



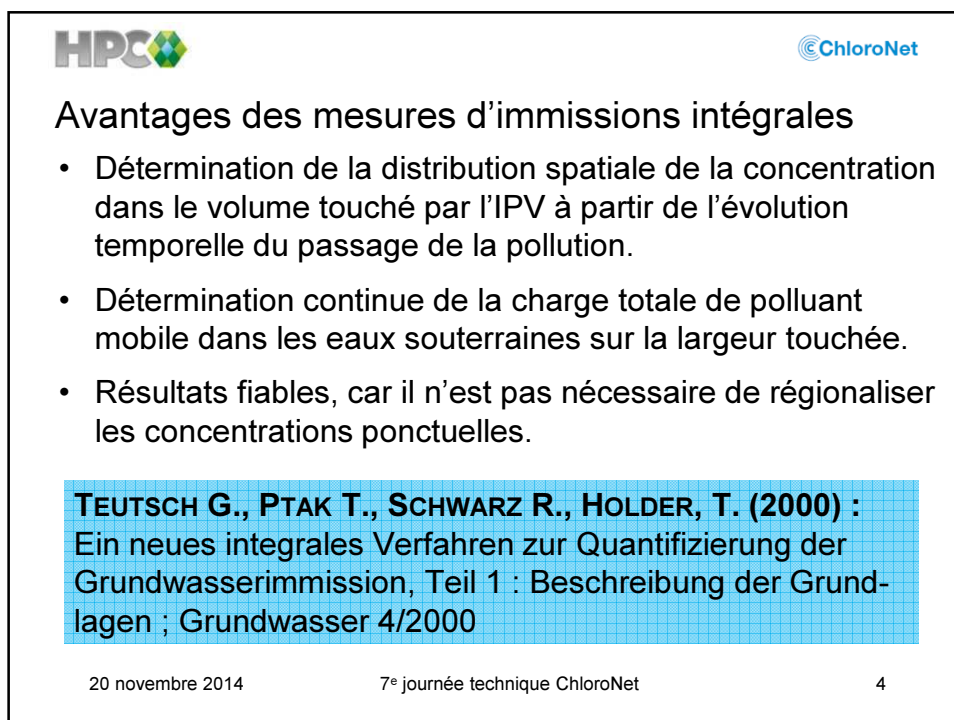
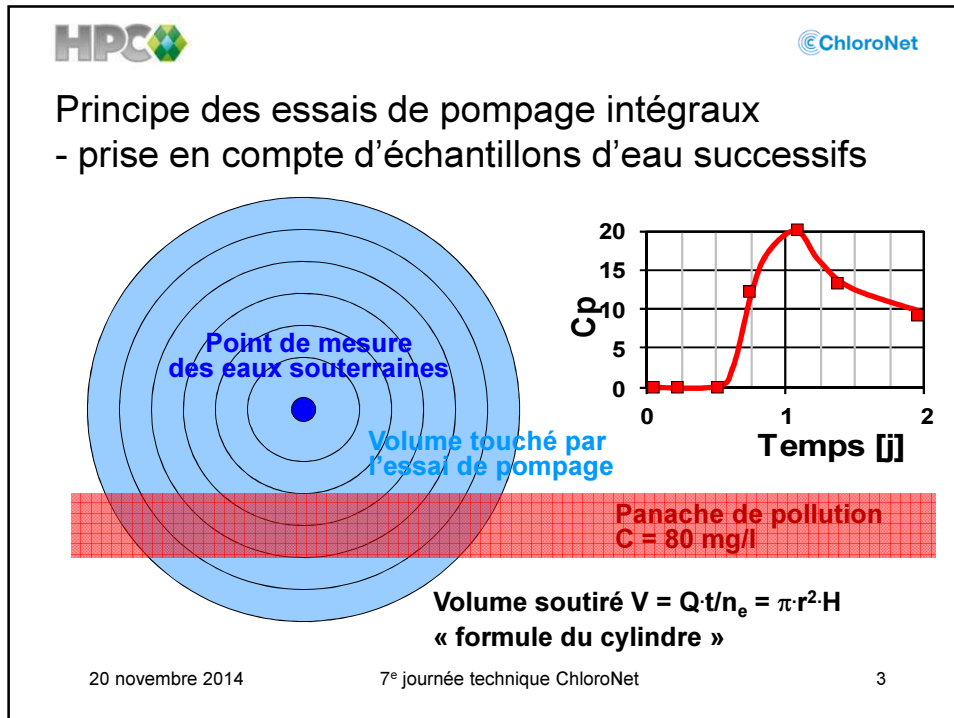
Détermination des immissions et des charges de polluants au moyen d'essais de pompage intégraux – avec le programme C-SET

