



Kanton Zürich  
Baudirektion



## Groupe de projet ChloroNet **Essais de pompage intégraux**

### Résultats

Bettina Flury  
AWEL Amt für Abfall,  
Wasser, Energie und Luft

24 novembre 2016

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet



### Contenu

#### 1. Principaux résultats du projet

Bettina Flury

- Tâche et objectifs
- Aides à l'application

#### 2. Analyse de sensibilité

Daniel Hunkeler

- Influence des paramètres hydrogéologiques

#### 3. Réalisation d'EPI dans le cadre de deux projets pilotes dans le canton de Berne

Jürgen Abrecht

- Réalisation des essais
- Exploitation des résultats et évaluation

#### 4. Bilan

Bettina Flury

24 novembre 2016

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet

2



## Qu'est-ce qu'un essai de pompage intégral (EPI)?

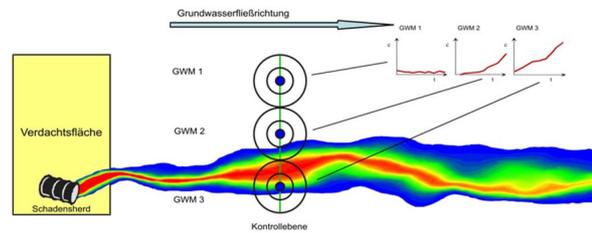


Abb. 2.2: Prinzip der instationären Immissionsmessung (nach Teutsch et al., 2000)

Un EPI est un essai hydrogéologique réalisé sur le terrain dans le but de déterminer la charge polluante passant par une section de contrôle d'un aquifère

- Détermination quantitative de la distribution des concentrations le long de la section de contrôle
- Conclusions concernant les panaches et les foyers de pollution

24 novembre 2016

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet

3



## Objectifs du groupe de projet

- Vérifier, à tous les niveaux de la législation sur les sites contaminés, si la méthode est applicable en Suisse
- Définition des conditions-cadres
  - Conditions hydrogéologiques
  - Type de site
  - Modalités d'exécution des essais
- Réalisation de projets pilotes et évaluation
- Rédaction d'un rapport d'experts

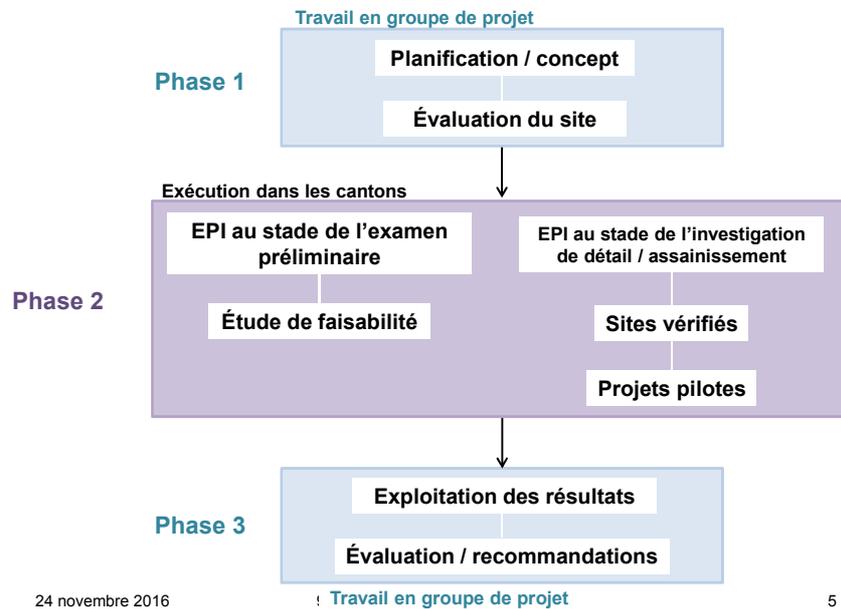
24 novembre 2016

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet

4



## Manière de procéder



## Aides à l'application

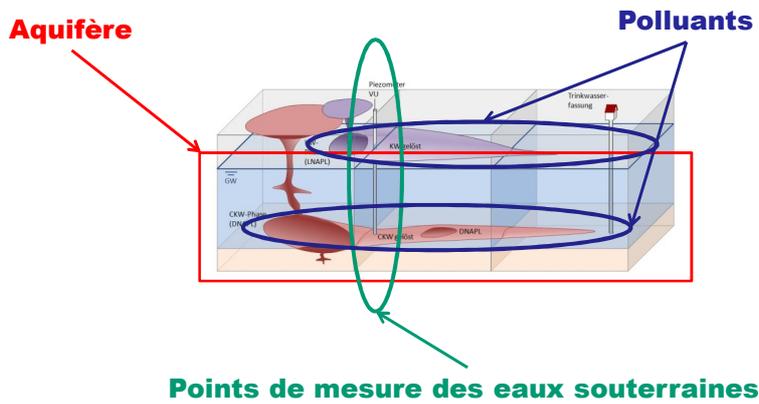


- Exigences relatives au site (critères)
  - Quels sont les critères à remplir obligatoirement?
  - Quels critères ont une influence sur les coûts?
  - Que faut-il encore prendre en considération?
- Aide à la décision pour la planification (arbre de décision)
- Analyse de sensibilité
- «Livres de recettes» pour la planification, la réalisation et l'évaluation des résultats



