> /s
Kb 99/3	Puits de pompage	$1.5 \cdot 10^{-2}$ m <sup>2</sup> /s (remontée)

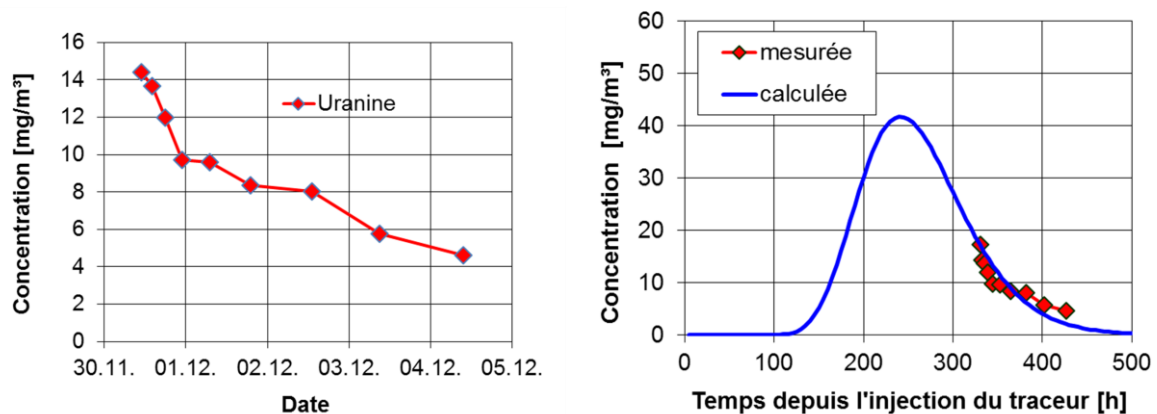
**Tableau 6-2:** Valeurs de la transmissivité pour les EPI sur le site A

Pour l'aquifère dont l'épaisseur est ici 4.6 m resp. 5.0 m, il en résulte une valeur de perméabilité moyenne de

$$k_f = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s.}$$

### Paramètres de transport :

Lors de l'essai de traçage, les échantillons du 2<sup>ème</sup> EPI en Kb 99/3 ont seulement permis d'observer la phase décroissante du passage de l'uranine (Figure 6-5). Une courbe de percée déterminée par calcul pour le transport unidimensionnel de matière y a été adaptée. La meilleure concordance entre la courbe modèle et les valeurs mesurées a été obtenue avec une porosité efficace de  $n_e = 0.18$  (18 %). Cette valeur indique aussi que le traceur n'était pas encore arrivé au point Kb 05/3 lors du 1<sup>er</sup> EPI; avec une porosité plus basse, le traceur aurait dû pouvoir être détecté.



**Figure 6-5:** Concentrations en uranine au point Kb 99/3 pendant l'essai de pompage (à gauche) et courbe de percée modélisée (à droite)

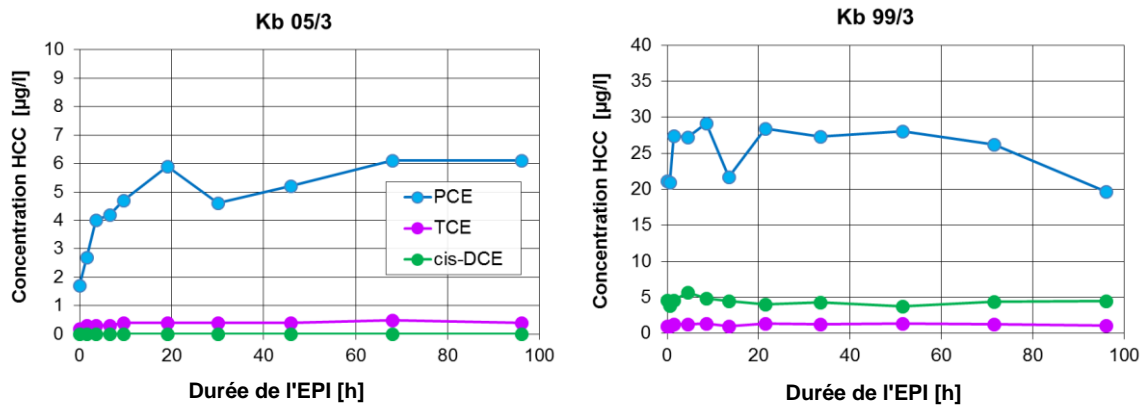
### Gradient hydraulique :

Les mesures de référence réalisées avant le début des EPI ont permis de construire les isophyses de la surface des eaux souterraines. On a pu en déduire un gradient hydraulique de 0.0025 pour le champ d'écoulement naturel dans la zone d'appel du puits Kb 05/3, et un gradient de 0.0016 pour le 2<sup>ème</sup> EPI dans le flux amont du point Kb 99/3.

### Évolution des concentrations en polluants :

10 échantillons ont été analysés lors de l'EPI dans le puits Kb 05/3 (Figure 6-6). La concentration en PCE a été mesurée à 1.7 µg/L le 16.11.2015 avant le début du pompage, puis a augmenté pour atteindre 6.1 µg/L à la fin du pompage. Cette évolution croissante de la concentration est typique des puits situés en bordure d'un panache de pollution et dont la zone d'appel s'étend avec le temps vers l'intérieur du panache (voir Figure 3-3, cas 2).





**Figure 6-6:** Concentrations en HCC aux points Kb 05/3 et Kb 99/3 pendant les essais de pompage

11 échantillons ont été analysés lors de l'EPI au point Kb 99/3 (Figure 6-6). Avec des valeurs dépassant 25 µg/L dès le départ, les concentrations en PCE étaient nettement supérieures au premier EPI. Puis les concentrations sont descendues au-dessous de 20 µg/L vers la fin de l'essai. Une concentration relativement élevée au début et qui diminue vers la fin est typique des puits situés à l'intérieur d'un panache et dont la zone d'appel s'approche du bord du panache au cours de l'essai.

Isochrones, position du panache et charges polluantes:

Sur la base des caractéristiques hydrauliques, on a d'abord calculé avec C-SET les zones d'appel des EPI sous la forme d'isochrones aux moments des échantillonnages (Figure 6-7).

Dans la prochaine étape, on a déterminé la répartition des concentrations. Le programme C-SET adapte la répartition des concentrations par itération jusqu'à ce que leur courbe de transit théorique concorde le mieux possible avec la courbe des concentrations mesurées. Afin de positionner le panache de la manière la plus cohérente possible à partir des résultats des deux EPI, on admet que le centre du panache se trouve au sud-est du puits Kb 99/3 (Figure 6-7). La concentration maximale dans le panache a été calculée à 48 µg/L.

Pour le paramètre principal PCE, on a calculé une charge de  $M_{PCE} \approx 4.5$  g/j transitant par la section de contrôle dans la zone couverte par les essais. Cela correspond à une charge annuelle de 1.6 kg de PCE.

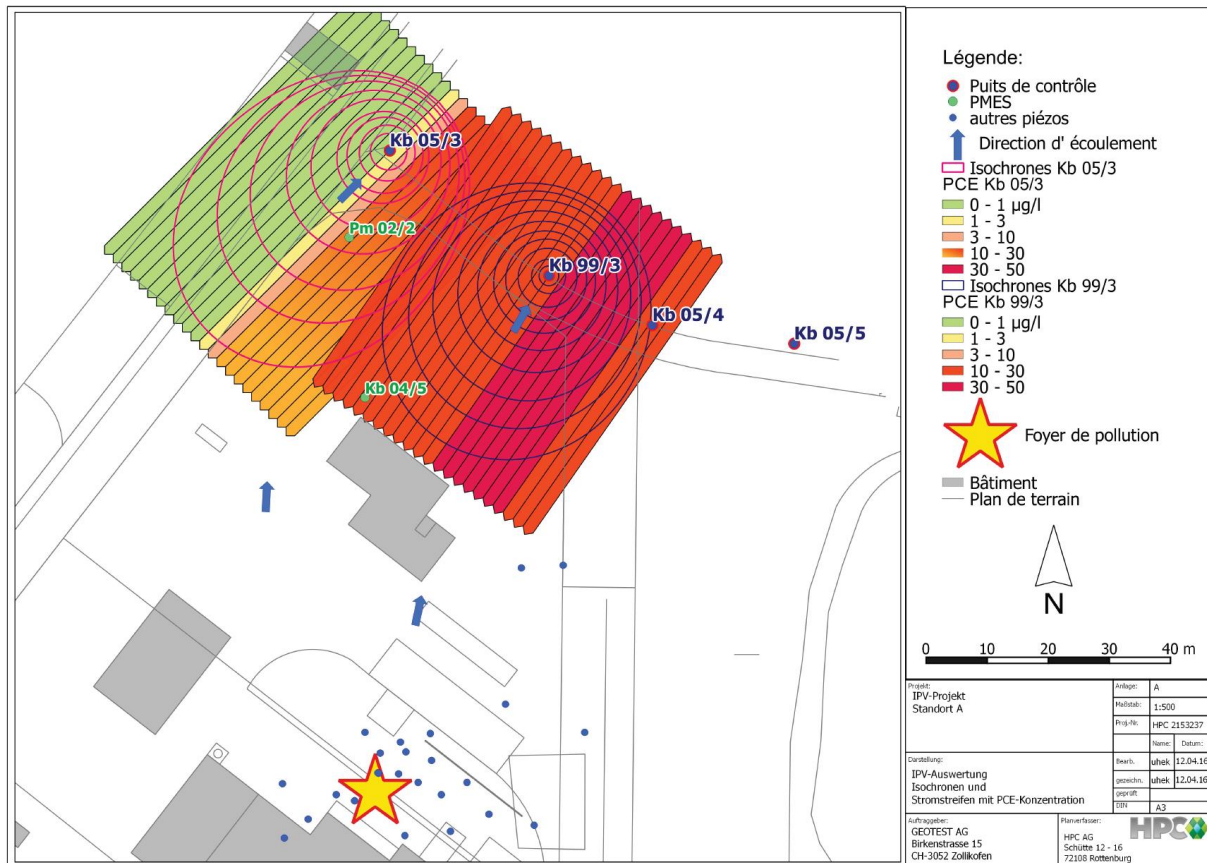


Figure 6-7: Isochrones et zones de flux pour les deux EPI sur le site A

### 6.2.5 Discussion et évaluation

La réalisation et en particulier l'interprétation des résultats des deux EPI ont confirmé les conditions-cadres jugées comme favorables lors de l'évaluation. Les objectifs relatifs à la détermination de la charge ont été largement atteints.

Contrairement aux premières inquiétudes, les variations naturelles du niveau de la nappe n'ont pas eu d'influence négative sur l'interprétation des EPI. Il convient toutefois de noter que des difficultés peuvent apparaître en cas de variations naturelles de brève intensité. Le fait de mesurer le comportement naturel du niveau de la nappe (sans l'influence des EPI) en un point de mesure de référence adapté s'est avéré utile.

Les séries continues de mesure du rabattement du niveau de la nappe dans les puits et les points de mesures voisins ont constitué une bonne base de détermination des données hydrauliques. Pour l'évaluation, on a utilisé les courbes diagnostiques qui ont permis d'identifier les conditions d'homogénéité et d'infinité pour chaque courbe de baisse de pression. Les séquences de données ainsi délimitées ont permis de déterminer les valeurs caractéristiques de manière conforme au procédé.

Les valeurs de transmissivité calculées ont donné un coefficient de perméabilité de  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s, qui correspond presque à la valeur de  $6 \cdot 10^{-3}$  m/s précédemment déterminée à partir d'un court essai de pompage dans la zone du foyer.

Au niveau de la section de contrôle, la position du panache déterminée à l'aide de C-SET se recouvre avec les informations réunies jusqu'à présent. Alors que le centre du panache rétro-extrapolé concorde encore assez bien avec le foyer de pollution connue, l'essai échoue dans la délimitation du panache côté ouest. La rétro-extrapolation de la limite ouest du panache (limite en orange/jaune dans la Figure 6-7) diverge du foyer de pollution. Cet écart s'explique par le fait que pour simplifier, le programme C-SET admet un gradient hydraulique constant du sud-ouest vers le nord-est représentatif pour la zone d'appel de l'EPI, alors que les conditions d'écoulement locales effectives au sud des zones d'appel des EPI s'en écartent.

Les deux EPI n'ont pas permis de couvrir le bord du panache côté est; il aurait pour cela fallu réaliser un 3<sup>ème</sup> EPI en Kb 05/4.

La concentration maximale d'environ 48 µg/L calculée au centre du panache concorde également très bien avec les anciennes données.

On observe aussi une bonne correspondance pour la charge polluante. La valeur calculée de 1.6 kg PCE par année est inférieure à la valeur de 3 - 4 kg de charge totale estimée lors de l'investigation de 2013 en raison de l'échantillonnage en profondeur dans la section de contrôle. Cette estimation (calculée à partir de 13 analyses multi-niveaux dans la section de contrôle et selon  $Q = F \cdot i \cdot k_f$ ) se basait sur une valeur  $k_f$  de 0.006 m/s et une pente de 0.004. Mais en utilisant la pente moyenne ( $i = 0.002$ ) et le coefficient de perméabilité ( $k_f = 5 \cdot 10^{-3}$  m/s) employés resp. déterminés lors de l'EPI, on obtient une charge d'encre 1.4 kg par année (correspond à 3.8 g/j), donc seulement un tout petit peu moins que la charge déterminée au moyen des EPI.

En résumé, on peut constater que les résultats de l'EPI sont plausibles, qu'ils ne font apparaître aucune contradiction ou divergence inexplicable et qu'ils confirment les résultats et informations obtenus auparavant avec d'autres méthodes.