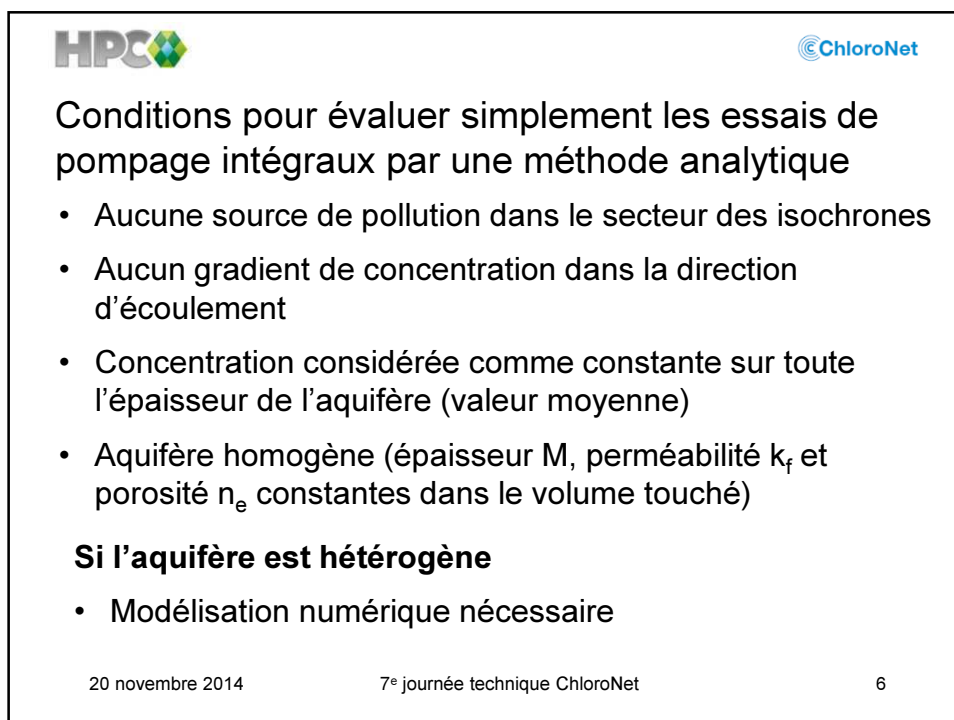
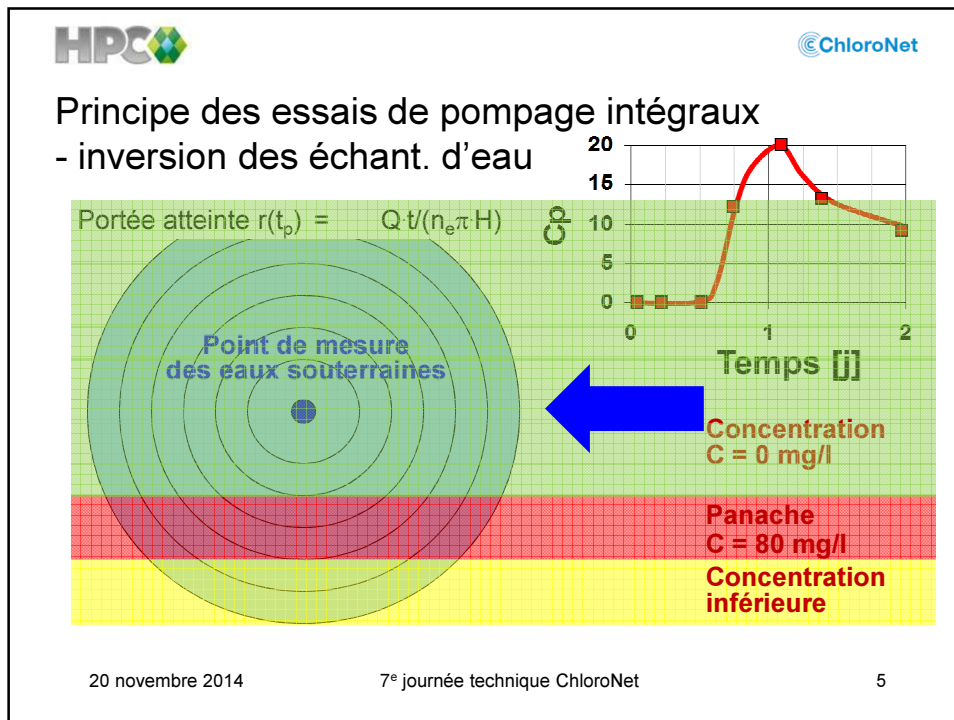
Dr. Uwe Hekel
HPC AG
D-72108 Rottenburg