## Exigences relatives au site

### Critères d'application

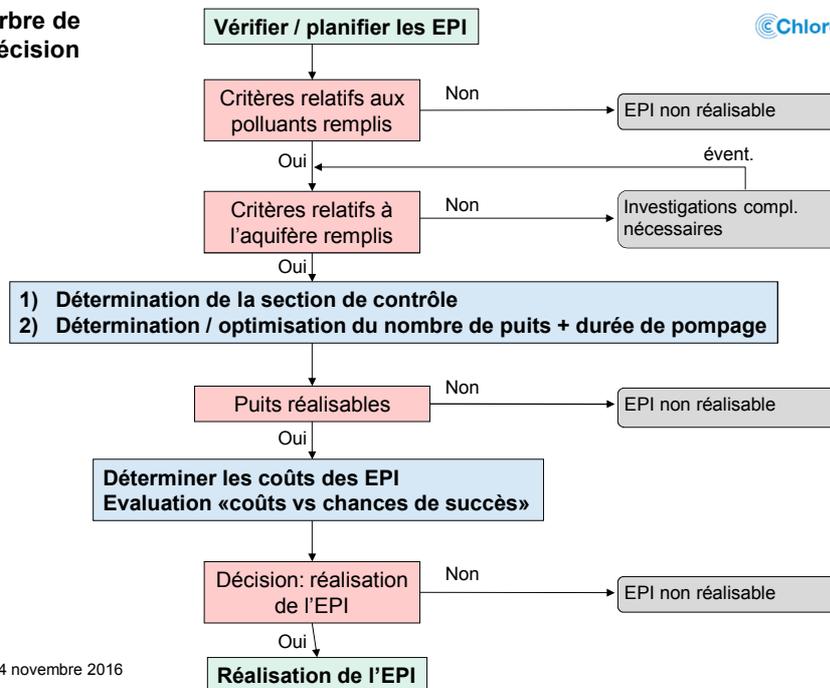


24 novembre 2016

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet

7

### Arbre de décision



24 novembre 2016

8



## «**Livre de recettes**» (annexe B)

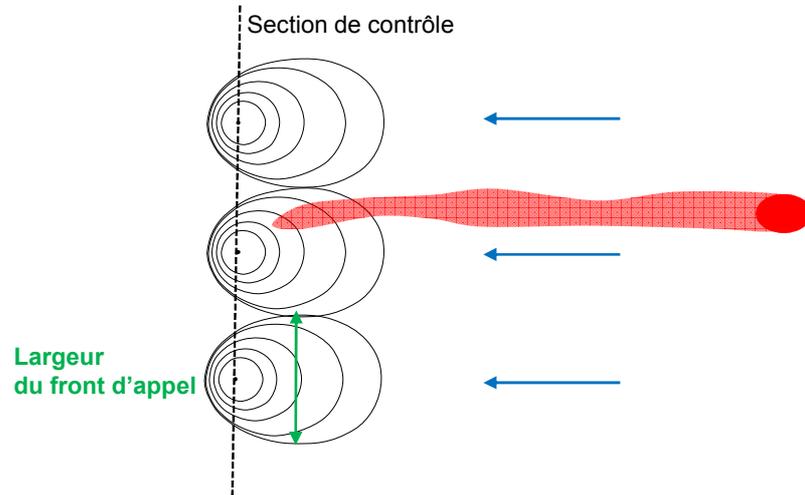
- **Outils**
  - Outil EPI (très simplificateur, seulement pour les faibles flux d'eaux souterraines)
  - C-SET (outil des essais pilotes, lorsque le flux des eaux souterraines n'est pas négligeable)
- **Planification**
  - Débit de pompage et durée des essais
  - Nombre d'échantillons
  - Nombre d'essais
- **Manière de procéder**
  - Réalisation technique
  - Essais complémentaires (avec traceurs)
- **Exploitation des résultats**
  - Position du panache
  - Concentration en polluants et charge polluante

## Analyse de sensibilité

### Influence des paramètres hydrogéologiques

**Daniel Hunkeler**  
**Université de Neuchâtel**  
**CHYN**

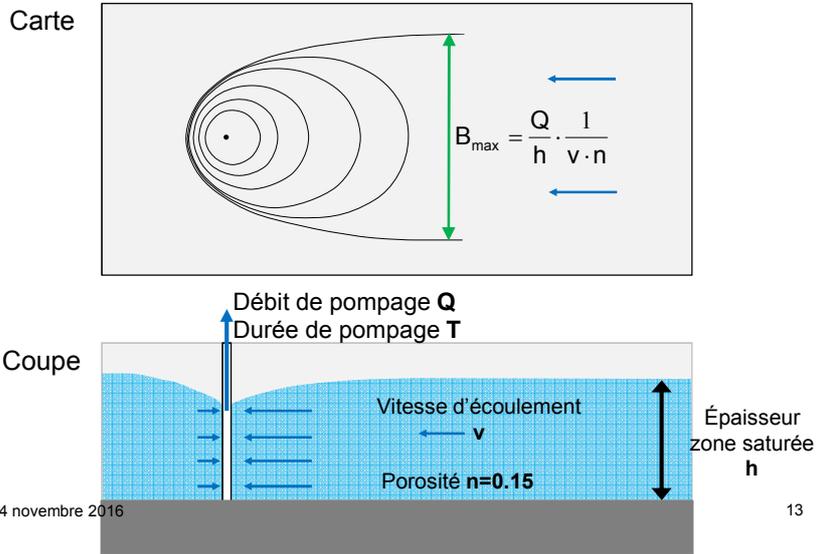
### EPI: Importance de la largeur du front d'appel