#### **Expériences tirées des essais sur le site A:**

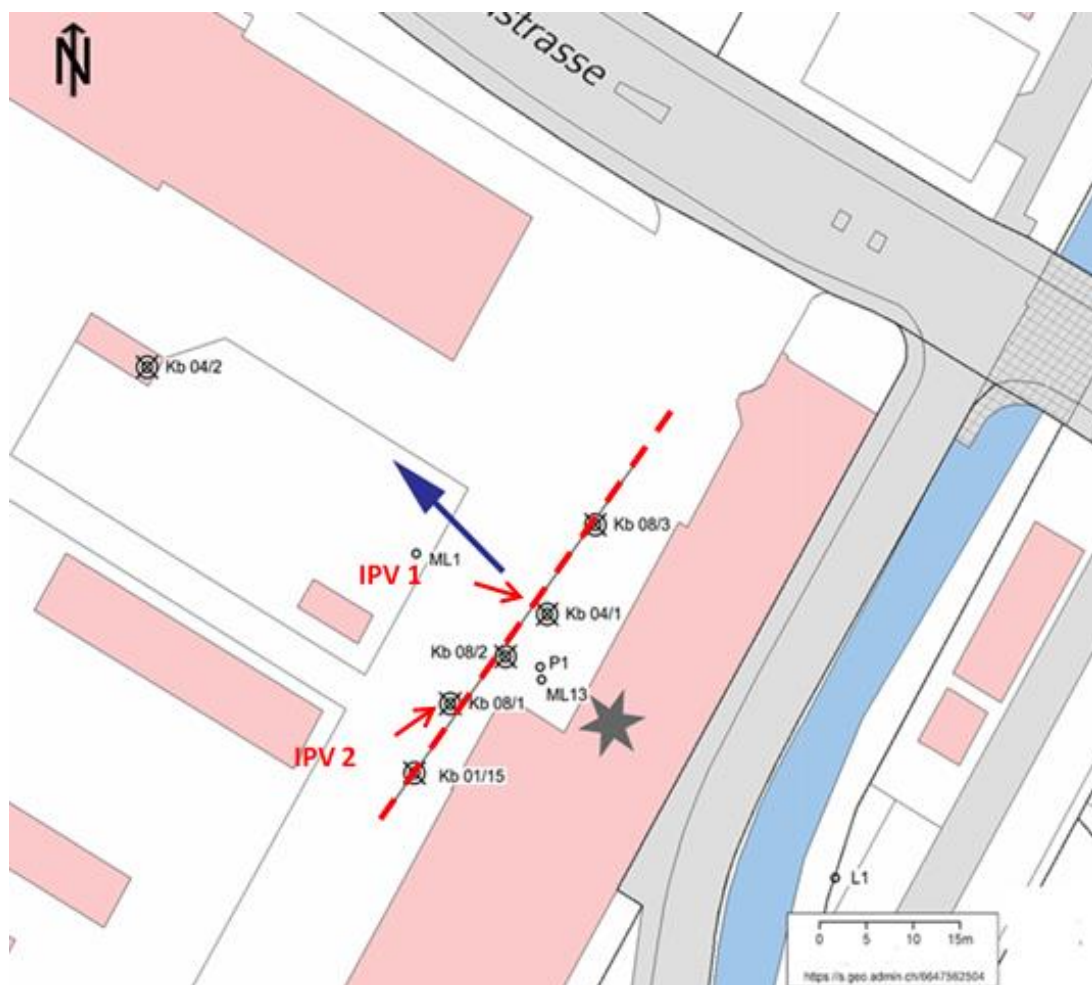
- La réalisation de deux EPI a permis de déterminer la position du panache, la concentration maximale et la charge en bonne concordance avec les résultats des investigations antérieures.
- La mesure en continu du rabattement du niveau de la nappe à l'aide de sondes piézométriques a fourni un ensemble de données de haute qualité pour la détermination des caractéristiques hydrauliques.
- La qualité des projections rétroactives des panaches depuis la section de contrôle jusqu'au foyer de pollution dépend de l'état des connaissances de l'écoulement local des eaux souterraines, ce qui est lié à de grandes incertitudes dans des conditions hétérogènes (écoulement non parallèle).

## 6.3 Site B

### 6.3.1 Situation du site

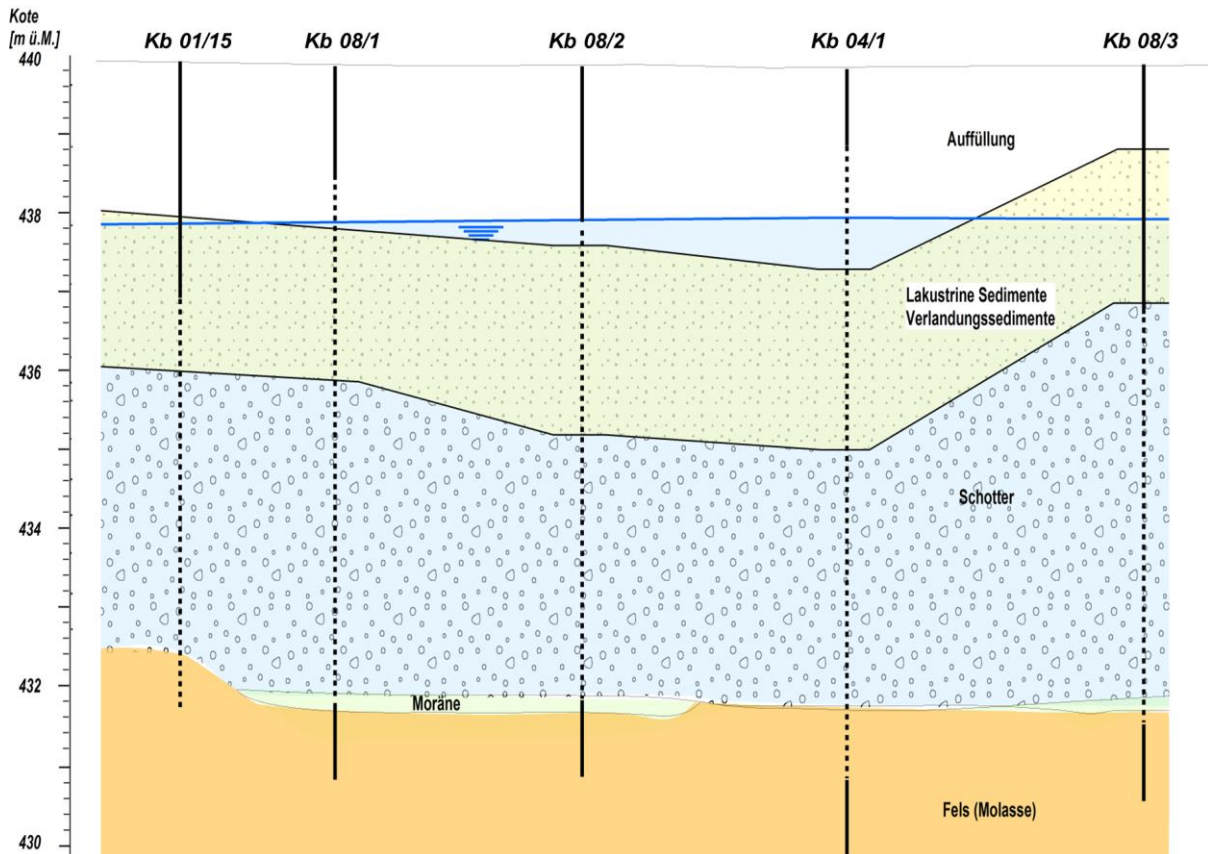
Une installation de nettoyage à sec a été exploitée sur le site B entre 1958 et 1997 ; on y a en premier lieu utilisé du PCE, puis une deuxième machine fonctionnant au Freon R113 a été mise en service dès 1986. L'IT et l'ID ont montré que les deux substances s'étaient infiltrées dans le sous-sol et y avaient causé une pollution importante des eaux souterraines, qui se manifeste maintenant par la formation d'un panache de quelques centaines de mètres de long.

5 points de mesure des eaux souterraines ont été aménagés en plusieurs étapes à l'aval immédiat de la source présumée de pollution, formant une section de contrôle (Figure 6-8). On a en plus installé des points de mesure multi-niveaux de petit diamètre permettant de prélever des échantillons à différentes profondeurs. Les 5 points de mesure ont été réalisés sous la forme de points de mesure des eaux souterraines de 4½" (Kb 01/15, Kb 08/1, Kb 08/2, Kb 04/1 et Kb 08/3) dont la partie crépinée couvre toute l'épaisseur de l'aquifère et qui constituent ainsi des puits complets.



**Figure 6-8:** Situation du site B avec les points de mesure des eaux souterraines, le foyer présumé (étoile), la section de contrôle (ligne en pointillé rouge passant par les points de mesure) et la direction d'écoulement des eaux souterraines (flèche bleue)

L'aquifère est caractérisé par une couche de sédiments lacustres ou d'atterrissement principalement limono-sableux d'une épaisseur de 1.5 à 2.2 m et de faible perméabilité, qui superpose une couche de gravier bien perméable (Figure 6-9). Le plancher inférieur (moraine de fond ou rocher molassique) se trouve à une profondeur d'environ 7.5 m. L'épaisseur de l'aquifère est en moyenne d'env. 5.5 m, et le niveau de la nappe se trouve à 2.3 m au-dessous du niveau du terrain.



**Figure 6-9:** Profil géologique de la section de contrôle, avec les points de mesure des eaux souterraines

Pour le site B, il a fallu en particulier déterminer la position du panache de pollution resp. du foyer en plus de la charge polluante. Le but était ici aussi de comparer les résultats des EPI avec les nombreuses informations fournies par les investigations antérieures.

### 6.3.2 Planification des essais

Pour le projet pilote, on a choisi dans la section de contrôle constituée de 5 points de mesure les 2 puits de contrôle situés le plus à l'aval du foyer supposé de la pollution selon les informations disponibles.

La planification des EPI a permis d'établir que le recouvrement entre les zones d'appel des deux puits de contrôle sélectionnés Kb 04/1 et Kb 08/1 serait suffisant après un temps de



pompage de 4 jours avec les débits maximaux possibles d'env. 2 L/s. Le plan d'échantillonnage a été calculé de manière à ce que les intervalles croissants entre les prises d'échantillons correspondent à un accroissement équidistant de la largeur de la zone d'appel (voir Annexe B: Recommandations pour la planification, la réalisation et l'interprétation des EPI ).

Aucun essai avec traceur n'a été prévu pour le site B. Sa situation hydrogéologique étant très semblable à celle du site A, on a admis que les propriétés de l'aquifère étaient au moins approximativement semblables.

### 6.3.3 Réalisation des essais

Les deux EPI ont été réalisés l'un après l'autre pendant 4 jours chacun ; le 1<sup>er</sup> essai a débuté le 15.02.2016 au point de mesure Kb 04/1, et le second le 07.03.2016 au point Kb 08/1. On a chaque fois réalisé auparavant une mesure de référence du niveau de la nappe comme base pour la détermination du gradient hydraulique naturel.

Des débits de pompage de 2.2, resp. 1.9 L/s ont pu être appliqués pour les EPI (Tableau 6-3).

	1 <sup>er</sup> EPI: Kb 04/1	2 <sup>ème</sup> EPI: Kb 08/1
<b>Débit de pompage Q (L/s)</b>	2.2	1.9
<b>Débit de pompage Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	7.75	6.72
<b>Durée de pompage (h)</b>	96	96
<b>Volume pompé total (m<sup>3</sup>)</b>	744	646

**Tableau 6-3:** Données d'essai pour les EPI sur le site B

Pour l'EPI en Kb 04/1, on a installé des sondes piézométriques dans le puits de pompage et aux points de mesure Kb 08/1 et Kb 08/2; ces sondes enregistraient chaque fois la pression (niveau de la nappe), la température et la conductivité électrique. Pendant les phases de rabattement et de remontée, l'intervalle entre les mesures était de 1 minute. 10 échantillons d'eau souterraine ont été prélevés selon le plan d'échantillonnage fixé, et ont été analysés pour les paramètres PCE, TCE, cis-DCE, R113 et autres HCHV afin d'enregistrer la concentration en polluants en fonction du temps dans le puits de pompage.

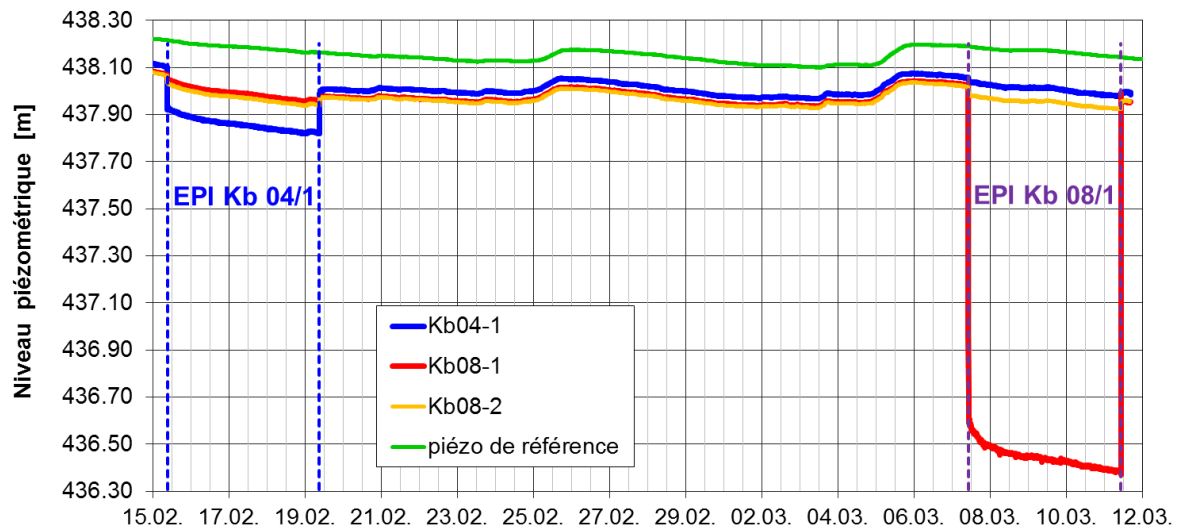
Pour le 2<sup>ème</sup> EPI en Kb 08/1, des sondes piézométriques ont été installées dans le puits de pompage et aux points de mesure Kb 04/1 et Kb 08/2. 9 échantillons ont été prélevés pendant la durée du pompage selon le schéma présenté plus haut.

### 6.3.4 Interprétation et résultats

#### Paramètres hydrauliques :

L'enregistrement en continu du rabattement du niveau de la nappe dans le puits de pompage et aux points de mesure voisins à l'aide de sondes piézométriques constitue la base pour

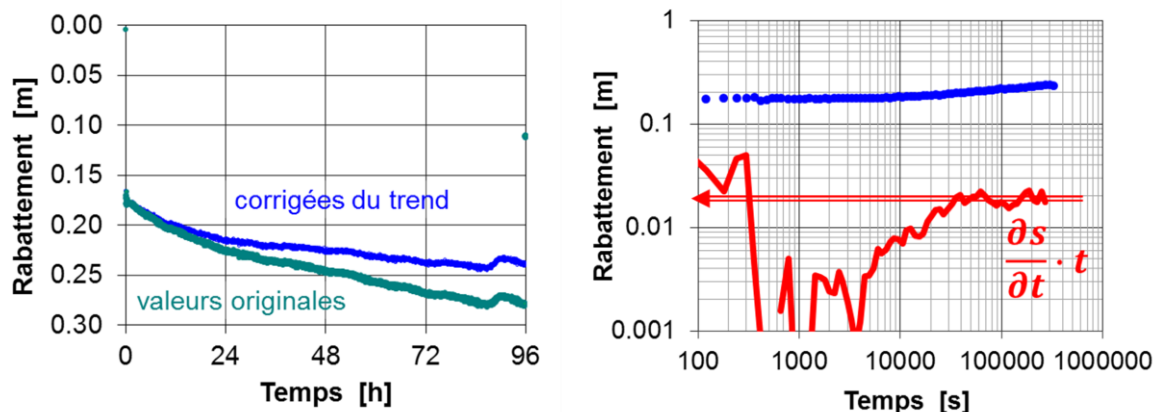
déterminer les caractéristiques hydrauliques. Les niveaux piézométriques sont documentés dans la Figure 6-10.



**Figure 6-10:** Variation du niveau des eaux souterraines aux puits de pompage et points de mesure durant l'EPI sur le site B

Le niveau des eaux souterraines était relativement élevé au moment des deux essais de pompage. Pour évaluer les variations naturelles du niveau de la nappe, on disposait de la courbe d'un point de mesure de référence non influencé par les essais de pompage. Une tendance naturelle décroissante superposée aux deux EPI a été éliminée pour l'interprétation hydraulique (Figure 6-11).