Sommaire

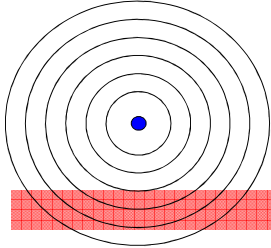
- Introduction au principe des essais de pompage intégraux (Immissionspumpversuchen, IPV)
- Développement d'une méthode de calcul tenant compte des conditions rencontrées dans la pratique, telles qu'écoulement d'eau souterraine, captages voisins, variation du débit de pompage ou interruption du pompage
- Mode de calcul du programme C-SET
- Exemples concrets





Inversion analytique selon la formule du cylindre (TEUTSCH)

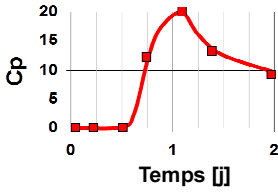


Hypothèses

- Débit prélevé constant
- Aucune influence d'autres pompages
- Écoulement naturel négligeable

=> Isochrones concentriques

Courbe de passage



20 novembre 2014

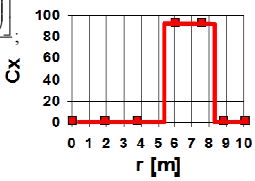
Inversion analytique

$$C_{X_i} = \frac{\pi C p_i - 2 \sum_{k=1}^{i-1} C X_k \left[\arccos\left(\frac{r(t_{k-1})}{r(t_i)}\right) - \arccos\left(\frac{r(t_k)}{r(t_i)}\right) \right]}{2 \arccos\left(\frac{r(t_{i-1})}{r(t_i)}\right)}$$



avec $r(t) = \sqrt{\frac{Q t}{\pi H n_e}}$

7^e journée technique ChloroNet

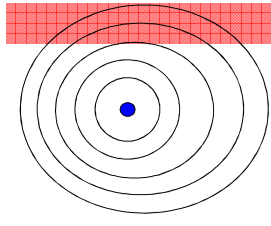
P. ex. sous Excel



7

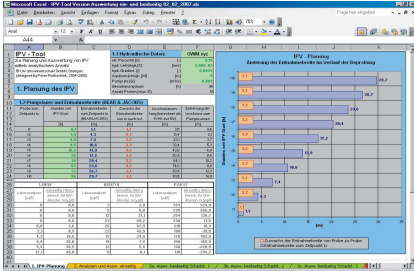
Inversion analytique (IPV-Tool, LU Baden-Württ.)



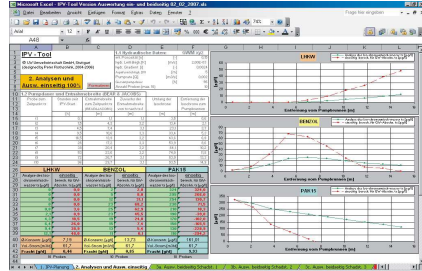
Hypothèses

- Débit prélevé constant
- Aucune influence d'autres pompages
- Écoulement naturel faible (BEAR & JACOBS)
- Augmentation de la largeur du prélèvement cste

=> Isochrones approx. concentriques



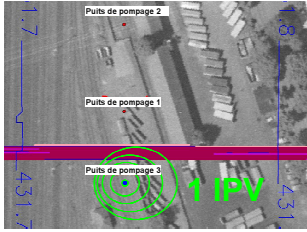
20 novembre 2014



7^e journée technique ChloroNet

HPC **ChloroNet**

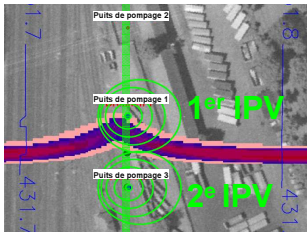
Conditions rencontrées par les IPV dans la pratique



1^{er} IPV

Un essai de pompage intégral ...

... permet de tirer des conclusions au sujet de l'emplacement d'un panache de pollution.



1^{er} IPV
2^e IPV

Mais dans quelle mesure l'emplacement original du panache est-il influencé ...

... lorsque plusieurs essais de pompage intégraux sont pratiqués, par exemple le long d'un plan de contrôle ?