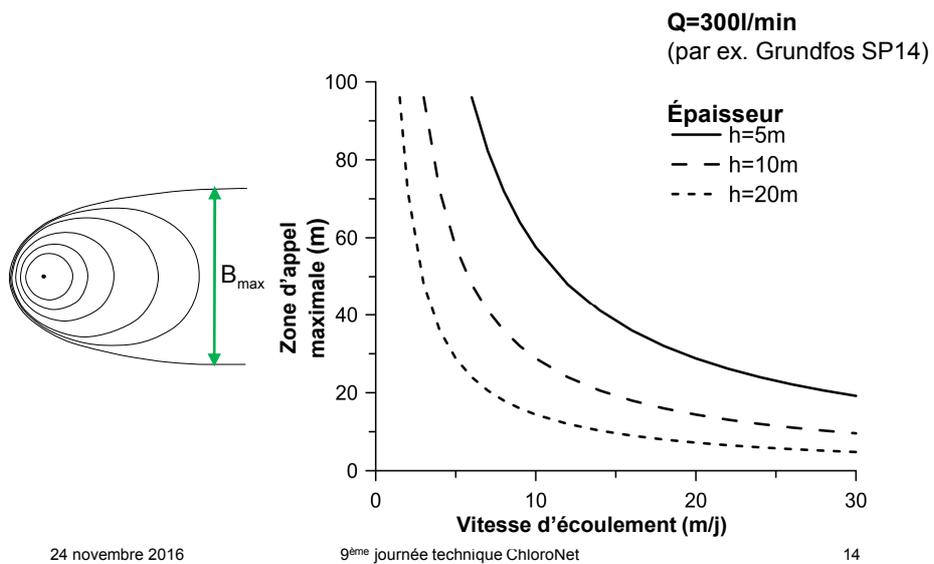
### Largeur du front d'appel: méthode de calcul

- **Résolution analytique de l'équation du flux pour un champ d'écoulement autour d'un puits de pompage**
- **Permet de déterminer très rapidement l'influence de différents paramètres hydrogéologiques sur la largeur du front d'appel**
- **Hypothèses simplificatrices**
  - Sous-sol homogène à l'échelle de l'EPI
  - Le puits d'essai exploite toute l'épaisseur de l'aquifère
  - Pas d'interaction entre les différents EPI

**Facteurs influençant la largeur du front d'appel**

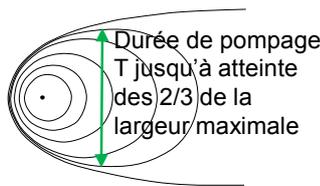


**Quelle largeur maximale du front d'appel peut-on atteindre?**

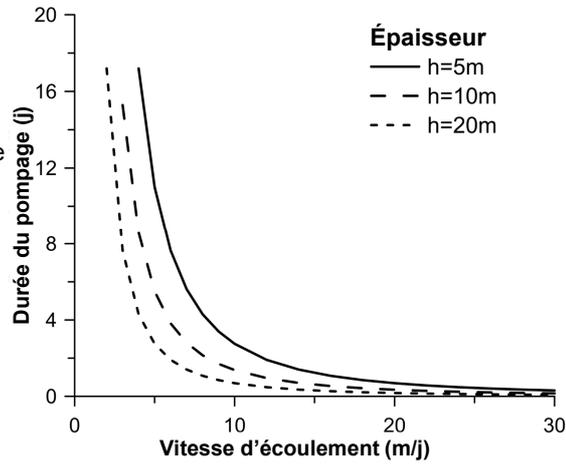




### A quelle vitesse la largeur du front d'appel augmente-t-elle?



**Q=300l/min**  
(par ex. Grundfos SP14)



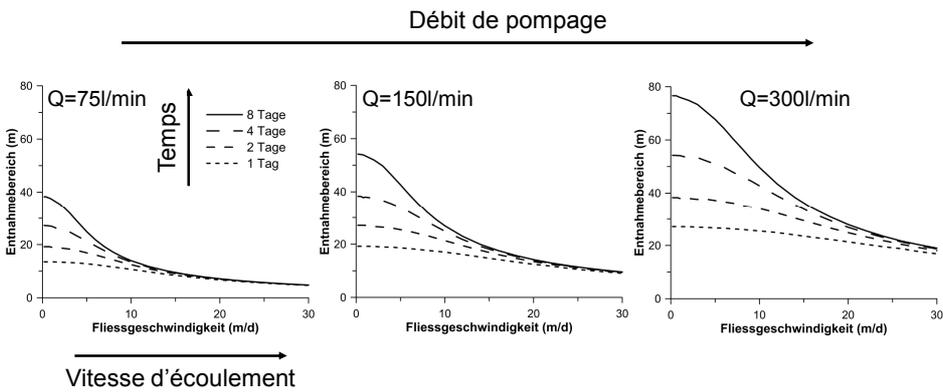
24 novembre 2016

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet

15



### Quelle largeur le front d'appel peut-il atteindre? Exemple pour un aquifère d'épaisseur h=5m



24 novembre 2016

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet

16

### Conclusions - généralités

- **La vitesse d'écoulement a une forte influence sur la largeur maximale du front d'appel et sur le temps nécessaire pour l'atteindre**  
-> il faut connaître ce paramètre pour planifier les EPI
- **En présence de vitesses d'écoulement élevées (>10m/j) et d'aquifères très épais (>15m), la largeur du front d'appel que l'on peut atteindre avec des pompes ordinaires est très réduite (<10m)**  
-> la réalisation d'EPI est soumise à certaines conditions