Les courbes de rabattement mesurées dans les puits de pompage et d'observation ont été interprétées à l'aide des courbes diagnostiques. Ceci est illustré dans la Figure 6-11 sur l'exemple du rabattement dans le puits de pompage Kb 04/1. La dérivée de la baisse de pression forme un plateau à partir de 30'000 secondes env. et jusqu'à la fin de l'essai. Dans cette phase de l'essai, les conditions d'homogénéité et d'infinité sont remplies. Avec un plateau de la dérivée à 0.019 m et un débit de pompage de 0.0022 m<sup>3</sup>/s, on obtient une transmissivité de 9·10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s.



**Figure 6-11:** Évolution du rabattement du niveau de la nappe dans le puits Kb 04/1 (à gauche) et courbe diagnostique (à droite) avec le rabattement (bleu) et sa dérivée (rouge)

Les valeurs de transmissivité calculées sont reportées dans le Tableau 6-4:

Puits de pompage	Point de mesure	Transmissivité
Kb 04/1	Puits de pompage	$9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
	Kb 08/1	$1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
	Kb 08/2	$1.1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
Kb 08/1	Puits de pompage	$5.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
	Kb 04/1	$1.2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
	Kb 08/2	$1.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

**Tableau 6-4:** Valeurs de transmissivité pour les EPI sur le site B

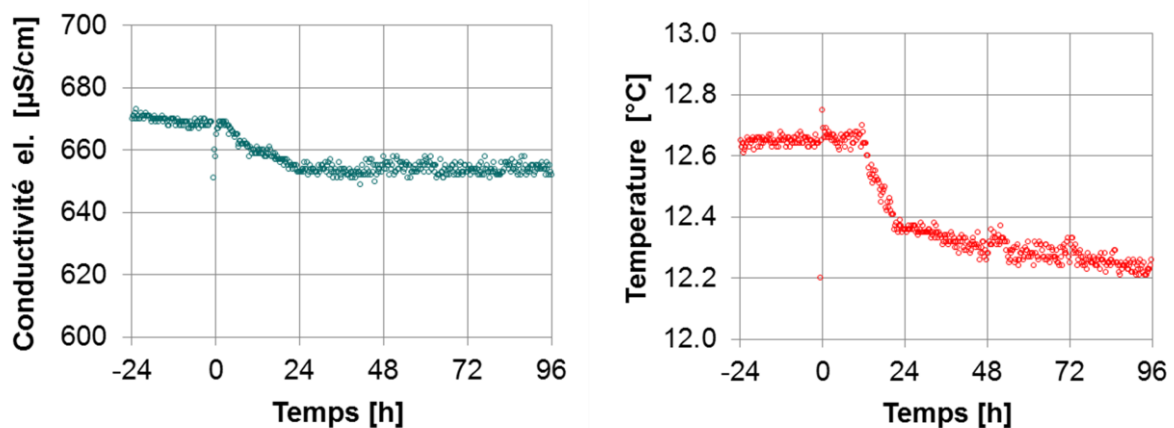
Pour les couches de gravier du Seeland épaisses de 3.3 m resp. 3.5 m, il en résulte une valeur de perméabilité moyenne de

$$k_f = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s.}$$

La porosité efficace (porosité où l'eau circule) des graviers a été estimée à 20 % ( $n_e = 0.2$ ). La pente  $i$  déduite des isophyses des eaux souterraines est de 0.005 (Kb 08/1) resp. 0.006 (Kb 04/1).

#### Température et conductivité électrique :

Une nette évolution de la conductivité électrique et de la température a été observée pour l'EPI en Kb 04/1 (Figure 6-12).



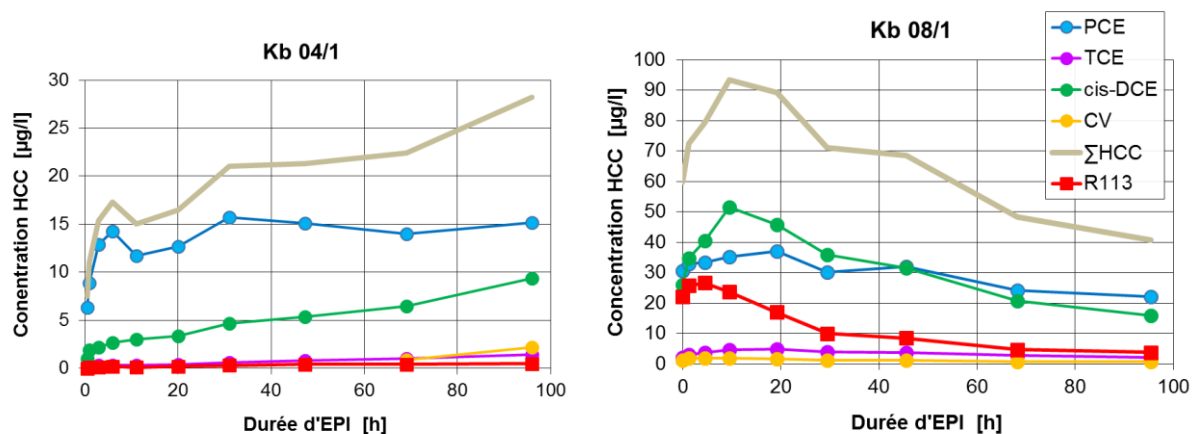
**Figure 6-12:** Évolution de la conductivité électrique et de la température pour l'EPI en Kb 04/1

Durant l'EPI, la conductivité électrique dans le puits de pompage a chuté d'env. 670 à 655  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 24 heures puis est restée à cette valeur jusqu'à la fin du pompage. On a en même temps pu observer une baisse de température d'env. 0.5 °C. Cela peut indiquer un afflux de filtrat de rive au cours de l'EPI depuis le ruisseau situé à l'est du site. Le ruisseau présentait une conductivité de 570  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et une température de 4.5 °C au moment de l'investigation.



### Évolution des concentrations en polluants :

Une nette augmentation de la concentration en HCC (somme) de 7.5 à 28.2 µg/L a été enregistrée pendant l'**EPI en Kb 04/1** (Figure 6-13). Cette augmentation constante permet de déduire que le puits est situé à côté ou éventuellement à la limite d'un panache et que la zone d'appel s'étend toujours plus loin vers l'intérieur du panache au cours de l'EPI (voir Figure 3-3, cas 3).



**Figure 6-13:** Concentrations en HCC aux points Kb 04/1 et Kb 08/1 pendant les essais de pompage

Les paramètres individuels présentent là des comportements très différents. La concentration en PCE monte relativement vite durant les 30 premières heures, puis reste à un niveau assez stable d'env. 15 µg/L. Les produits de dégradation cis-DCE et CV présentent par contre une augmentation plus lente.

Lors de l'**EPI en Kb 08/1**, on a enregistré une augmentation de la concentration en HCC (somme) de 60 à 93 µg/L pendant les 10 premières heures, puis une diminution constante pour atteindre 40.8 µg/L après 96 heures (Figure 6-13). Cela indique que le puits se trouve directement à côté d'un panache de pollution et que l'EPI couvre entièrement le panache au cours de la durée de pompage (voir Figure 3-3, cas 1).

Les courbes de concentration des diverses substances présentent des maxima de concentration à différents moments. Pour le R113, la valeur maximale est déjà atteinte après 4.5 heures. Les différents types de HCC atteignent leur concentration maximale après 9.5 heures dans l'échantillon 4 (cis-DCE et CV), resp. après 19 heures dans l'échantillon 5 (PCE et TCE). Ceci pourrait indiquer que le panache de HCC et le panache de R-113 ne se trouvent pas au même endroit.

### Isochrones, position des panaches et charges polluantes :

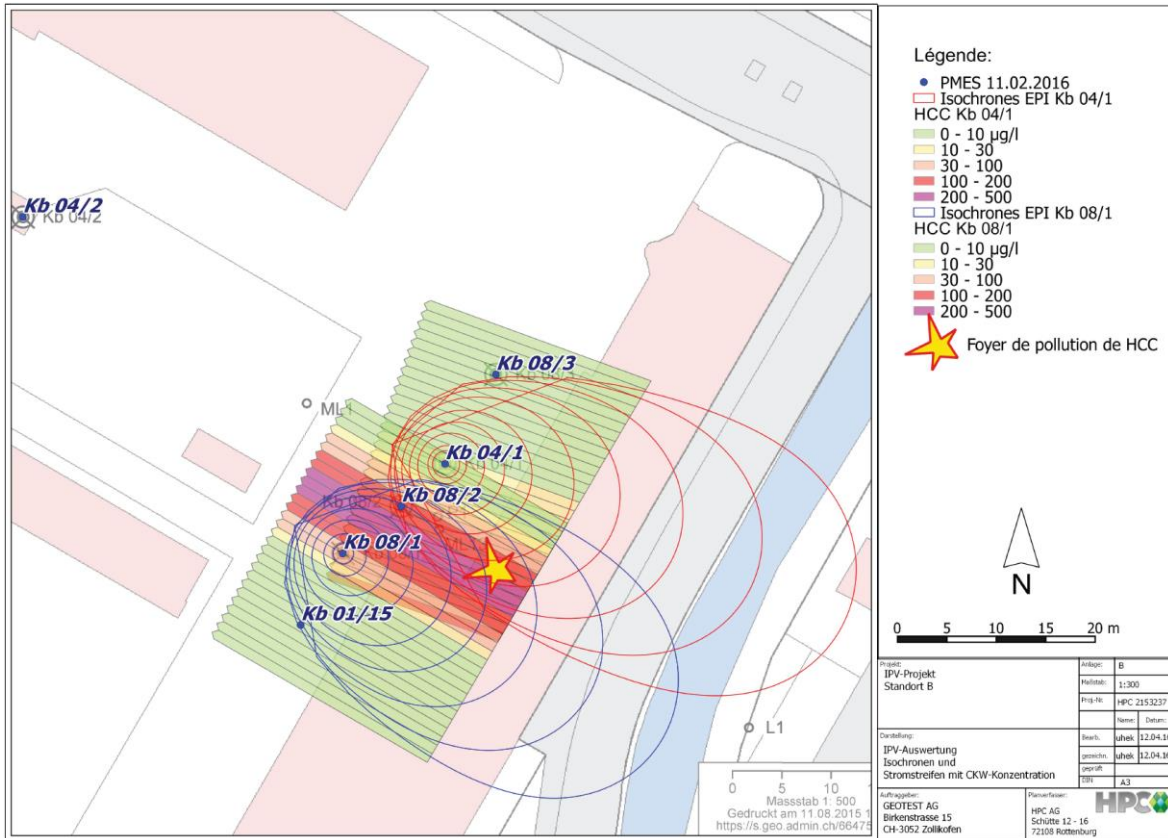
On a déterminé les zones d'appel (isochrones des moments d'échantillonnage), la répartition spatiale des polluants et les charges polluantes pour les deux essais de pompage avec l'outil d'interprétation C-SET. Les paramètres HCC (somme) et R113 ont été interprétés séparément. On voit grâce aux isochrones que les zones d'appel des EPI se chevauchent bien (Figure 6-14 et Figure 6-15).

La distribution des concentrations calculée à partir de l'**EPI en Kb 04/1** a donné une concentration maximale de 170 µg/L ( $\Sigma$  HCC) resp. 3.5 µg/L (R113) en bordure de la zone d'appel. La charge polluante transitant à travers la section étudiée a été calculée à  $M_{HCHV} = 4.3$  g/j ( $\Sigma$  HCC) resp. 0.1 g/j (R113). Pour cet EPI, il faut tenir compte du fait que les concentrations et charges calculées peuvent être un peu trop basses en raison de l'afflux de filtrat de rive.

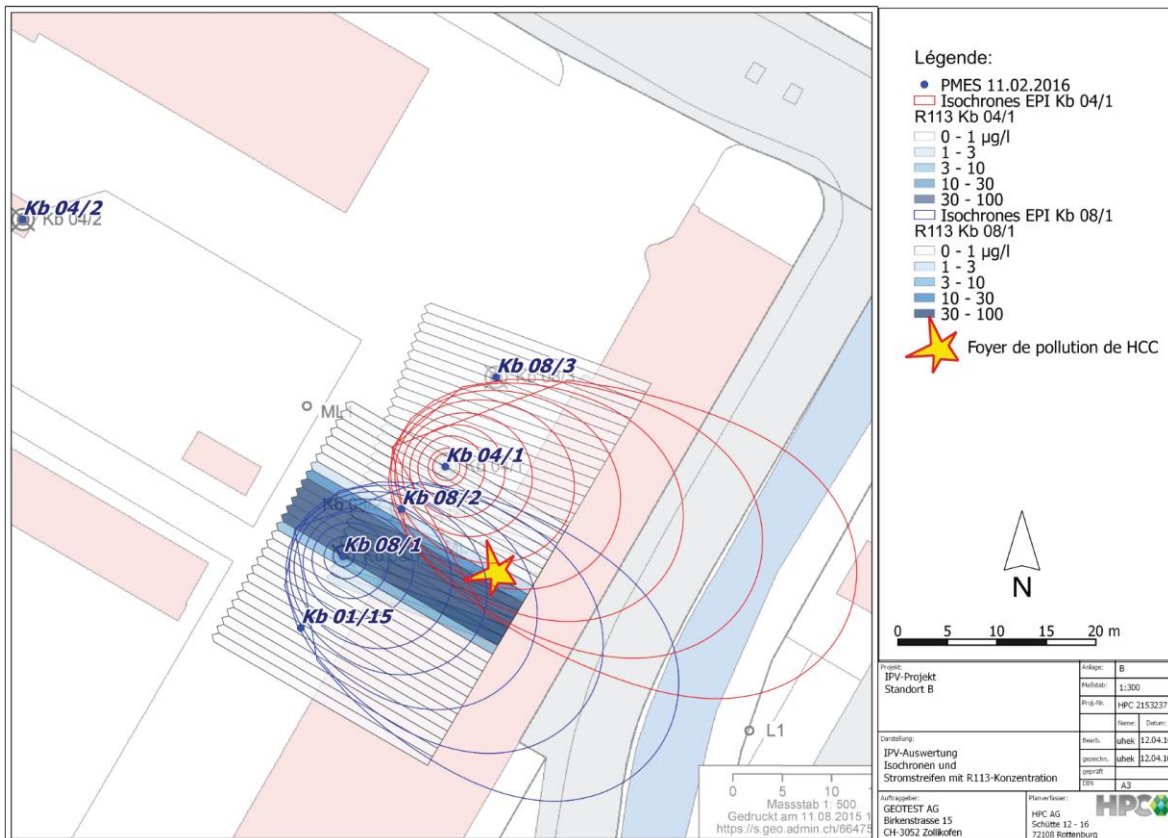
Pour la zone d'appel de l'**EPI en Kb 08/1**, on a déterminé une concentration maximale d'environ 200 µg/L ( $\Sigma$  HCC) resp. 54 µg/L (R113) dans le panache. Le centre du panache de R113 se situe à env. 2 m au sud-ouest du panache de HCC. Les charges correspondantes sont de 6.9 g/j ( $\Sigma$  HCC) resp. 1.2 g/j (R113).

Pour interpréter la position des panaches ( $\Sigma$  HCC et R113), on a fait coïncider le mieux possible les constatations tirées des deux EPI. Ceci est le cas si l'on admet que l'EPI en Kb 08/1 capte le panache depuis le sud et que l'EPI en Kb 04/1 le capte depuis le nord. Ainsi, les panaches de pollution se situent très probablement entre les puits de contrôle, ce que confirme le point de mesure Kb 1/15 qui ne présente pas de concentrations suspectes en polluants (Figure 6-14 et Figure 6-15).