20 novembre 2014
7^e journée technique ChloroNet
9

HPC **ChloroNet**

Conditions rencontrées par les IPV dans la pratique

Influence d'autres puits de pompage

- P. ex. IPV réalisé antérieurement à proximité
- P. ex. plusieurs IPV simultanés
- P. ex. puits d'assainissement ou de pompage d'eau potable à proximité

=> Interactions entre les zones d'alimentation, superposition des panaches



Influence de débits de pompage variables

- P. ex. oscillations du débit, changements de débit nécessaires
- P. ex. arrêt du pompage (pendant la nuit ou le week-end)

Conséquences pour le traitement des sites contaminés

- Interprétation erronée concernant le volume effectivement touché
- Interprétation erronée concernant l'emplacement des panaches
- Interprétation erronée concernant la source des émissions
- Mauvais positionnement des puits d'assainissement

20 novembre 2014
7^e journée technique ChloroNet
10



Mandat

Programmer un outil simple, adapté aux conditions rencontrées dans la pratique (surtout écoulement naturel et facteurs d'influence hydrauliques)

Exigences du LU Baden-Württemberg

- Modèle numérique pas nécessaire
- Outil ne nécessitant aucun programme additionnel
- Fonctionne sous Windows
- Usage aisé
- Oriente clairement l'utilisateur
- Intercepte les données entrées erronées
- Recherche automatique de solutions
- Exportation des résultats au format pdf et GIS
- Manuel d'utilisation

20 novembre 2014
7^e journée technique ChloroNet
11

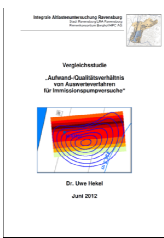
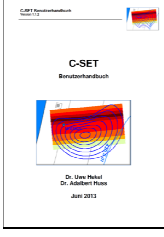
Résultats

- Développement de l'outil C-SET dans le cadre du projet « Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg » afin d'évaluer environ 50 IPV
- Validation de C-SET par une étude comparative

HEKEL U. (2012) : Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg – Vergleichsstudie Aufwand-/Qualitätsverhältnis von Auswerteverfahren für Immissionspumpversuche. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe

www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de
- Mise à disposition de l'outil C-SET avec son manuel sur le site du LUBW (en 2013) :

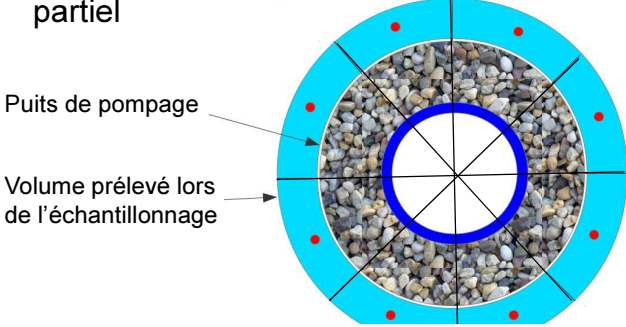
www.lubw.baden-wuerttemberg.de -> Altlasten -> Anwendungsprogramme

20 novembre 2014
7^e journée technique ChloroNet
12

HPC **ChloroNet**

Principe de C-SET : des particules remplacent un volume partiel

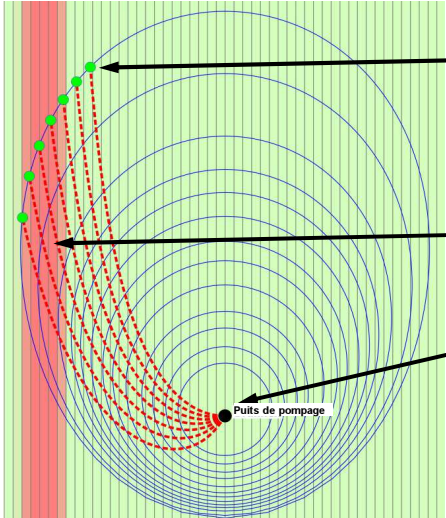


- Le volume prélevé lors de l'échantillonnage est subdivisé en secteurs de même taille
- Chaque volume partiel est remplacé par une particule
- Chaque particule représente une part similaire du volume prélevé
- Chaque particule représente la pollution des eaux souterraines dans sa position avant la mise en œuvre de la mesure hydraulique

20 novembre 2014 7^e journée technique ChloroNet 13

HPC **ChloroNet**

Principe de C-SET : réponse à deux questions essentielles



1. Où se trouvait une particule au début de l'IPV ? (position initiale des particules)
2. Quelle distribution de la concentration dans l'aquifère est corrélée avec la courbe de concentration mesurée lors de l'IPV ?