24 novembre 2016

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet

17

### Conclusions - dimensionnement des EPI

- **Grandes vitesses d'écoulement (>10m/j)**
  - La largeur du front d'appel est proportionnelle au débit de pompage  
-> utiliser une pompe puissante
  - La largeur maximale est rapidement atteinte  
-> une durée de pompage plus longue n'apporte aucun avantage
- **Faibles vitesses d'écoulement (<10m/j)**
  - Un temps de pompage plus long permet d'accroître encore la largeur du front d'appel
  - Mais cette largeur n'augmente qu'avec la racine carrée de la durée de pompage

24 novembre 2016

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet

18

## Sites pilotes EPI au stade de l'ID/PA/A (cant. de Berne)

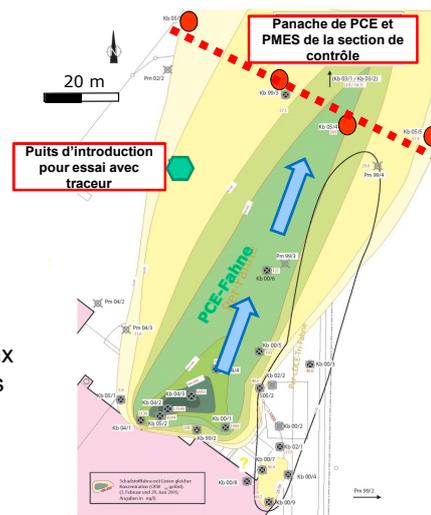
### Résultats

Jürgen Abrecht, GEOTEST AG

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

#### Site 1: Section de contrôle

- Section de contrôle: 4 PMES sous la forme de puits 4.5" à part entière
- Depuis 2011: mesures multi-niveaux pour calculer la charge. Permettent de comparer les charges estimées au moyen de différentes méthodes.
- Position du panache connue grâce aux mesures effectuées pendant plusieurs années dans la section de contrôle et aux PMES supplémentaires.



9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

20

GEOTEST BOLOGNINI / HUBER / MULLER /  
BISCH / FISCHER /  
HUBER / SCHULZ

ChloroNet

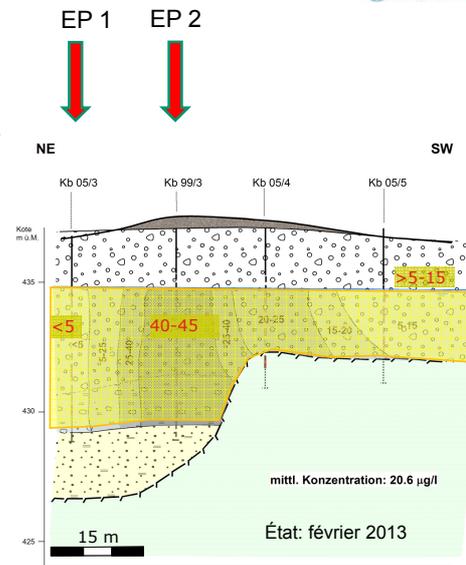
Site 1:  
Comparaison des méthodes

20 m

1. Estimation actuelle de la charge  
Par interpolation et extrapolation  
des mesures multi-niveaux dans  
la section d'écoulement  
(= section de contrôle)

2. Délimitation et situation du  
panache de pollution

Les deux méthodes donnent-elles des  
résultats cohérents et quelles  
conclusions peut-on en tirer ?



9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

21

GEOTEST BOLOGNINI / HUBER / MULLER /  
BISCH / FISCHER /  
HUBER / SCHULZ

ChloroNet

Site 1: Données techniques pour l'EPI

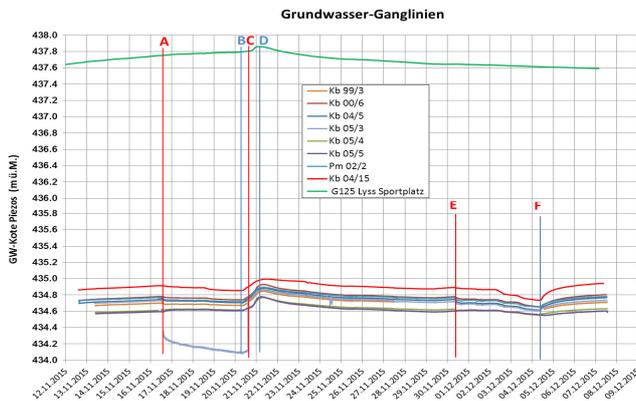
|   | 1 <sup>er</sup> EPI: Kb 05/3 | 2 <sup>ème</sup> EPI: Kb 99/3 |
|---|------------------------------|-------------------------------|
| Débit de pompage Q<br>(m <sup>3</sup> /h) | 15.45                        | 15.48                         |
| Débit de pompage Q<br>(ℓ/min)             | 257                          | 258                           |
| Volume pompé total (m <sup>3</sup> )      | 1'483                        | 1'486                         |
| Durée de pompage (h)                      | 96                           | 96                            |