Les résultats des EPI mènent à penser que les foyers se trouvent au bord ou sous le bâtiment situé en amont.



**Figure 6-14:** Isochrones et bandes de flux pour les HCC (somme) sur le site B



**Figure 6-15:** Isochrones et bandes de flux pour le R113 (en bas) sur le site B

### 6.3.5 Discussion et évaluation

La structure hétérogène de l'aquifère, jugée comme plutôt défavorable lors de l'évaluation du site (gravier très perméable placé sous des sédiments lacustres peu perméables), s'est avérée peu problématique lors de l'exploitation des résultats.

Le coefficient de perméabilité calculé de  $3 \cdot 10^{-3}$  m/s est significativement supérieur au coefficient de  $7 \cdot 10^{-4}$  m/s qui avait été déterminé lors d'un précédent court essai de pompage dans un point de mesure distant d'env. 200 m.

Au niveau de la section de contrôle, la position du panache déterminée à l'aide de C-SET se recouvre largement avec les informations réunies jusqu'à présent. La supposition précédemment émise, selon laquelle le foyer de R113 se situerait un peu plus au sud-ouest, a été plutôt soutenue par les résultats des EPI.

On observe aussi une assez bonne correspondance pour les charges polluantes. La valeur de 2.5 kg par année se situe dans la même fourchette que les valeurs estimées lors des précédentes investigations (entre autres mesures multi-niveaux „low flow“), soit entre 1.7 et 3.5 kg par année pour les HCC et entre 0.1 et 0.5 kg par année pour le R113 selon les hypothèses. Si l'on considère les incertitudes intrinsèques à de telles estimations, la concordance entre les différentes méthodes peut être qualifiée de très bonne.

En résumé, on peut constater que les résultats de l'EPI sont plausibles, qu'ils ne font apparaître aucune contradiction ou divergence inexplicable et qu'ils confirment les résultats et informations obtenus auparavant avec d'autres méthodes.

La portée des résultats des EPI est cependant limitée par le fait qu'ils reflètent principalement les conditions de la couche inférieure bien perméable de l'aquifère (gravier du Seeland). Les différences mises en évidence par les mesures multi-niveaux antérieures, selon lesquelles les concentrations en polluants dans la couche supérieure peu perméable de l'aquifère pouvaient être jusqu'à deux ordres de grandeur supérieurs, n'ont pas pu être clarifiées à l'aide des EPI. Il n'est pas non plus possible de tirer des conclusions sur la répartition verticale des concentrations des différents types de polluants et de déduire des informations sur les conditions de dégradation dans les différents horizons.

#### **Expériences tirées des essais sur le site B:**

- Malgré l'hétérogénéité verticale de l'aquifère, la réalisation de deux EPI a permis de déterminer la position du panache, la concentration maximale et la charge polluante en bonne concordance avec les résultats des investigations antérieures.
- La délimitation spatiale du foyer de pollution est possible à condition de connaître la direction d'écoulement des eaux souterraines.
- Il n'est pas possible de différencier la répartition verticale des concentrations en polluants.
- Les EPI ne permettent pas de différencier les conditions de dégradation dans les divers horizons d'un aquifère.

## 6.4 Site C

### 6.4.1 Situation du site

Plusieurs EPI avaient déjà eu lieu sur le site C à l'occasion d'une investigation technique (IT) selon OSites et d'une investigation de détail (ID) réalisées resp. en décembre 2010 et en décembre 2013 à l'aval d'une pollution au PCE. Dans le cadre du projet pilote, on a sélectionné pour la réalisation des EPI deux points de mesure qui avaient permis de délimiter un panache de PCE lors des investigations préliminaires (voir plan de situation, Figure 6-19):

- En décembre 2010, des EPI de 24 heures ont été réalisés avec 4 prises d'échantillons pour chacun (10 min, 1 h, 6 h, 24 h). Le débit pompé au point de mesure 12.P.31 était de 1.3 L/s, et le débit pompé au point 12.P.33 était de 1.6 L/s.
- Lorsque les essais ont été réitérés en décembre 2013, les EPI ont été réalisés sur 72 heures et les échantillons ont chaque fois été prélevés au début, après 24 h, 48 h et 72 h. Les débits de pompage ont été fixés à 1.5 L/s en 12.P.31 et à 2.2 L/s en 12.P.33.

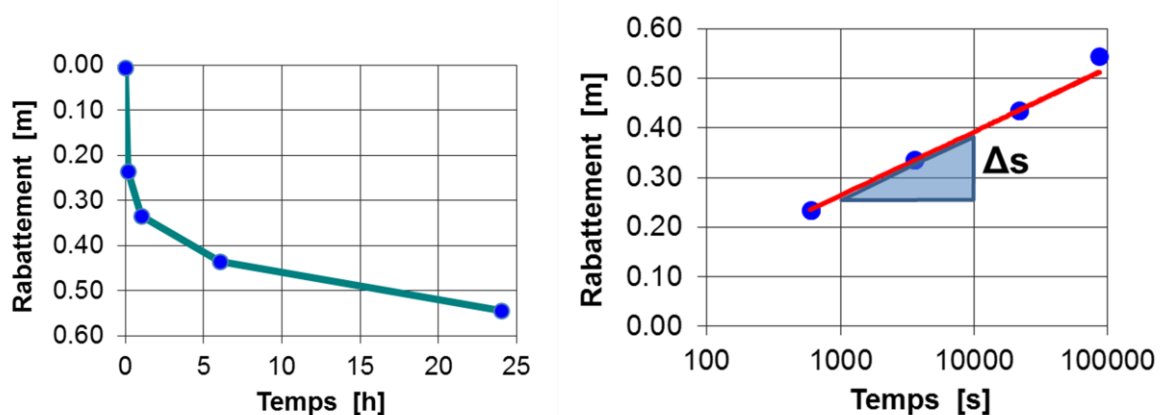
Les rapports d'investigation respectifs étaient à disposition comme base de données pour l'évaluation du site et l'analyse avec C-SET.

L'aquifère est composé d'une couche de gravier limono-sableux épaisse d'env. 2 m. Selon les profils de forage, il s'agit de dépôts de même structure dans la zone des puits EPI. La perméabilité déterminée à l'aide d'une formule d'estimation stationnaire était peu plausible et a nécessité une nouvelle évaluation hydraulique expérimentale.

### 6.4.2 Interprétation et résultats

#### Paramètres hydrauliques

Les rares mesures de rabattement disponibles aux moments des prélèvements d'échantillons n'ont pas permis une interprétation au moyen de courbes diagnostiques. A défaut, on a recouru à la méthode moins sensible de la droite de Jacob (Cooper & Jacob, Annexe C). Pour le rabattement mesuré dans le puits de pompage 12.P.33 et avec un débit de pompage de 1.58 L/s, on obtient une valeur de transmissivité  $T = 0.183 \cdot Q / \Delta s$  de  $2.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (Figure 6-16).



**Figure 6-16:** Rabattement (à gauche) et interprétation hydraulique (à droite) pour l'EPI réalisé en décembre 2010 dans le puits 12.P.33

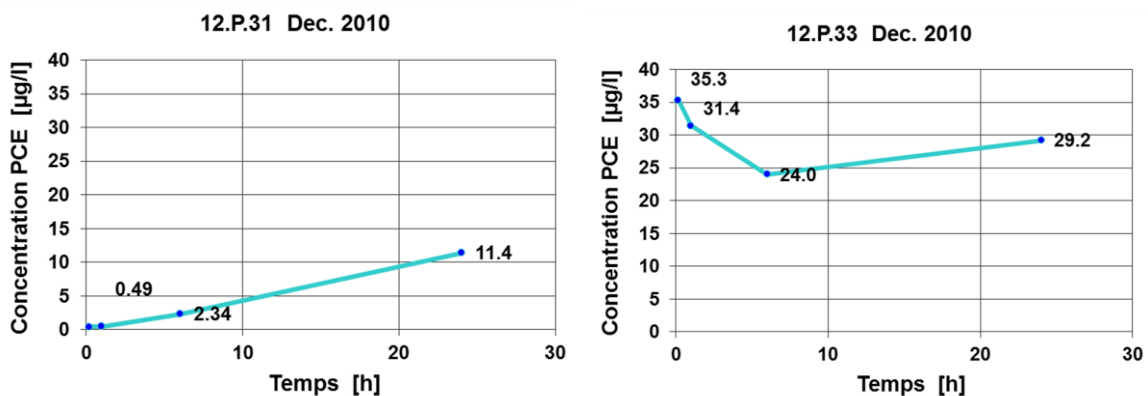
Cela donne une valeur  $k_f$  de  $1.1 \cdot 10^{-3}$  m/s pour un aquifère de 2.1 m d'épaisseur.

Comme porosité efficace  $n_e$ , on a adopté la valeur estimative de 18 % (0.18) de l'IT.

Pour déterminer le gradient hydraulique  $i$ , on a réalisé des mesures de référence du niveau de la nappe avant les séries d'EPI le 15.12.2010 et le 9.12.2013, puis construit les isophyses. Dans la zone de la section de contrôle, on obtient ainsi des gradients hydrauliques naturels de 0.0056 dans la direction NNW pour la période d'essais de décembre 2010, et de 0.0083 à 0.01 dans la direction NNW-N pour les essais de décembre 2013.

### Évolution des concentrations en polluants

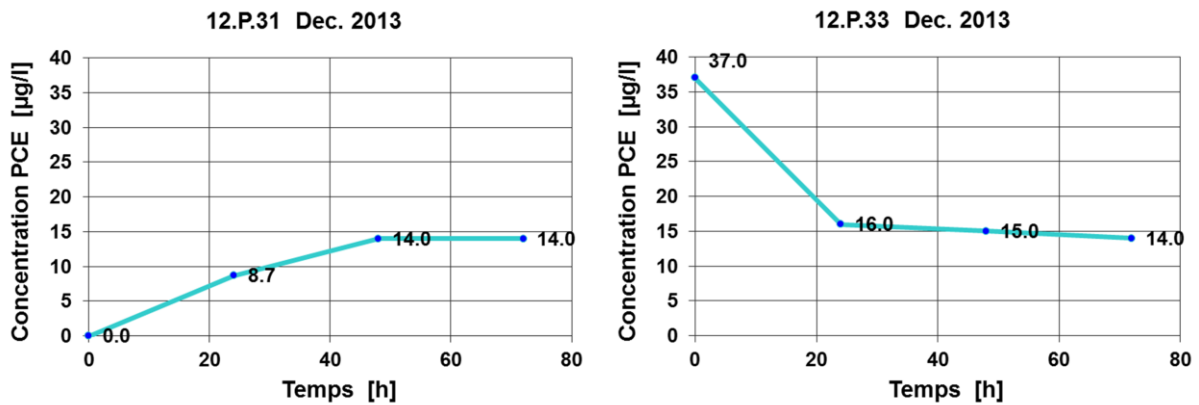
Les EPI de 24 heures réalisés en décembre 2010 dans le puits 12.P.31 ont donné des concentrations en PCE d'abord faibles, puis en nette augmentation vers la fin des essais (Figure 6-17). Pour le puits 12.P.33, les plus hautes concentrations en PCE se sont manifestées au début.



**Figure 6-17:** Concentrations en PCE pour les EPI de décembre 2010

Les EPI de 72 heures réalisés en décembre 2013 dans le puits 12.P.31 ont aussi montré que les concentrations en PCE augmentaient en cours d'essai. Pour le point 12.P.33, on a constaté que les concentrations en PCE étaient élevées au début, puis diminuaient au cours de l'essai de pompage (Figure 6-18).





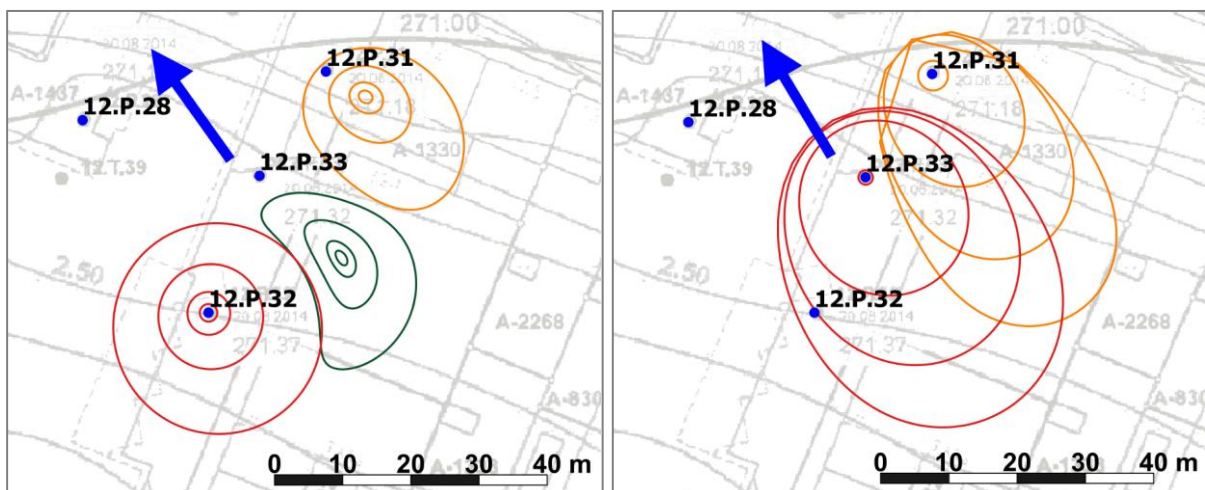
**Figure 6-18:** Concentrations en PCE pour les EPI de décembre 2013

L'évolution des concentrations permet déjà de déduire qualitativement que le point de mesure 12.P.31 se trouve en bordure de panache, et que l'EPI capte des zones de plus en plus polluées du panache au cours de l'essai. Concernant le point de mesure 12.P.33, on peut conclure qu'il se trouve dans la zone la plus polluée du panache et que l'EPI capte de l'eau souterraine de moins en moins polluée avec l'avancement de la durée de pompage.

### Isochrones

On a d'abord calculé les isochrones avec le programme C-SET sur la base des paramètres hydrauliques et du débit de pompage, c'est-à-dire les zones d'appel atteintes aux moments des prises d'échantillons respectives.

Pour la série d'EPI de 24 heures en décembre 2010, les EPI ont été faits directement l'un après l'autre. L'EPI précédent dans le puits 12.P.32 (pas de polluants trouvés) a mené à déplacer légèrement les zones d'appel des EPI suivants en 12.P.31 et 12.P.33, ce dont il a été tenu compte lors de l'analyse avec C-SET (Figure 6-19).