20 novembre 2014 7^e journée technique ChloroNet 14

HPC **ChloroNet**

1. Q : Où se trouvait une particule au début de l'IPV ?

Solution : Superposition de tous les mouvements de particules pendant un pas de temps infinitésimal Δt

Exemple : IPV dans le puits 1, influence de l'écoulement naturel et du puits 2

$\Delta r_1 = r_1 - \sqrt{r_1^2 - \frac{Q \cdot \Delta t}{\pi H n_e}}$
 $\Delta r_x = \frac{k_f \cdot i \cdot \Delta t}{n_e}$
 $\Delta r_2 = r_2 - \sqrt{r_2^2 - \frac{Q \cdot \Delta t}{\pi H n_e}}$
 $\Delta r = \Delta r_1 + \Delta r_x + \Delta r_2$

20 novembre 2014 7^e journée technique ChloroNet 15

HPC **ChloroNet**

1. Q : Où se trouvait une particule au début de l'IPV ?

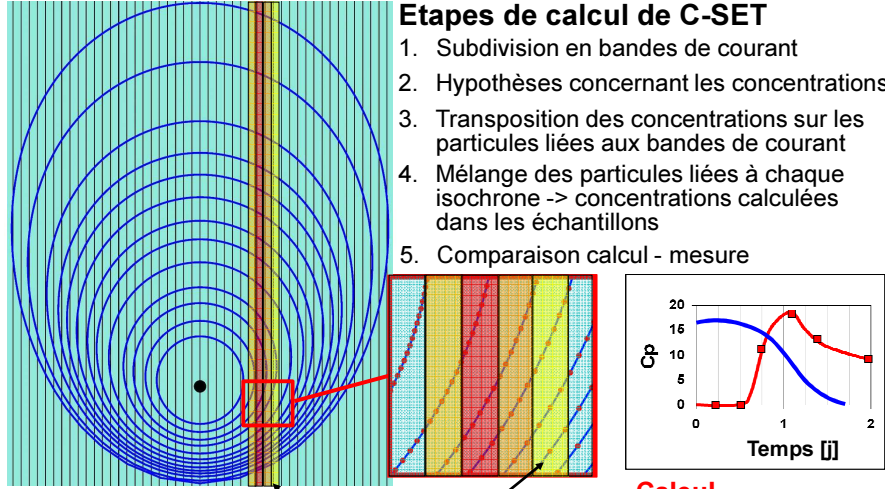
Résultat
Les isochrones définissent la position initiale des particules contenues dans un échantillon

Puits Particule

20 novembre 2014 7^e journée technique ChloroNet 16

HPC **ChloroNet**

2. Q : « Quelle distribution de la concentration dans l'aquifère est corrélée avec la courbe de concentration mesurée lors de l'IPV ? »



Etapes de calcul de C-SET

1. Subdivision en bandes de courant
2. Hypothèses concernant les concentrations
3. Transposition des concentrations sur les particules liées aux bandes de courant
4. Mélange des particules liées à chaque isochrone -> concentrations calculées dans les échantillons
5. Comparaison calcul - mesure

20 novembre 2014 Bandes de courant **Calcul** **Mesure** 17

HPC **ChloroNet**



2. Q : « Quelle distribution de la concentration dans l'aquifère est corrélée avec la courbe de concentration mesurée lors de l'IPV ? »

Automatisation de l'adaptation par itération entre calcul et mesure

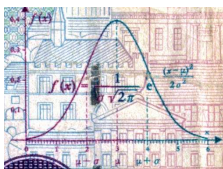
- La propagation de la pollution est soumise à la dispersion hydrodynamique
- Cette dispersion génère une distribution aléatoire qui peut être décrite à l'aide d'une distribution normale gaussienne :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

20 novembre 2014 7^e journée technique ChloroNet 18

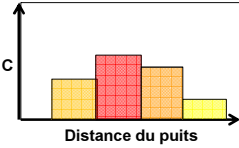



2. Q : « Quelle distribution de la concentration dans l'aquifère est corrélée avec la courbe de concentration mesurée lors de l'IPV ? »



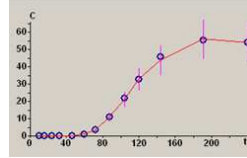
Il suffit alors de faire varier quatre paramètres de la courbe lors de l'adaptation par itération :

- Distance entre l'axe du/des panache(s) et le puits
- Concentration maximale dans le(s) panache(s)
- Largeur du/des panache(s)
- Ampleur de la dispersion





Résultat

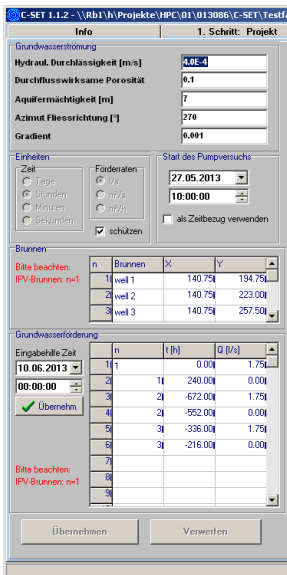
- Obtention assez rapide d'une distribution de la concentration qui présente une très bonne coïncidence entre les valeurs calculées et effectivement mesurées lors de l'IPV