Durée entre les deux EP: 10 jours

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

22

Site 1: Courbes de variation du niveau des eaux souterraines durant l'EPI  
 Les variations naturelles sont corrigées lors de l'exploitation des résultats

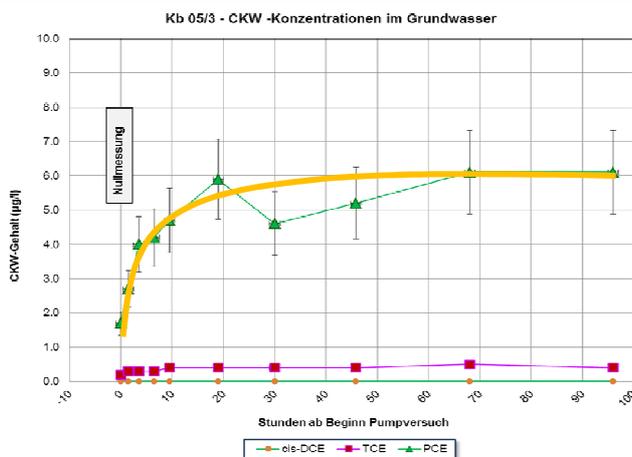


9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

23

Site 1: Teneurs en HCC

1<sup>er</sup> EP au point Kb 05/3: 10 échantillons en 96 heures.

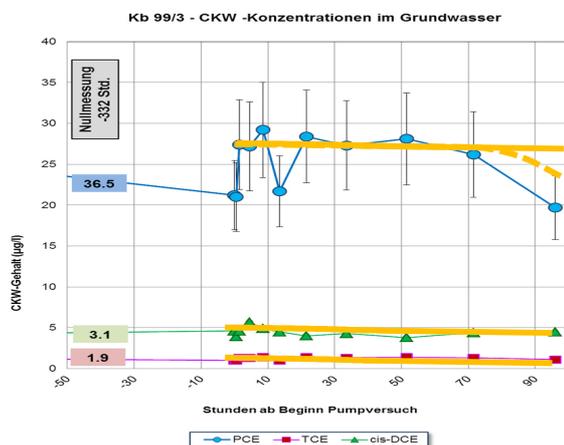


9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

24

## Site 1: Teneurs en HCC

2<sup>ème</sup> EP au point Kb 99/3: 11 échantillons en 96 heures.



9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

25

## Site 1: Évaluation hydraulique des EP

Les **coefficients de perméabilité** calculés sont:

1<sup>er</sup> essai de pompage:

Kb 05/3  $k_f = 5.2 \times 10^{-3}$  m/s

Kb 99/3  $k_f = 3.7 \times 10^{-3}$  m/s

Kb 04/5  $k_f = 3.7 \times 10^{-3}$  m/s

Pm 02/2  $k_f = 3.0 \times 10^{-3}$  m/s

2<sup>ème</sup> essai de pompage:

Kb 99/3  $k_f = 4 \times 10^{-3}$  m/s (remontée)



**Coefficient de perméabilité représentatif**  
 $k_f = 5 \times 10^{-3}$  m/s

Porosité effective  
 $n_0 = 0.18$

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

26



## Site 1: Charges polluantes

Le flux de charge calculé compte tenu du chevauchement entre les isochrones des deux EPI est  
 $M_{\text{PCE}} \approx 4.5 \text{ g/j}$

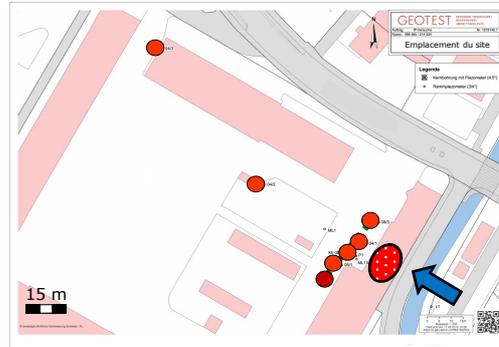
Cela correspond à une **charge annuelle de 1.6 kg PCE.**