**Figure 6-19:** Zones d'appel des EPI de décembre 2010 (à gauche) et décembre 2013 (à droite). Les isochrones marquent chaque fois la zone d'appel concernée aux moments des échantillonnages

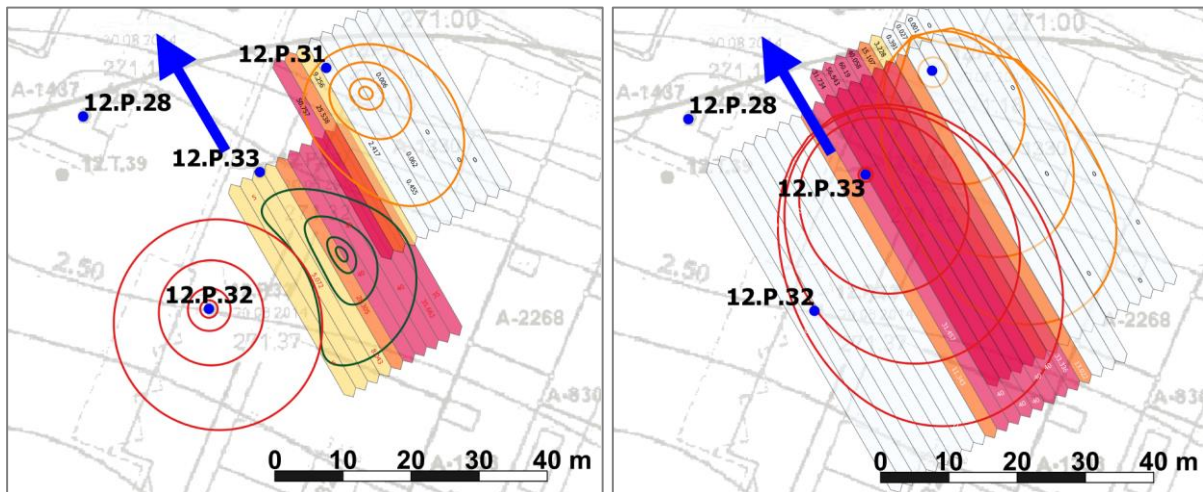


Lors des essais de 72 heures en décembre 2013, on a respecté une pause d'env. 100 heures entre les essais aux points de mesure 12.P.31 et 12.P.33 de manière à ne plus devoir tenir compte d'une influence hydraulique réciproque.

#### Position du panache et charges polluantes

Les répartitions spatiales possibles des concentrations en polluants dans la zone d'appel ont été calculées avec C-SET à partir du flux temporel de substances mesuré dans l'eau souterraine pompée. Ce faisant, on a cherché à faire concorder la position du panache dans la zone de chevauchement des isochrones des deux EPI considérés.

Comme résultat le plus probable pour les EPI de 2010, on obtient un panache de PCE d'une largeur d'env. 15 m entre les points de mesure 12.P.31 et 12.P.33 (Figure 6-20). La concentration maximale dans le panache est de 40 - 50 µg/L PCE, et la charge a été calculée à 0.75 g/j.



**Figure 6-20:** Répartition des concentrations calculée avec C-SET pour les EPI de décembre 2010 (à gauche) et décembre 2013 (à droite)

L'évaluation des EPI réalisés en décembre 2013 confirme la présence d'un panache d'env. 15 m de large situé entre les points de mesure 12.P.31 et 12.P.33 (Figure 6-20). La concentration maximale dans le panache est de 50 - 60 µg/L PCE, et on obtient une valeur de 1.8 g/j pour la charge.

### **6.4.3 Discussion et évaluation**

Les critères de réalisation pour les EPI sur le site C étaient remplis; les EPI ont permis d'obtenir des informations concernant la position et la répartition des concentrations d'un panache de PCE et sur le flux de la charge polluante vers l'aval.

Lors de l'investigation technique, on avait utilisé l'outil EPI pour la planification et l'évaluation des essais. Le recouvrement entre les zones d'appel des EPI a créé des conditions initiales idéales pour déterminer la position du panache. La position et la concentration du panache déterminées dans l'investigation technique ont pu en principe être confirmées par l'analyse avec C-SET; la charge polluante de 0.11 g/j (PCE) déterminée dans l'investigation de détail

était trop basse d'un facteur 10 environ, en raison entre autres de l'hypothèse erronée concernant le coefficient de perméabilité.

La série d'EPI répétée lors de l'investigation de détail a montré une bonne reproductibilité des courbes de concentration. Les durées de pompage allongées à 24 à 72 heures par rapport à l'investigation technique n'ont pas apporté de gain de connaissances important, puisque la zone d'appel ne s'élargissait plus que très lentement après 24 heures.

#### Expériences tirées des essais sur le site C:

Les 2 EPI réalisés dans des conditions adaptées ont permis d'obtenir des informations fiables sur la position et la concentration d'un panache de pollution, ainsi que sur la charge s'écoulant vers l'aval.

Les résultats ont pu être reproduits indépendamment du bureau qui avait exécuté les essais.

Des EPI plus longs n'apportent pas de gain d'information si la zone d'appel ne s'étend pas plus loin.

Les formules stationnaires de détermination de la perméabilité conduisent à des erreurs et devraient être remplacées par des méthodes de détermination sensibles, afin en particulier de pouvoir calculer la charge polluante avec plus de sécurité.

## 6.5 Site D

### 6.5.1 Situation du site

Le site D présente une pollution des eaux souterraines au PCE à l'aval d'une ancienne décharge. Comme donnée de base pour le projet pilote, on disposait d'un EPI à un point de mesure situé à l'aval. Le but était d'évaluer les critères d'adéquation et les résultats de l'EPI.

L'EPI a été réalisé du 2 au 9 mars 2016 au point de mesure Pt 2 sur une durée de 172 heures, avec un débit de pompage de 5 L/s. 11 échantillons au total ont été prélevés au début de l'essai et pendant la durée du pompage.

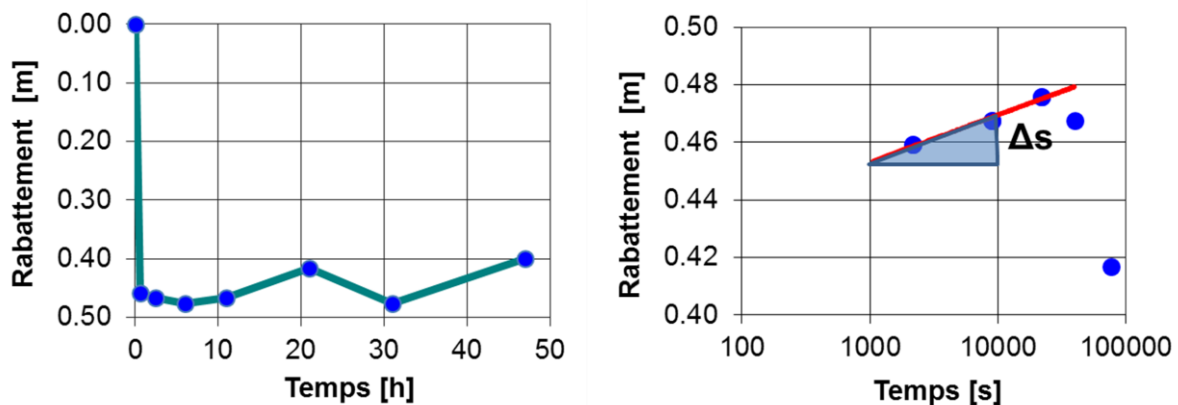
Selon le profil de forage du puits d'EPI, l'aquifère est composé d'une couche de gravier légèrement sableux avec pierres d'env. 3 m d'épaisseur, pour laquelle on avait fixé un coefficient de perméabilité de  $1.6 \cdot 10^{-3}$  m/s lors de l'investigation préalable. Les profils de forage des points de mesure voisins présentent par contre des graviers silteux.

Comme base de données pour l'évaluation du site et l'analyse avec C-SET, on disposait d'un plan de situation, de profils de forage, des données de l'essai de pompage et des résultats des analyses des échantillons prélevés durant l'EPI. L'incertitude liée à la détermination stationnaire de la perméabilité a exigé de procéder à une nouvelle interprétation hydraulique du rabattement du niveau de la nappe.

## 6.5.2 Interprétation et résultats

### Paramètres hydrauliques

Le coefficient de perméabilité nécessaire pour l'interprétation de l'EPI a été déterminé grâce à la méthode de la droite selon Cooper & Jacob à partir des rabattements mesurés aux moments des prises d'échantillons. L'interprétation se limite aux données des 6 premières heures d'essai, pour lesquelles on a enregistré un débit de pompage constant de 5 L/s et une évolution continue du rabattement. On obtient ainsi un accroissement  $\Delta s$  de 0.0219 et une transmissivité  $T = 0.183 \cdot Q / \Delta s$  de  $4.2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  (Figure 6-21). Il en résulte une valeur  $k_f$  de  $1.4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$  pour un aquifère de 3.1 m d'épaisseur.



**Figure 6-21:** Rabattement (à gauche) et interprétation hydraulique (à droite) pour l'EPI de mars 2016 au point Pt 2

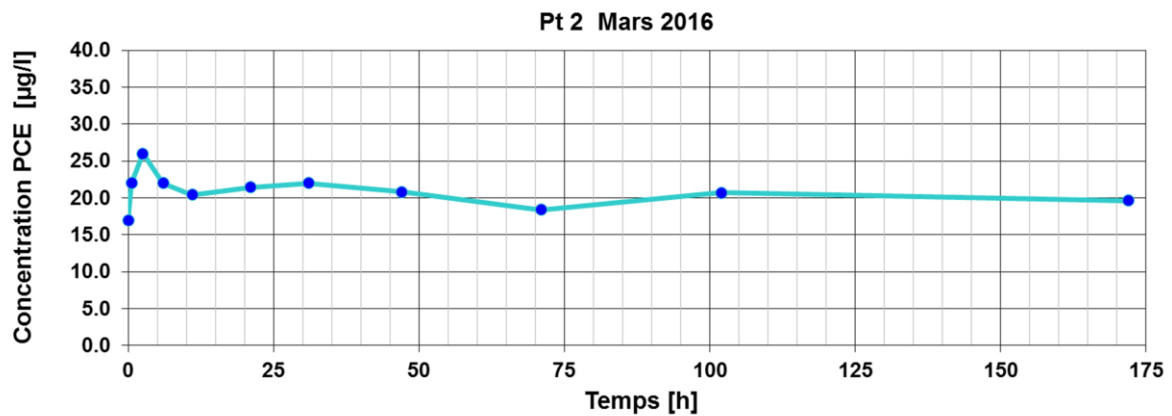
Le coefficient de perméabilité est jugé comme peu fiable en raison du manque de mesures exploitables. On préfère toutefois la valeur déterminée de manière non stationnaire à l'estimation stationnaire qui fournit une valeur de  $1.6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  sur la base d'un seul quotient  $Q/s$  (n'importe lequel).

Comme porosité efficace (porosité où l'eau circule)  $n_e$ , on adopte une valeur estimative de 18 % (0.18).

Pour déterminer le gradient hydraulique, on a utilisé une mesure de référence du 28.10.2014; on a ainsi obtenu une pente d'env. 0.0027 en direction du nord-est dans la zone du puits EPI.

### Évolution des concentrations en polluants

Les concentrations en PCE mesurées dans les premiers échantillons de l'EPI de 172 heures au point Pt 2 oscillaient entre 17 et 26  $\mu\text{g/L}$ , puis l'évolution de la concentration s'est stabilisée aux alentours de 20  $\mu\text{g/L}$  au bout de 6 heures (Figure 6-22).

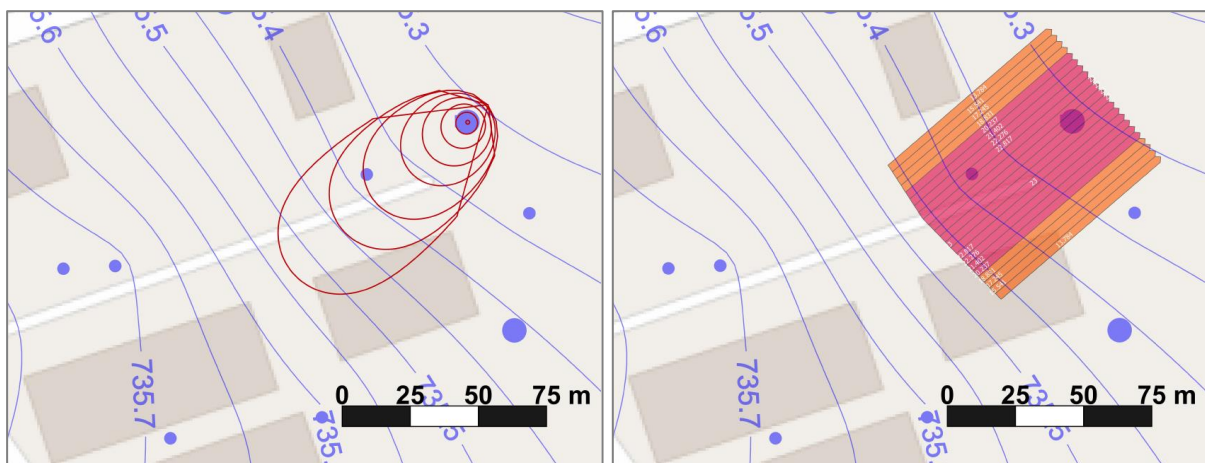


**Figure 6-22:** Concentrations en PCE pour l'EPI de mars 2016 au point Pt 2

L'évolution de la concentration laisse déjà supposer que le point de mesure Pt 2 se trouve à l'intérieur d'un panache et que la zone d'appel n'atteint pas les bords du panache pendant l'EPI.

### Isochrones

Les zones d'appel atteintes aux moments des prélèvements d'échantillons ont à nouveau été transformées en isochrones à l'aide du programme C-SET sur la base des données hydrauliques et du débit de pompage (moyen) de 5.0 L/s. Comme la section de contrôle couverte ne s'élargissait presque plus au bout de 2 jours de pompage, les échantillons prélevés ultérieurement n'ont pas été pris en compte dans le calcul des isochrones (Figure 6-23).



**Figure 6-23:** Zone d'appel de l'EPI en Pt 2. Les isochrones (image de gauche) marquent les zones d'appel correspondant aux moments des prises d'échantillons après 0.6 h, 2.5 h, 6 h, 11 h, 21 h, 31 h et 47 h de pompage. Le plan de droite montre la répartition des concentrations calculée avec C-SET.

### Position du panache et charges polluantes

On a utilisé le programme C-SET pour calculer la répartition spatiale des concentrations en polluants dans la zone d'appel à partir du flux temporel de substances dans l'eau souterraine pompée.

On obtient ainsi un panache de PCE avec un maximum de concentration d'env. 23 - 25 µg/L autour du Pt 2; la concentration moyenne sur la section de contrôle couverte, d'une largeur d'env. 44 m, se monte à env. 20 µg/L (Figure 6-23).

La charge polluante transitant par la section de contrôle couverte par l'EPI a été calculée à 9 g/j L'EPI n'a toutefois pas permis d'atteindre les bords du panache; la charge effective est donc probablement plus élevée.

### **6.5.3 Discussion et évaluation**

Les critères d'application sur le site D étaient en principe remplis et la réalisation de l'EPI a permis d'acquérir des informations concernant la concentration et la charge polluante sur une section aval d'au moins 44 m de largeur.

Avec un seul EPI, il est souvent impossible de trancher si un panache se trouve à droite ou à gauche du puits. La constance de la concentration en polluants durant tout l'EPI mène toutefois à penser que la solution la plus probable est une répartition symétrique des polluants dans la section aval couverte.

Bien que la méthode non stationnaire de la droite de Jacob soit plus sensible que l'estimation stationnaire d'origine pour déterminer la perméabilité, le résultat reste incertain en raison du manque de mesures disponibles. Il n'est pas possible d'évaluer les conditions de l'aquifère sur cette base. La largeur du panache et la charge polluante déterminées sont entachées des incertitudes correspondantes.