20 novembre 2014
7^e journée technique ChloroNet
19






C-SET – Données d'entrée



- Données du projet (désignation)
- Paramètres de l'aquifère (k_f , n_e , M , i)
- Coordonnées du puits de pompage
- Débits pompés au puits
- Concentration dans les échantillons
- Paramètres de l'adaptation au panache

7^e journée technique ChloroNet
20

C-SET – Données de sortie

IPV-Apparatur
C-SET

Grundwasser AG
Dr. Mauer

Integrale Altlastenerkundung Ravensburg
Kontrollebene 3
IGW 21

Grundwasserströmung
Hydraul. Durchlässigkeit: 8.1E-04 m/s
Durchflussrate, Permeabilität: 0.1
Aufwandsleistung: 0.7 m
Anzahl Piezometer: 103
Gradient: 0.000229

Ergebnisse
Maximale Konzentration: 151.408 µg/l
Mittlere Konzentration: 28.886 µg/l
Erreichte Abstromtiefe: 40.00 m
Vollstromtiefe: 19.745 m (µl)
Fracht: 0.51005 g/s

Brünnen

Brünnen	X	Y
1	107.0021	0.00
2		
3		
4		
5		

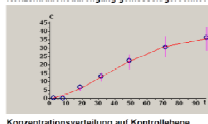
Grundwasserförderung

Brünnen	Q _g	Q _g [l/s]	Q _g [m³/d]
1	1	0.00	0.00
2	1	96.90	0.00
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			

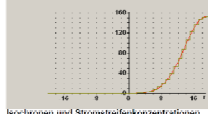
Konzentrationen

Brünnen	Q _g	Konzentration [µg/l]
1	2.20	3.4
2	2.82	0
3	18.12	6.7
4	18.49	13.0
5	48.01	20.5
6	14.22	30.7
7	85.17	38.3
8		
9		
10		
11		
12		

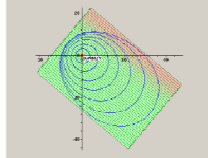
Konzentrationsverteilung auf Kontrollebene



Konzentrationsverteilung auf Kontrollebene



isochronen und Störstreifenkonzentrationen





- Données du projet et de l'essai
- Isochrones
- Distribution de la concentration
- Charge de polluant

Sous la forme de

- Fichier au format shp
- Tableaux Excel
- Rapport au format pdf

technique ChloroNet 21

Comparaison entre outils de planification / interprétation des IPV

IPV-Tool (LUBW)	C-SET (LUBW)	Modèles numériques
Outil simple	Outil simple	Outils complexes
Inversion basée sur une formule	Superposition de mouvements de particules	
<ul style="list-style-type: none"> • Écoulement naturel faible pris en compte • Aucune influence hydraulique admise • Solution seulement pour des panaches de certaines formes 	<ul style="list-style-type: none"> • Écoulement naturel pris en compte • Avec influences hydrauliques (autres puits, débits variables) • Panaches de forme quelconque 	<ul style="list-style-type: none"> • Hétérogénéités admises • Écoulement naturel pris en compte • Avec influences hydrauliques (autres puits, débits variables) • Panaches de forme quelconque
Travail modeste	Travail modeste	Grand travail
Trop simplificateur	Adapté à la pratique	Très exigeants
Faible qualité	Bonne qualité	Très bonne qualité

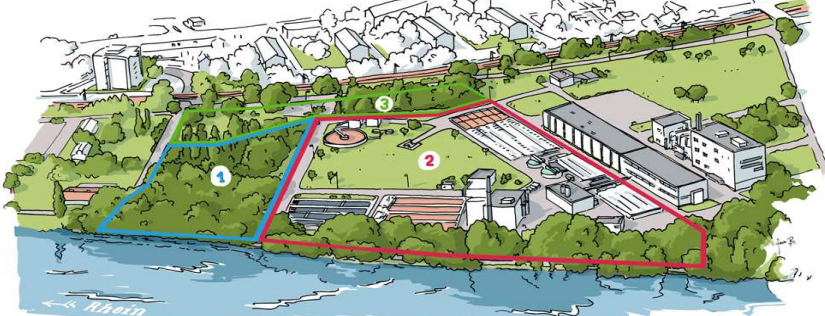
HPC **ChloroNet**

Exemple : Investigation de la fouille Kessler à Grenzach-Wyhlen

Mandant : Roche Pharma AG

Mandat : Étude de la situation hydrogéologique
Étude de la propagation de la pollution
Concept de rétention de l'eau pendant l'ouverture de la fouille destinée à l'assainissement