## Site 1: Charges polluantes - comparaison des méthodes

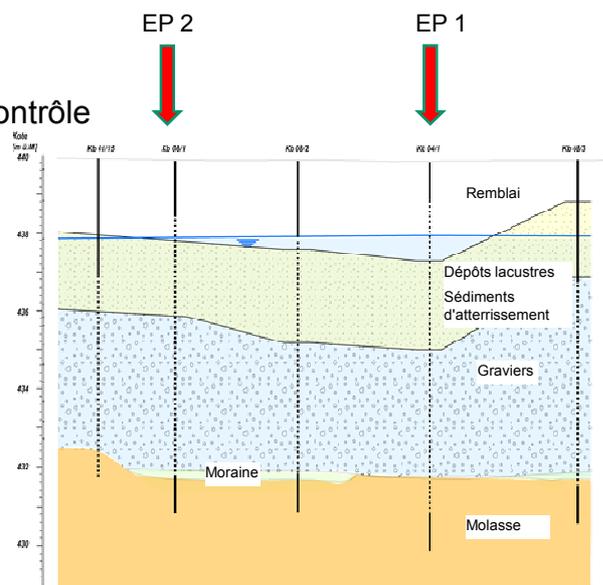
|       | <b>Charge résultant des EPI</b> | <b>Charge résultant des essais multi-niveaux</b> |                               |
|-------|---------------------------------|--|-------------------------------|
|       | 1.6 kg                          | 3-4 kg   | 1.4 kg                        |
| $k_f$ | $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$   | $6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$                    | $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ |
| $i$   | 0.002                           | 0.004  | 0.002                         |

## Site 2: Situation

- Site exploité
- Pas de DNAPL
- Profondeur de la nappe: 2.0 m
- Profondeur du plancher: 8 - 12 m
- Épaisseur de la nappe: 5 – 6 m
- $k_f \sim 7 \times 10^{-4}$  m/s
  
- 7 petits puits filtrants en aval  
(PMES de 4.5")
- Section de contrôle formée de 5  
PMES à env. 10 m du foyer



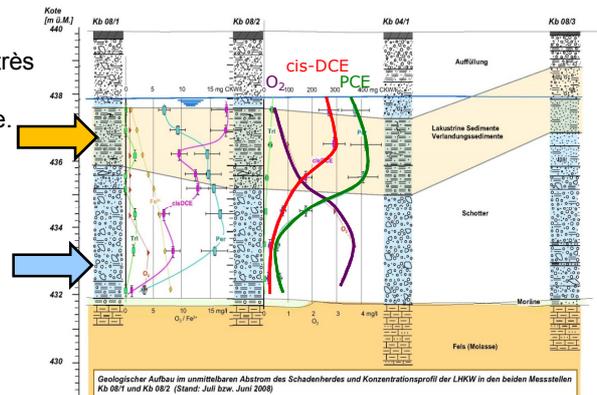
## Site 2: Section de contrôle



## Site 2: Section de contrôle

### Aquifère

- Sédiments peu perméables: très fortement pollués (jusqu'à >3'000 µg/l), milieu anaérobie.
- Gravier perméables au-dessous: pollution moindre (jusqu'à 200 µg/l), milieu aérobie.



9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

33

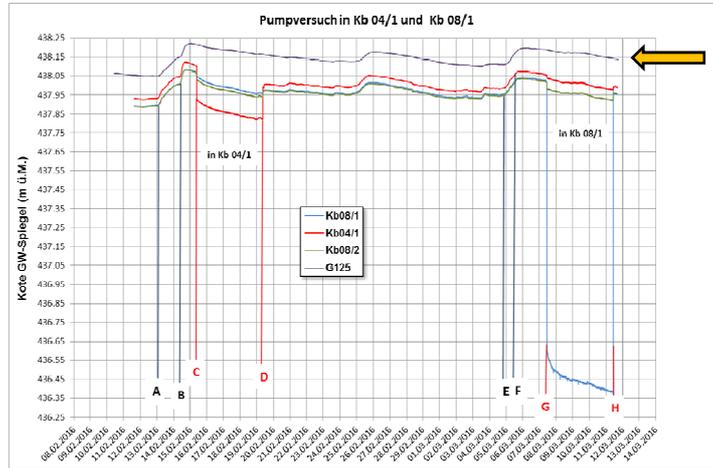
## Site 2: Données techniques concernant les EPI

|   | 1 <sup>er</sup> EPI: Kb 04/1 | 2 <sup>e</sup> EPI: Kb 08/1 |
|---|------------------------------|-----------------------------|
| <b>Débit de pompage Q (m<sup>3</sup>/h)</b> | 7.75                         | 6.72                        |
| <b>Débit de pompage Q (ℓ/min)</b>           | 129                          | 112                         |
| <b>Volume pompé total (m<sup>3</sup>)</b>   | 744                          | 646                         |
| <b>Durée de pompage (h)</b>                 | 96                           | 96                          |

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

34

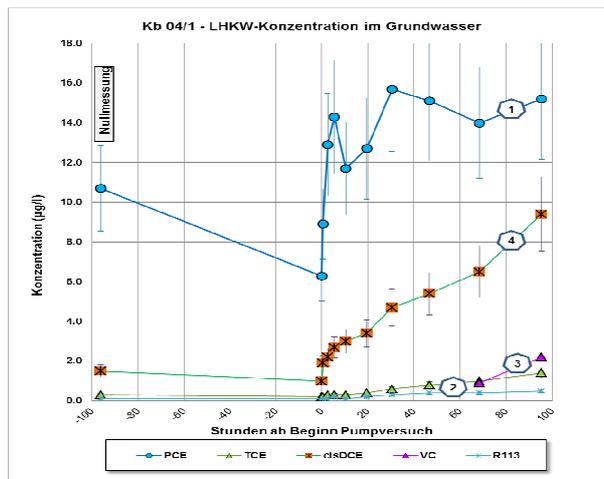
Site 2: **Courbes de variation du niveau** des eaux souterraines durant l'EPI  
 Les variations naturelles sont corrigées lors de l'exploitation des résultats