Il serait possible de déterminer ces valeurs avec davantage de sécurité si le coefficient de perméabilité était défini plus précisément. Cela pourrait se faire en enregistrant en continu les mesures du rabattement de la nappe lors de l'EPI et en utilisant une méthode d'évaluation plus sensible comme les courbes diagnostiques, permettant de tirer des déductions sur la structure et les limites hydrauliques probables de l'aquifère (voir Annexe C).

#### **Expériences tirées des essais sur le site D:**

- La connaissance suffisante de l'aquifère, de la pente de la nappe et de la perméabilité est une condition indispensable pour planifier et interpréter des EPI.
- Une durée de pompage judicieuse et des temps d'échantillonnage appropriés doivent être fixés dans la planification.
- Durant l'EPI, il faudrait effectuer des mesures continues du débit de pompage et du rabattement (si possible aussi depuis les points d'observation) afin de constituer une base fiable pour la détermination des caractéristiques hydrauliques.

## 7. Bilan et recommandations

### 7.1 Conditions d'application en Suisse

Le présent rapport montre que les essais de pompage intégraux (EPI) sont une méthode en principe applicable en Suisse pour l'investigation des panaches de HCC. Leur point fort par rapport à des mesures ponctuelles (distribuées de manière aléatoire ou en fonction de l'accessibilité) de la concentration en polluants dans les eaux souterraines est qu'ils permettent de recenser le flux massique des polluants par intégration spatiale, et par là-même de déterminer «sans faille» la charge polluante transitant par une section de contrôle. Parallèlement à l'analyse de la répartition spatiale des concentrations, les EPI sont à la base d'une détermination représentative des caractéristiques hydrauliques et donc d'un calcul fiable de la charge polluante.

#### **Sur les sites pilotes, la méthode par EPI a permis**

- Le recensement sans faille du flux massique de polluants,
- Une détermination directe de la charge polluante par intégration spatiale,
- La localisation du panache de pollution sur la section de contrôle.

Pour réussir la mise en œuvre des EPI, il s'est avéré essentiel que les conditions du site soient suffisamment connues et que les conditions d'application pour les EPI y soient remplies. Font partie des conditions d'application essentielles à vérifier :

- Une pollution supposée ou connue des eaux souterraines par des substances solubles dans l'eau et dont la concentration dépasse la limite de détection d'au moins un ordre de grandeur. Aucun polluant en phase ne doit apparaître dans la zone d'appel de l'EPI,
- Un aquifère suffisamment homogène, c-à-d dont l'épaisseur et la perméabilité en particulier ne varient pas trop dans la zone d'appel d'un EPI de sorte à ne pas compromettre la fiabilité du calcul analytique dans la zone d'appel,
- Une productivité suffisante pour les essais de pompage ; le débit réalisable doit se situer entre 1 et 5 l/s env. Les EPI réalisés avec des débits de pompage plus faibles ont la plupart du temps un mauvais rapport coût/bénéfice car ils ne couvrent que des sections de contrôle relativement petites. Les débits de pompage plus élevés sont souvent limités techniquement, que ce soit en raison du diamètre du puits ou de l'évacuation de l'eau pompée,
- Une épaisseur moyenne de l'aquifère d'env. 2 - 10 m,
- Une vitesse d'écoulement des eaux souterraines pas trop élevée, de sorte à ce que l'EPI puisse développer un zone d'appel assez large,

La largeur que peut atteindre la zone d'appel est déterminante pour qu'un EPI soit économiquement efficace. Les diagrammes développés dans le cadre d'une analyse de sensibilité (voir chap. 4.3) montrent que la largeur de la zone d'appel augmente avec le débit de pompage et dans une moindre mesure avec la durée du pompage, pour autant que l'effet de la vitesse



d'écoulement ne soit pas prépondérant. La largeur de la zone d'appel diminue si l'épaisseur de l'aquifère et la vitesse d'écoulement des eaux souterraines augmentent.

Il s'est avéré que les conditions de réalisation en **Suisse** différaient de celles dans le Baden-Wurtemberg (A). Ainsi, les roches meubles du Plateau présentent souvent de forts gradients d'écoulement et des perméabilités élevées. La vitesse d'écoulement naturelle élevée des eaux souterraines qui en résulte agit défavorablement sur la largeur de la zone d'appel atteignable. Il a donc fallu exclure les sites où les eaux souterraines s'écoulent en faible épaisseur sur un plancher relativement pentu. Les aquifères fissurés ou karstiques ne remplissent à priori pas les conditions de réalisation.

Lors de la préparation des sites pilotes, des doutes sont apparus quant au critère d'homogénéité de l'aquifère car ce critère est rarement idéal, même dans les roches meubles. Dans leur principe, les EPI sont toutefois un procédé qui permet de recenser intégralement le flux massique de polluants et la perméabilité, même dans des conditions hétérogènes. La charge déterminée reflète donc aussi en principe les conditions réelles de l'écoulement. D'autres résultats calculés à partir de l'évolution des concentrations lors de l'EPI, comme la position du panache de pollution et la répartition des concentrations, contiennent en effet des incertitudes qui vont de pair avec une hétérogénéité croissante.

On a en outre pu relativiser les doutes selon lesquels les éventuels battements naturels de la nappe influenceraient négativement le résultat de l'EPI. Ces battements du niveau de la nappe n'ont en effet pas d'influence déterminante sur la zone d'appel. Ils peuvent être éliminés telle une tendance lors de la détermination des paramètres hydrauliques, pour autant que cette tendance ait pu être définie grâce aux données ou à la courbe d'un point de mesure de référence situé dans le même aquifère et non influencé par l'EPI.

## 7.2 Recommandations pour la réalisation d'EPI lors du traitement des sites contaminés

Sous certaines conditions favorables, il est envisageable d'obtenir un aperçu de la situation relative aux immissions grâce aux EPI et de procéder à une priorisation des sites nécessitant investigation sur la base des pollutions constatées dans les eaux souterraines en vue des **investigations préalables (IP) des sites contaminés**.

Une aide à la décision a été élaborée pour la planification des EPI en vue d'une première évaluation de sites IP; à l'aide des critères densité de sites, conditions hydrogéologiques et points de mesure à disposition, cet outil permet de vérifier s'il est judicieux de réaliser des EPI. L'un des projets pilotes n'a pas passé cette étape de réalisation car l'état des connaissances n'était de manière générale pas satisfaisant pour la planification et le rapport coût/bénéfice avait été jugé comme plutôt défavorable. Les projets pilotes effectués dans le Baden-Wurtemberg montrent que si la densité de sites est élevée et les critères hydrogéologiques remplis, les EPI peuvent aussi être utilisés de manière performante «sur toute la surface» pour détecter les panaches de HCC et prioriser ainsi les sites nécessitant investigation [2], [5].



**Au niveau de l'investigation de détail (ID)**, on a pu réaliser des EPI avec succès sur deux sites pilotes. Sur deux autres sites il a été possible d'exploiter les données fournies par les EPI de précédentes investigations.

Les essais pilotes ont montré que la réalisation d'EPI pose certes des exigences spécialisées élevées, mais qu'ils peuvent en contrepartie fournir des résultats robustes et fiables. Malgré certaines restrictions liées à l'homogénéité de l'aquifère, les EPI ont permis de calculer les emplacements des panaches, la répartition des concentrations et les charges de manière plausible et cohérente avec les résultats déterminés indépendamment lors d'investigations antérieures.

**Bilan :**

- La mise en œuvre des EPI est certes complexe, mais les résultats sont robustes et fiables.
- Il faut au préalable vérifier les conditions de réalisation et évaluer le rapport coût/utilité sur la base des informations préliminaires concernant le site.
- On recommande de recourir aux EPI en premier lieu au stade de l'investigation de détail (ID).
- La réalisation d'EPI en vue de prioriser des sites pour l'investigation préalable est limitée lorsqu'il manque des informations préliminaires et lorsque le rapport coût/bénéfice est défavorable.

Les principales expériences tirées des projets pilotes ont été intégrées dans les recommandations pour la planification, la réalisation et l'interprétation des EPI (Annexe B). A titre indicatif pour l'estimation préalable du rapport coût/utilité, on peut se référer aux coûts qui ont été nécessaires à la planification, la réalisation et l'évaluation des essais pilotes sur les sites A et B. Ces coûts étaient de CHF 20'000 - 25'000 en cas d'infrastructure favorable (électricité, évacuation de l'eau) resp. CHF 30'000 - 35'000 en cas de conditions plus défavorables sur le site.

### 7.3 Lacunes et mesures à prendre

L'analyse de sensibilité (chap. 4.3) montre clairement que les paramètres hydrauliques ont une influence considérable sur la planification et l'interprétation des EPI. Il est donc capital de déterminer correctement le coefficient de perméabilité car sa valeur est décisive pour le calcul de la largeur de la zone d'appel et la détermination de la charge polluante.

Dans les projets pilotes B, C et D il s'est avéré que des coefficients de perméabilité fournis par de précédentes investigations s'écartaient de manière significative (d'un ordre de grandeur ou plus pour certains) des valeurs qui ont pu être déterminées beaucoup plus précisément sur la base des EPI. Les facteurs de qualité pour une plus grande précision sont :

- Des données de mesure en continu. On peut y parvenir en mesurant et en enregistrant le rabattement du niveau de la nappe dans le puits et év. dans les points de mesure voisins à l'aide de sondes piézométriques.

- Méthodes d'interprétation sensibles. La méthode d'interprétation doit idéalement permettre de reconnaître et de prendre en compte les influences perturbatrices des conditions de l'aquifère et des conditions aux bords non conformes au procédé.

Des paramètres hydrauliques erronés mènent à une planification déficiente des essais, resp. à de faux résultats et à une fausse interprétation. C'est pourquoi il faut toujours vérifier de manière critique les résultats des essais antérieurs si l'on décide de les utiliser. Il faut respecter l'état de la technique à partir des étapes de réalisation et d'évaluation de l'EPI lui-même (voir recommandations, Annexe B et indications, Annexe C).

## 8. Bibliographie

- [1] Hekel, U. (2014); Détermination des émissions et des charges de polluants au moyen d'essais de pompage intégraux – avec le programme C-SET. Présentation lors de la Journée technique ChloroNet du 20 novembre 2014. *Publication en ligne*: <http://www.bafu.admin.ch/chloronet/05751/14023/index.html?lang=fr>
- [2] LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2014); Integrales Altlastenmanagement. Leitfaden und Handlungshilfe zur integralen Untersuchung und Sanierung von Altlasten; Karlsruhe. *Publication en ligne*: <http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/245503/>
- [3] Teutsch, G., Ptak, T., Schwarz, R., Holder, T. (2000); Ein neues integrales Verfahren zur Quantifizierung der Grundwasserimmission, Teil 1: Beschreibung der Grundlagen. *Grundwasser- Zeitschrift der Fachsektion Hydrologie*, Band 5, Heft 4, S. 170-175.
- [4] Ptak, T., Kirchholtes, H., Hiesl, E., Holder, T., Rothschenk, P., Hekel, U., Beer, H.-P., Ertel, T., Herold, M., Koschitzky, H.-P. (2013): Grundwasserabstromerkundung mittels Immissionspumpversuchen. – Aktualisierung Stand der Technik, Planung, Implementierung, Anwendungsstrategien. *altlastenforum Baden-Württemberg e.V., Schriftenreihe, Heft 16; Stuttgart (Schweizerbart)*
- [5] Hekel, U., Eichelmann, C., Sonntag, P. (2014): Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg - Strategie und Methoden einer integralen Untersuchung flacher Porengrundwasserleiter im urbanen Raum. Stadt Ravensburg (Hrsg.). *Publication en ligne*: <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/>
- [6] Leven, C., Ptak, T., Guthke, A., Hekel, U., Karch, G., Morlok, U., Halla, P. Koschitzky, H.-P. (2016): Hydraulische Charakterisierung von Grundwasserleitern - Moderne Anwendungs- und Auswertungsansätze. – Schriftenreihe *altlastenforum Baden-Württemberg e.V., Heft 17, Stuttgart*
- [7] Hekel, U., Huss, A. (2013): C-SET Benutzerhandbuch. - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe. *Publication en ligne*: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/229895/>

Sous ce lien vous pouvez aussi télécharger gratuitement le programme C-SET.

# Annexes

## Annexe A: Évaluation des sites qui n'ont pas été retenus comme projets pilotes

### Site E

Le site E est une zone industrielle qui fait l'objet d'un assainissement depuis plusieurs années. Dans la zone du foyer de pollution, des éboulis de pente composés de gravier limoneux reposent sur de la roche argileuse imperméable. On suppose la présence de PCE en phase sur ce plancher, par lequel l'eau souterraine s'écoule en très faible épaisseur (0 – 2 m) en direction du nord vers un aquifère graveleux. Dans ce dernier on constate encore des concentrations en PCE allant de < 10 à env. 100 µg/L. L'évaluation du site devrait permettre de voir si les EPI sont susceptibles de clarifier la position des points d'introduction potentiels de la phase PCE dans l'aquifère graveleux.

Le site disposait d'env. 12 puits, dont 4 ont été examinés de plus près pour la réalisation d'EPI en raison de leur situation propice. On a calculé dans ce but les zones d'appel à l'aide de C-SET sur la base des isophyses des eaux souterraines d'août 2001. Les isochrones calculées pour des EPI de 3 à 4 jours sont représentées dans la Figure A-1. La direction d'écoulement des eaux souterraines en août 2001 est indiquée par des flèches dans le plan de situation.

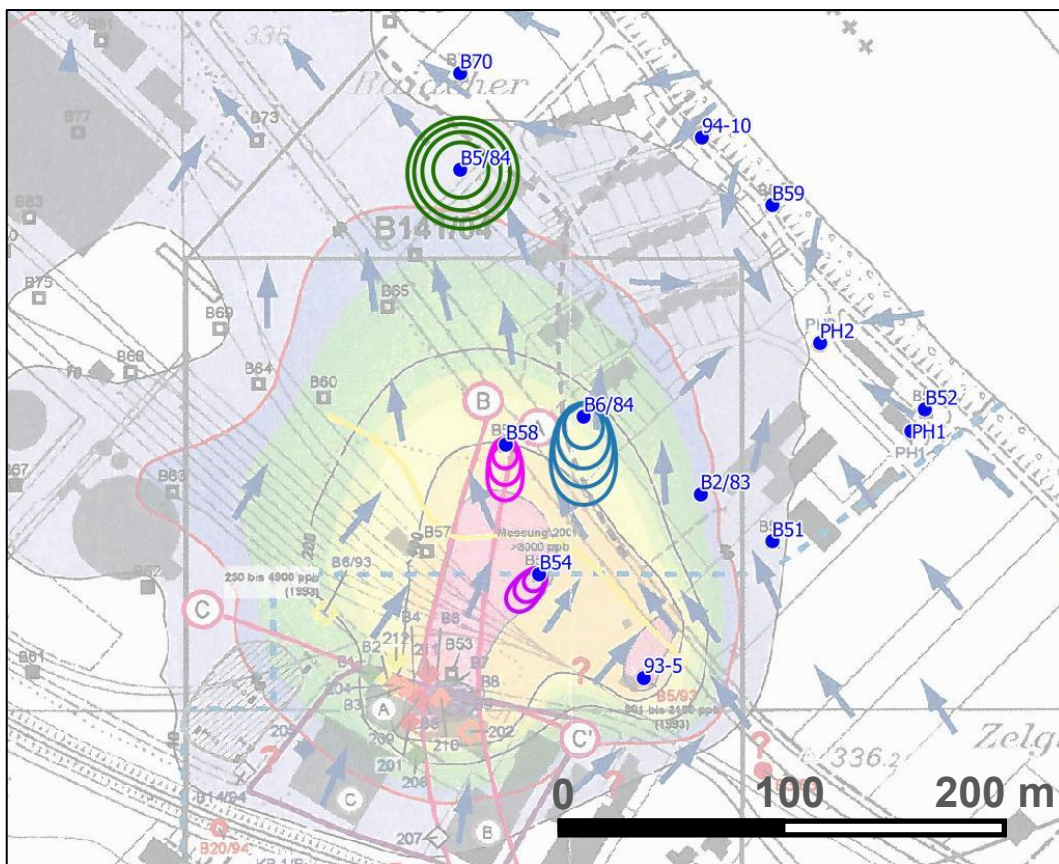


Figure A-1: Estimation des isochrones pour des EPI de 3 à 4 jours

Deux des puits à vérifier (B54 et B58) se trouvent dans la zone des éboulis de pente, où l'épaisseur de la nappe est très faible et l'influence du relief du plancher de l'aquifère est très marquée. Les exigences concernant l'épaisseur de l'aquifère, l'homogénéité et l'absence supposée de phase pour la réalisation d'EPI ne sont pas remplies dans la zone d'appel. Dans les conditions données, les EPI permettent d'atteindre tout au plus de très petites zones d'appel.