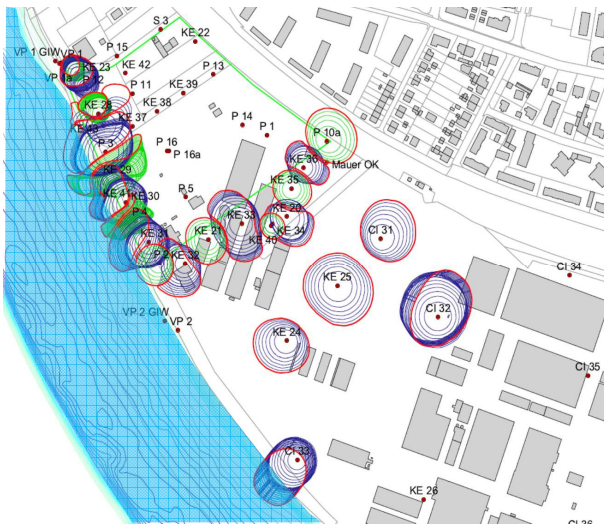
Coût: Investigation : env. 4 mio €, assainissement : env. 239 mio €



20 novembre 2014 7^e journée technique ChloroNet 23

HPC **ChloroNet**

Investigation de la fouille Kessler à Grenzach-Wyhlen

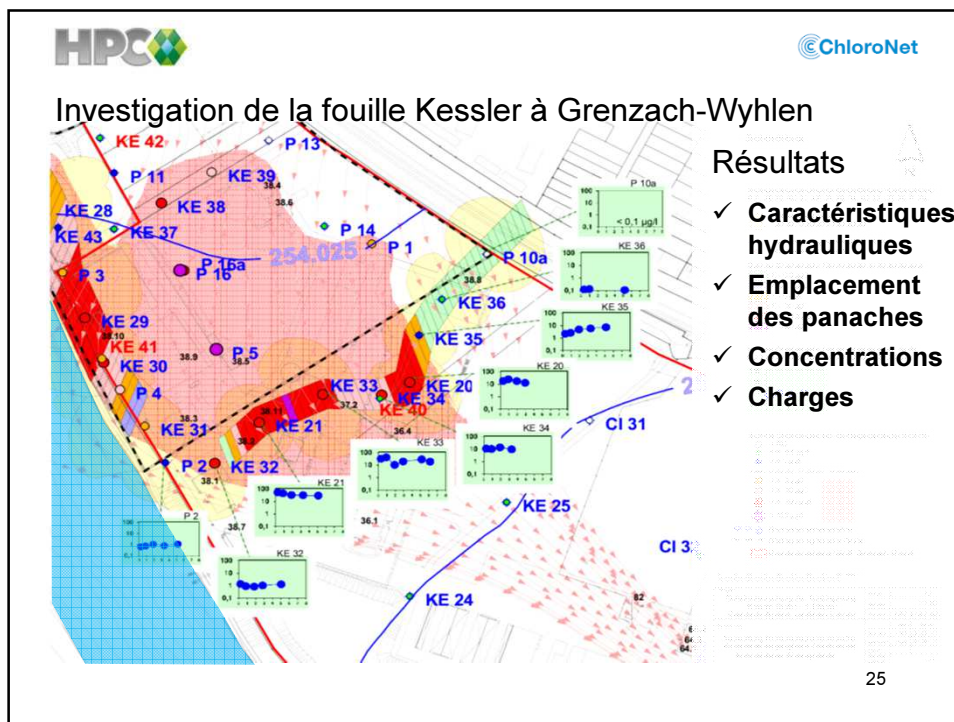


Env. 50 forages et 50 points de mesure des eaux souterraines

30 IPV d'une semaine pendant 8 semaines ?

- **Aucune pause entre les IPV**
- **4 IPV simultanés**
- **Interactions fortes**