9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

Site 2: Teneurs en HCC

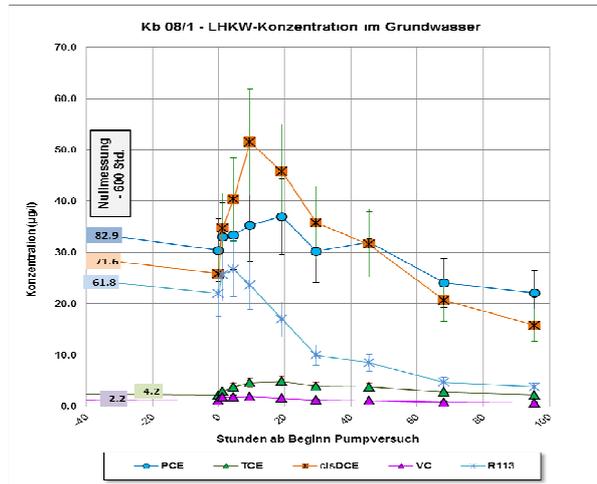
1<sup>er</sup> EP au point Kb 04/1: 10 échantillons en 96 heures.



9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

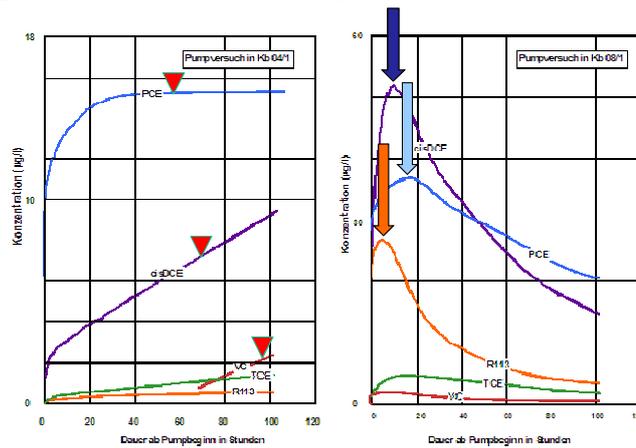
Site 2: Teneurs en HCC

2<sup>ème</sup> EP au point Kb 08/1: 9 échantillons en 96 heures.



9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

Site 2: Teneurs en HCC - courbes lissées



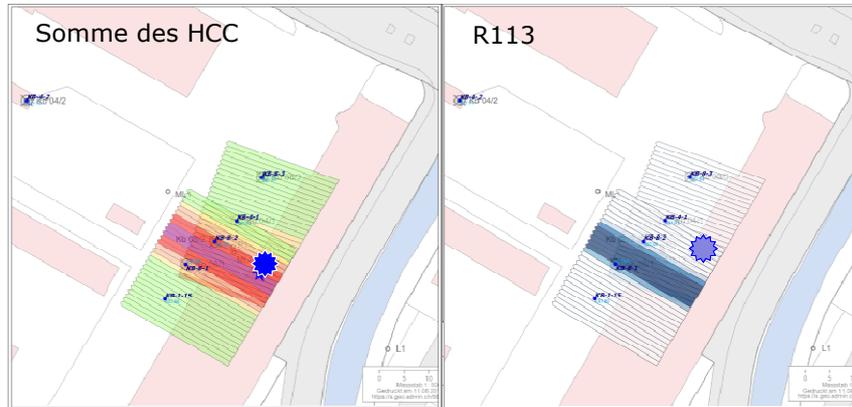
- Kb 04/1: le puits est situé pratiquement déjà hors du panache.
- Comportement variable des différents polluants (par ex. moment de l'apparition des maxima).
- Kb 08/1: le puits de pompage est situé en bordure d'un panache étroit.

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016



## Site 2: Position du panache

Concentrations calculées dans les bandes de courant



9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

41

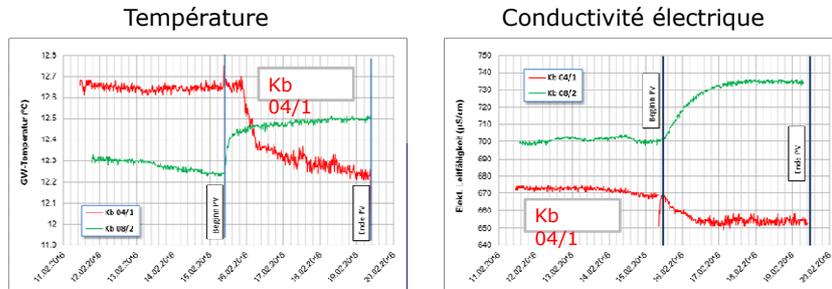
## Site 2: Charges polluantes - comparaison des méthodes

|                       | Charge rés.<br>du<br>1er EP | Charge rés.<br>du<br>2e EP | Estimation<br>antérieure |
|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| $\Sigma(\text{HCHV})$ | 1.6 kg                      | <b>2.5 kg</b>              | 1.7 – 3.5 kg             |
| <b>R113</b>           | 0.04 kg                     | <b>0.4 kg</b>              | 0.1 – 0.5 kg             |

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

42

Site 2: Comportement de la température et de la conductivité électrique pour le 1<sup>er</sup> EP dans le puits de pompage Kb 04/1 et au point de mesure Kb 08/2