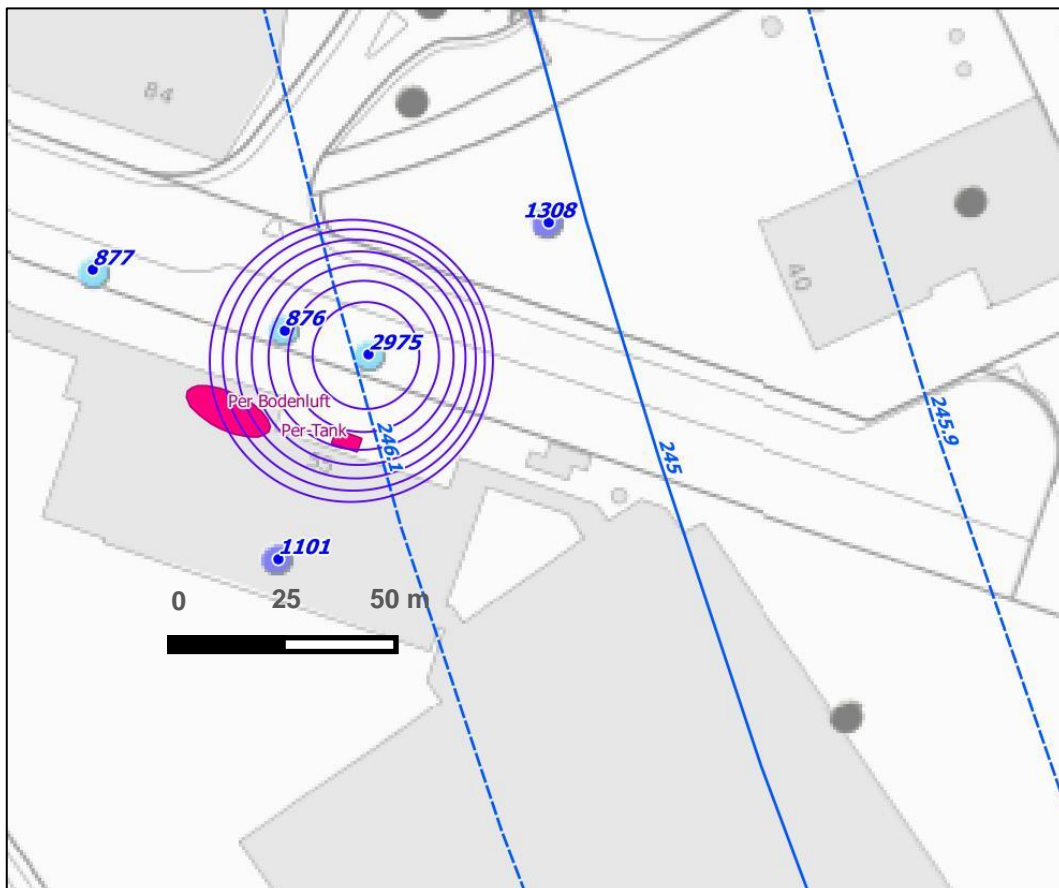
Les 2 autres puits à vérifier (B5/84 et B6/84) se situent à l'aval supposé du panache de PCE à l'intérieur de l'aquifère graveleux. Le gradient hydraulique dans la zone de ces puits est toutefois incertain en raison des différentes composantes des eaux souterraines - écoulement de pente depuis le S et infiltrations de rivière depuis le N. Cela mène à des résultats peu fiables pour les EPI au vu de la provenance des immissions constatées. Plus à l'aval, les puits à disposition ne permettent pas non plus de couvrir l'ensemble du panache.

Les EPI pourraient en principe être réalisés plus à l'aval et fournir des informations sur les immissions de PCE. Le site n'a toutefois pas été proposé pour le projet pilote en raison des restrictions susmentionnées.

## Site F

Pour le site industriel F, il s'agissait de vérifier s'il était possible d'obtenir des informations sur les limites et la provenance d'un panache de PCE en réalisant un EPI dans le puits existant 2975.

Avec une épaisseur de 8.7 m, les graviers sableux de basse terrasse très perméables présents sur le site remplissent les exigences relatives à l'aquifère. Le puits à vérifier exploite l'aquifère sur toute sa hauteur; avec un diamètre de 4.5" pour une perméabilité de  $k_f = 1 \cdot 10^{-3}$  m/s, il permet probablement un débit de pompage de 4 - 5 L/s. Les investigations préalables ont révélé des concentrations en PCE variables avec des valeurs oscillant entre 0.1 et 640 µg/L, mais n'ont pas détecté la présence de DNAPL. Avec une durée de pompage de 7 jours, il serait possible de préciser la position, la concentration et la charge du supposé panache de HCC pour une section de contrôle large de 50 - 60 m (voir calcul des isochrones, Figure A-2).



**Figure A-2:** Estimation des isochrones pour un EPI de 7 jours

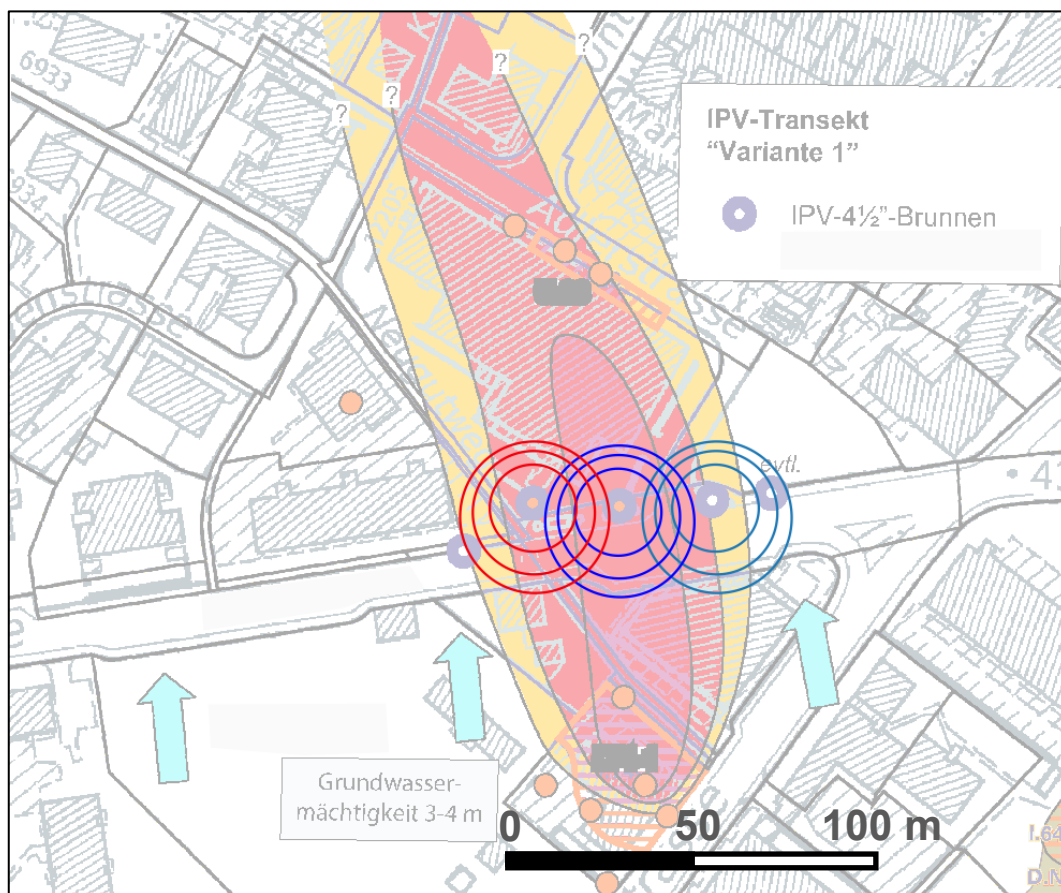
Le site remplissait bien les exigences techniques, mais il n'a pas été possible de l'utiliser comme projet pilote pour des raisons d'accessibilité et de financement.



### Site G

Les eaux souterraines du site G présentent une pollution aux HCC. Les concentrations dans le secteur aval se montent à  $> 1000 \mu\text{g/L}$ . L'épaisseur de l'aquifère sablo-graveleux est de 3 - 4 m. L'évaluation du site vise à clarifier si les EPI pourraient permettre d'investiguer les immissions et les charges de polluants sur une section aval d'env. 70 m de largeur. Deux points de mesure (tubes 4½") existent déjà dans le transect le plus favorable, et pourraient être utilisés.

En admettant une perméabilité moyenne de  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ , un gradient hydraulique pas trop fort de  $\leq 0.003$  et un débit de pompage de 2.5 L/s, C-SET donne des zones d'appel larges d'env. 30 - 35 m pour des EPI de 3 jours (voir Figure A-3). Il serait donc possible de couvrir la largeur du panache supposé en réalisant des EPI aux deux points de mesure existants ainsi qu'en un nouveau point de mesure.



**Figure A-3:** Estimation des zones d'appel avec C-SET pour des EPI de 1, 2 et 3 jours.

Le site remplirait en principe les critères de réalisations techniques pour les EPI, mais a dû être abandonné en tant que projet pilote pour des raisons juridiques.

## **Annexe B: Recommandations pour la planification, la réalisation et l'interprétation des EPI**

### **Outils de planification et d'interprétation**

Pour planifier et interpréter un EPI, il est nécessaire de calculer la zone d'appel de l'essai de pompage. Mis à part les procédés coûteux et basés sur des modèles, il existe pour cela des méthodes simples comme l'outil EPI ou C-SET pour des conditions d'aquifères +/- homogènes. Les deux outils sont disponibles pour téléchargement gratuit sur le site internet du LU Baden-Wurttemberg; pour C-SET il existe un manuel d'utilisation détaillé [7].

L'**outil EPI** se présente sous la forme d'une feuille Excel et s'applique à des conditions d'essais et d'aquifères très simplifiées où l'écoulement naturel des eaux souterraines est négligeable. Il calcule l'accroissement de la largeur de la zone d'appel en fonction du temps; sur la base des concentrations mesurées dans les échantillons, il calcule également plusieurs répartitions idéalisées des concentrations ainsi que la charge polluante transitant à travers la section de contrôle.

**C-SET** est un programme Windows qui permet de calculer et de représenter sous la forme d'**isochrones** l'élargissement de la zone d'appel aux moments des prises d'échantillons. En plus d'un écoulement marqué des eaux souterraines, il peut tenir compte de conditions pratiques comme de débits de pompage variables et d'essais dans les puits voisins. Lors de l'interprétation des EPI, le programme calcule (automatiquement) une **position du panache** coïncidant le mieux possible avec les concentrations mesurées dans les échantillons. Il calcule finalement la **charge polluante** résultant de la répartition des concentrations déterminée par itération dans la zone d'appel, en tenant compte du flux des eaux souterraines.

Il est recommandé d'utiliser le programme C-SET pour l'interprétation des EPI où l'écoulement de fond ne peut pas être négligé, comme cela est le cas pour tous les sites investigués dans ce rapport.

La qualité des résultats de calcul dépend de façon cruciale de la pertinence des valeurs sur lesquelles sont basés les paramètres de l'aquifère. Ces dernières sont:

- Le gradient hydraulique
- L'épaisseur de l'aquifère
- Le coefficient de perméabilité
- La porosité effective

### **Planification**

Lors de la planification, on détermine la largeur de la section de contrôle transversale au flux des eaux souterraines qui pourra être atteinte par l'EPI. Il faut pour cela disposer de connaissances suffisantes sur l'aquifère et sur les paramètres de l'aquifère mentionnées plus haut, ou év. effectuer des prospections supplémentaires. La zone d'appel atteignable dépend en outre de manière décisive du débit de pompage possible et de la durée de l'essai.

Pour atteindre une zone d'appel maximale, il faut choisir un **débit de pompage** aussi élevé que possible mais pouvant toutefois être maintenu constant sur la durée de l'essai. Ce débit est dimensionné sur la base des caractéristiques hydrauliques du puits, ou mieux - déduit des essais précédents. Pour les EPI, on applique en règle générale des débits de pompage entre env. 1 et 5 L/s [4]. Les EPI réalisés avec des débits de pompage plus faibles ont la plupart du temps un mauvais rapport coût/utilité car ils ne couvrent que des sections de contrôle relativement petites. Les débits de pompage plus élevés sont souvent limités techniquement, que ce soit en raison du diamètre du puits ou de l'évacuation de l'eau pompée.

La largeur du zone d'appel dépend de la **durée de l'essai**; toutefois, l'accroissement de la largeur d'appel diminue avec le temps resp. atteint un niveau de stagnation dès que le flux d'écoulement des eaux souterraines dépasse le flux radial. Il s'agit de trouver un compromis avantageux entre largeur de la section de contrôle et durée de l'essai, en regard de sa rentabilité. La durée des essais de pompage intégraux se situe souvent entre 1 et 4 jours; sur les sites pilotes, la durée des essais variait entre 24 et 172 heures mais l'EPI de 172 heures n'apportait plus de gain d'information après 48 heures déjà.

Lors des EPI sur les sites pilotes, on a prélevé entre 4 et 11 échantillons par essai; le **nombre d'échantillons** raisonnable se situe en général entre 5 et 8 échantillons par essai. Le nombre et les temps d'échantillonnage sont à planifier de sorte à obtenir une bonne répartition spatiale des concentrations resp. un panache précis, si possible réparties en bandes de flux équidistantes. Si un essai débute aux heures matinales, on peut généralement déplacer les moments des échantillonnages nocturnes à tard le soir précédent ou tôt le matin suivant sans perdre en qualité.

Si l'aval d'un site ne peut pas être couvert ou économiquement couvert à l'aide d'un seul EPI, il faut év. planifier **d'autres EPI** le long de la section de contrôle; le cas idéal serait que les zones d'appel de ces EPI se chevauchent. Il faut ce faisant tenir compte de l'influence hydraulique réciproque entre les EPI réalisés simultanément ou l'un après l'autre.