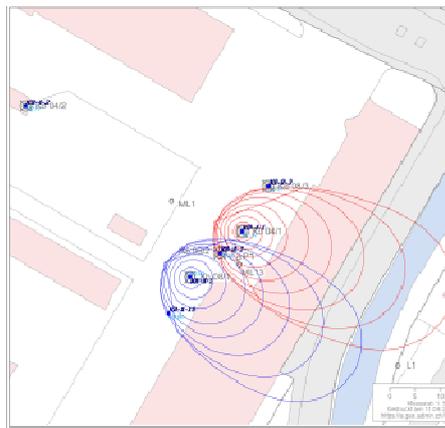


- A gauche: T diminue dans le puits de pompage et augmente au point Kb 08/2.
- A droite: dans le puits de pompage, la conductivité diminue jusqu'à atteindre une valeur constante; au point Kb 08/2, l'évolution va dans le sens contraire.
- Observations seulement possibles avec des sondes à eaux souterraines → **donnent des informations supplémentaires sur les conditions locales de la nappe**

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

43

Site 2: Pour le 1<sup>er</sup> EP, la température et la conductivité électrique évoluent différemment aux points Kb 04/1 et Kb 08/2 en raison de l'augmentation ou de l'absence d'infiltration des eaux de surface par les rives.



T (ES): 12.3 – 12.7 °C  
T (ruisseau): 4.5°C

Cond. (ES): 670 – 700 µS/cm  
Cond. (ruisseau): 570 µS/cm

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet / 24 novembre 2016

44

## Coûts

Total Fr. 80'000.—

Site 1 45'000.—

Site 2 35'000.— (y.c. 1 forage)

## Je remercie



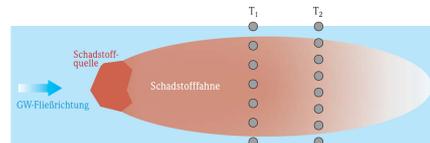
**... Uwe Hekel pour ses conseils et l'évaluation de l'EPI avec le programme C-Set**



**... Irina Przybylski pour les travaux réalisés sur le terrain – même à 2 heures du matin.**



## Bilan 1: Méthode



La méthode par EPI permet :

- La saisie de toutes les données relatives au flux massique de polluants
- La détermination de la charge au moyen d'une méthode directe

Pour une application réussie

- Il est nécessaire d'avoir une connaissance approfondie du site
- Les critères d'application doivent être remplis, en particulier:
  - Concentrations en polluants suffisamment élevées
  - Conditions hydrogéologiques favorables



## Bilan 2: Applicabilité en Suisse

- Les conditions hydrogéologiques en Suisse diffèrent...
  - ... de celles rencontrées dans le Baden-Wurtemberg
    - Les roches meubles du Plateau présentent souvent de forts gradients d'écoulement et des perméabilités élevées
    - Aquifères trop ou pas assez épais
    - Les aquifères fissurés ou karstiques n'entrent à priori pas en ligne de compte
  - **Les critères d'application ne sont souvent pas remplis**
- Ont été relativisés
  - L'importance d'un aquifère homogène (rarement idéal dans le cas des roches meubles)
  - L'importance des variations du niveau de la nappe



### Bilan 3: lessons learned

- On recommande de recourir aux EPI à partir du stade de l'ID
  - Les connaissances concernant le site sont souvent encore insuffisantes au stade de l'investigation préliminaire
  - Mauvais rapport coût-utilité
- Le site idéal n'existe pratiquement pas, et il a été difficile de trouver des sites adéquats pour les projets pilotes
- Réalisation réussie sur deux sites pilotes, obtention de résultats plausibles
- La mise en œuvre des EPI est certes assez complexe, mais les résultats sont robustes et fiables
- Important: évaluation préalable du rapport coût / utilité

24 novembre 2016

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet

49



### Pour finir

- L'analyse de sensibilité montre l'importance de certains paramètres hydrauliques → en tenir compte lors de la planification des essais
  - Il est important de déterminer correctement le coefficient de perméabilité  $K_f$   
(souvent: méthodes de mesure / d'évaluation insuffisantes)



En voici les conséquences:

- **bases erronées**
- **planification des essais et résultats incorrects**
- **évaluation incorrecte**

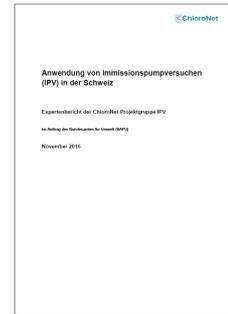
24 novembre 2016

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet

50



## Merci beaucoup!



### Membres du groupe de travail:

- Jürgen Abrecht
  - Gabriele Büring
  - Bettina Flury
  - Daniel Hunkeler
  - Walter Labhart
  - Monika Schwab-Wyssner
  - Uwe Hekel
- GEOTEST AG
  - DP ChloroNet
  - AWEL Zurich (direction)
  - CHYN, Université de Neuchâtel
  - Dr. Heinrich Jäckli AG
  - OFEV, Sols et biotechnologie /  
Gestion du projet ChloroNet
  - HPC AG (expert externe et rédaction  
finale)

24 novembre 2016

9<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet

51