Lors de la planification, il faut tenir compte du fait que la direction et la pente d'écoulement des eaux souterraines doivent être connues aussi précisément que possible pour l'interprétation des EPI. Pour cela il faut réaliser au préalable une mesure de référence du niveau de la nappe.

### **Manière de procéder**

Outre la détermination de courbes de concentration probantes pour les polluants importants, les EPI servent aussi à déterminer des caractéristiques hydrauliques fiables.

La base pour une évaluation hydraulique fiable est de **mesurer et d'enregistrer en continu les principaux paramètres d'essai** comme le débit de pompage et le rabattement du niveau de la nappe dans le puits et év. aux points d'observation. Il faut si possible maintenir un **débit de pompage constant** pendant l'EPI. Pour les mesures, il faudrait employer des débitmètres électromagnétiques resp. des sondes piézométriques pour le rabattement de la nappe. Pour déterminer la perméabilité hydraulique, il faudrait en plus enregistrer la **remontée du niveau des eaux souterraines** après l'EPI.

En parallèle avec l'analyse des polluants, il est en outre indiqué d'enregistrer les paramètres physico-chimiques de l'eau pompée comme la conductivité électrique, la température, le pH, la teneur en oxygène et le potentiel rédox.

Pour confirmer les valeurs estimatives, on peut également déterminer la porosité efficace à l'aide d'un **essai de traçage** au cours d'un EPI. On introduit pour cela un sel traceur ou un colorant par un point de mesure situé dans la zone d'appel (radiale) de l'EPI. Ensuite on mesure et analyse le passage du traceur dans l'eau pompée.

L'**aménagement du chantier** et le dimensionnement du système de pompage doivent permettre une exploitation sûre des pompes avec le débit de pompage planifié et un prélèvement conforme des échantillons d'eau souterraine.

### Interprétation

Une **analyse hydraulique** aussi précise que possible des paramètres suivants constitue la base pour évaluer la position du panache et la charge polluante au moyen d'EPI :

- Les paramètres hydrauliques **transmissivité** et **coefficient de perméabilité** sont déterminés à partir des niveaux mesurés lors du rabattement (et de la remontée). Il faut employer à cet effet des méthodes aussi sensibles que possible, comme par ex. les courbes diagnostiques qui permettent de reconnaître les influences perturbatrices des conditions non conformes au procédé (aquifère, bords) et d'en tenir compte lors de l'interprétation (voir Annexe C).
- Le **gradient hydraulique** est généralement déduit des courbes de niveau des eaux souterraines construites à partir des mesures de référence des niveaux de la nappe réalisées pour la zone étudiée.
- La **porosité efficace** peut se calculer à partir du passage du traceur selon l'équation de transport en écoulement radial, si l'on a introduit un traceur à proximité du puits pendant l'EPI [4].

Les **isochrones**, la **position du panache**, la **répartition des polluants** et la **charge polluante** dans la zone d'appel de l'EPI se calculent à l'aide de l'un des outils mentionnés plus haut. Pour les sites pilotes, on a utilisé à cet effet le programme C-SET.

- La largeur croissante de la zone d'appel de l'EPI aux moments des prélèvements d'échantillons est d'abord transformée en **isochrones**.
- Dans l'étape suivante, on détermine un **panache de pollution** dont la répartition des concentrations par bandes de flux coïncide avec le flux de polluants mesuré. Lors de la détermination des positions des panaches, il faut combiner de manière aussi cohérente que possible les répartitions des concentrations - souvent ambiguës en raison de leur symétrie - avec les résultats des EPI voisins et les informations préalables concernant la répartition des polluants dans les eaux souterraines resp. les émetteurs probables et improbables.
- Pour déterminer la charge polluante transitant par la section de contrôle, on additionne entre eux les produits des concentrations des différentes bandes de flux par la largeur de ces bandes, par la transmissivité et la pente hydraulique. En cas de chevauchement entre

les zones d'appel de plusieurs EPI, il faut veiller à ne pas comptabiliser deux fois les charges de bandes qui se recouvrent.

## Annexe C: Indications pour le calcul de la perméabilité

La perméabilité, comme quotient de la transmissivité par l'épaisseur de l'aquifère, constitue le facteur déterminant pour calculer la charge polluante en plus de la concentration en polluants. La qualité de la planification et de l'interprétation des EPI dépend également beaucoup de la détermination correcte du coefficient de perméabilité. Cela met en avant les méthodes qui permettent en même temps de vérifier si les hypothèses du procédé d'évaluation - généralement conditions d'homogénéité et d'infinité dans l'aquifère - concordent avec les conditions d'essai effectives. Le recours à des données des phases d'essai où les conditions d'essai ne concordent pas avec les hypothèses du procédé ou sont sujettes à des influences perturbatrices (par ex. aménagement du puits, fissures, fuites, bords de l'aquifère) engendrera inévitablement des erreurs.

Les méthodes d'évaluation usuelles possèdent des sensibilités très diverses quant à l'identification des conditions d'essai. Dans un ordre de sensibilité croissante, on aborde dans la suite les équations stationnaires, la méthode non stationnaire de la droite et les courbes diagnostiques. Une sensibilité plus élevée implique toutefois des exigences accrues concernant la qualité des mesures.

Les **équations stationnaires** (comme par ex. la formule du puits de Dupuit-Thiem) partent de l'idée que le rabattement se stabilise après un certain temps de pompage et que la transmissivité dépend exclusivement du rapport entre le débit de pompage  $Q$  et le rabattement  $s$  (en état stationnaire). La méthode présuppose que l'aquifère est homogène et que le rabattement s'étend jusqu'à un rayon d'action  $R$  du puits qui peut être approximée (avec rayon du puits  $r$ ). La figure Figure C-1 illustre l'application d'une méthode d'analyse stationnaire sur l'exemple du rabattement pour l'EPI en Kb 05/3 (site A, chap. 6.2.4):

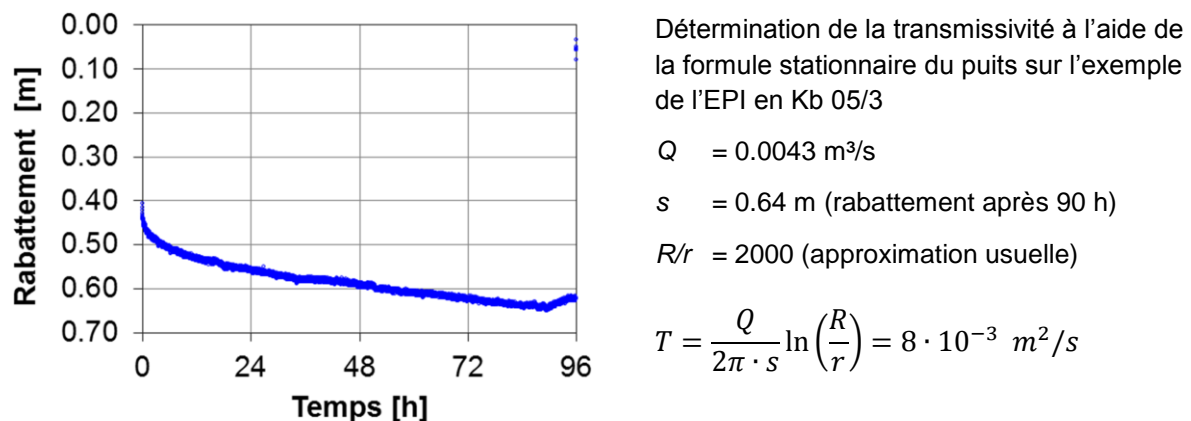


Figure C-1: Exemple de détermination de la perméabilité par une méthode stationnaire

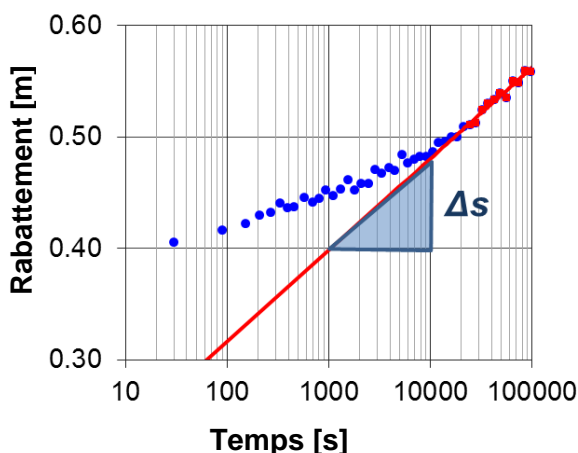
Des erreurs particulièrement graves d'un ordre de grandeur ou plus peuvent se glisser dans le calcul si l'on utilise - comme cela est souvent le cas - le rabattement dans le puits pour l'analyse et que ce rabattement est plus grand que l'on ne s'y serait attendu en se basant sur la perméabilité de l'aquifère. Cela arrive lorsque le puits résiste à l'entrée de l'eau, par ex. si les tubes filtrants sont rouillés.



Finalement, les **méthodes stationnaires ne sont pas sensibles** aux conditions d'essai effectives et n'offrent pas la possibilité de contrôler les hypothèses du procédé.

Les **méthodes non stationnaires** partent de l'hypothèse que le niveau des eaux souterraines baisse avec la durée du pompage en raison du prélèvement de la réserve d'eau stockée dans l'aquifère. L'élargissement du cône de rabattement dans les aquifères homogènes et infinis est décrit par l'équation de Theis. L'équation de Theis est l'intégrale d'une fonction  $e$  qui est représentée comme la courbe caractéristique de Theis avec échelle doublement logarithmique pour une utilisation plus aisée lors de l'évaluation. L'interprétation de la courbe caractéristique est basée sur le fait que les données d'essai sont représentées avec la même échelle en tant que logarithme du rabattement en fonction du logarithme du temps, et que la courbe expérimentale ainsi obtenue peut être comparée à la courbe caractéristique de Theis. Les écarts entre les données expérimentales et la courbe caractéristique de Theis sont toutefois difficiles à reconnaître en échelle doublement logarithmique.

Pour interpréter les essais de pompage, on utilise couramment une variante simplifiée de l'équation de Theis connue sous le nom de **méthode de la droite selon Cooper & Jacob**. Dans des conditions homogènes et infinies, le rabattement évolue de manière rectiligne en fonction du logarithme du temps (graphique semi-logarithmique); la relation avec la transmissivité est établie à partir de la pente  $\Delta s$  de la droite sur une décade logarithmique. La figure C-2 illustre l'application de la méthode de la droite, à nouveau pour la série de données de l'EPI en Kb 05/3 (site A, chap. 6.2.4):



Détermination de la transmissivité à l'aide de la méthode de la droite selon Cooper & Jacob sur l'exemple de l'EPI en Kb 05/3

$$Q = 0.0043 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta s = 0.082 \text{ m (pente de la droite)}$$

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta s} = 9.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

**Figure C-2:** Exemple d'une analyse non stationnaire avec la méthode de la droite

L'évolution linéaire du rabattement dans des conditions homogènes infinies permet en principe de vérifier les données expérimentales quant à la pertinence des hypothèses. Malheureusement, d'autres conditions dans l'aquifère et aux bords forment aussi des séquences de données rectilignes plus ou moins longues en échelle semi-logarithmique. Lors de l'interprétation des données du puits, elles peuvent en plus former une séquence rectiligne dans la phase de départ de vidange du puits. En conséquence, plusieurs séquences rectilignes peuvent apparaître avec des pentes très diverses. Ainsi, la méthode de la droite ne permet pas toujours d'identifier clairement les séquences de données qui remplissent les conditions d'homogénéité et d'infinité.



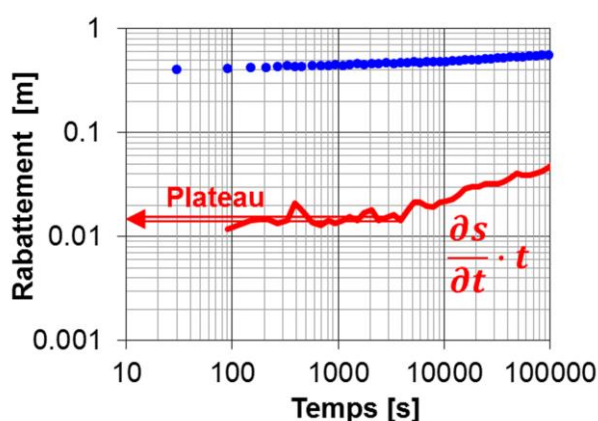
La **méthode non stationnaire de la droite** présente donc une **sensibilité moyenne** pour l'identification des conditions expérimentales, en particulier lorsqu'elle est utilisée pour l'interprétation des données du puits.

De manière analogue au procédé de Theis, la **courbe diagnostique** est une méthode non stationnaire avec laquelle les mesures du rabattement  $s$  sont représentées en fonction du temps  $t$  dans un graphique doublement logarithmique. Comme une «loupe mathématique» qui représente avec exagération les variations de la courbe de rabattement, on trace en plus la 1<sup>ère</sup> dérivée de la courbe de rabattement  $\frac{\partial s}{\partial t} \cdot t$  en fonction du temps  $t$ .

La dérivée forme un plateau pour les conditions de Theis (pente = 0). La dérivée des données permet ainsi d'identifier les phases d'essai pour lesquelles les hypothèses d'homogénéité et d'infinité sont applicables. Les pentes spécifiques et l'évolution typique de la dérivée permettent d'identifier une multitude de conditions expérimentales qui s'écartent des conditions d'homogénéité et d'infinité de l'aquifère. Il existe des procédés basés sur des courbes types pour déterminer les caractéristiques des puits et les caractéristiques des aquifères et conditions aux bords non homogènes [6]. Pour déterminer la transmissivité, seule la valeur en ordonnée du plateau de la dérivée relevée sur la courbe diagnostique est toutefois nécessaire.

Il existe des programmes commerciaux d'analyse avec la courbe diagnostique. Pour les essais pilotes, on a toutefois engendré les courbes diagnostiques à l'aide d'une simple feuille Excel. Les étapes d'interprétation à l'aide de la courbe diagnostique sont expliquées sur l'exemple de l'EPI en Kb 05/3 (Figure C-3):

- Traçage de la courbe de rabattement (bleu)
- Lissage de la courbe de rabattement (par ex. à l'aide de la moyenne mobile)
- Représentation des valeurs de dérivée correspondant à la pente entre deux points voisins (rouge)
- Identification de la phase plateau (hypothèse d'homogénéité et d'infinité valable)
- Calcul de la transmissivité à partir de la valeur en ordonnée du plateau



Détermination de la transmissivité à l'aide de la courbe diagnostique sur l'exemple de l'EPI en Kb 05/3 (site A, chap. 6.2.4)

$$Q = 0.0043 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} \cdot t = 0.014$$

$$T = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{1}{\frac{\partial s}{\partial t} \cdot t} = 2.4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

**Figure C-3:** Exemple d'une analyse avec la courbe diagnostique

Par sa **sensibilité élevée**, c'est la méthode de la **courbe diagnostique** qui offre la plus grande sécurité dans la détermination de la transmissivité et de la perméabilité qui en découle pour les conditions expérimentales existantes.

**Bilan:**

- Le résultat du calcul de la perméabilité dépend de la méthode d'évaluation !
- La qualité des résultats augmente avec la sensibilité de la méthode d'évaluation pour les conditions d'aquifère et d'essai existantes, car de cette manière seules les séquences de données conformes à la méthode interviennent dans la détermination de la perméabilité.