20 novembre 2014 7^e journée technique ChloroNet 24



Exemple : Investigation intégrale d'un site contaminé à Ravensburg

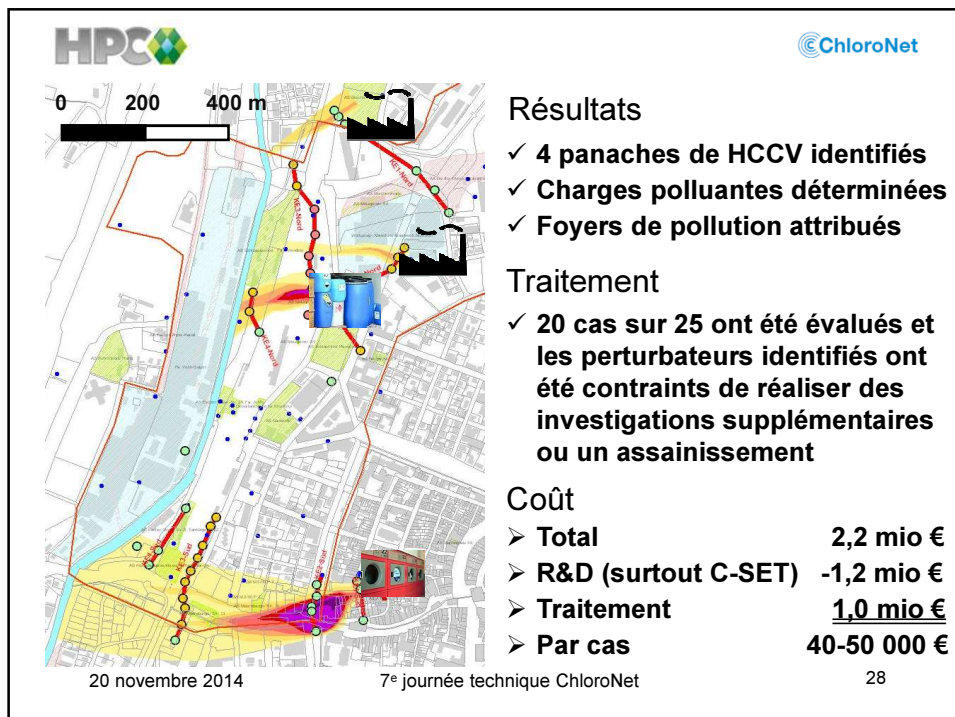
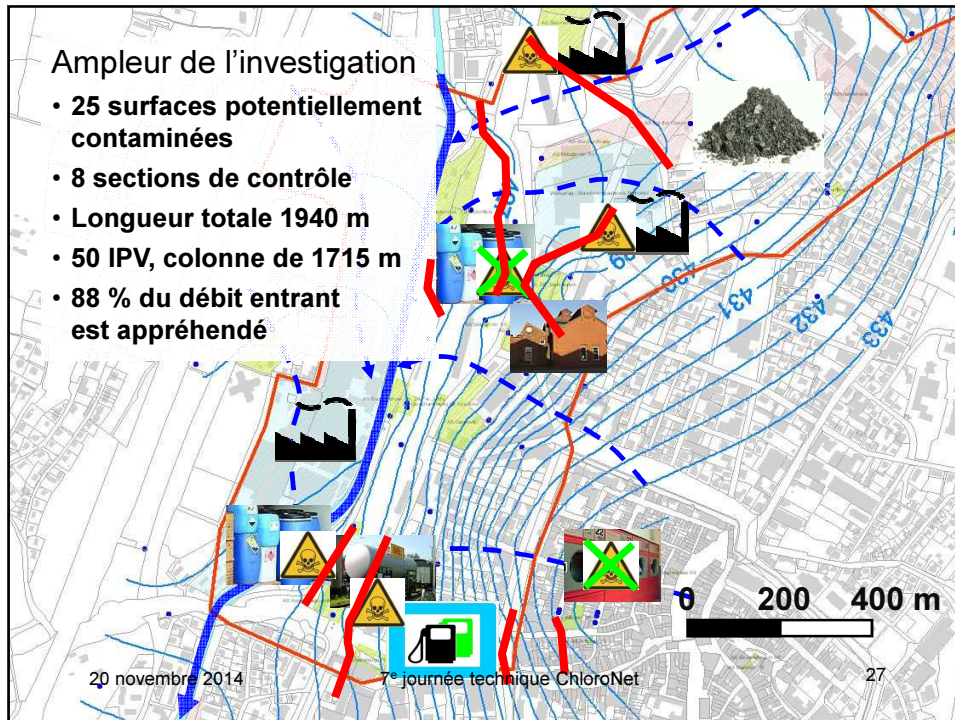
Mandat : Ville de Ravensburg
Traitement : 2003-2013
Superficie : 1 km²
Aquifère : Dépôts de gravier et cônes d'alluvions
Épaisseur : 1-6 m, typiquement 4 m

Pollution : Industries, sites désaffectés et anciennes décharges, 25 surfaces potentiellement contaminées enchevêtrées

Buts du projet :

- Délimiter les panaches de pollution
- Attribuer les panaches aux foyers de pollution respectifs
- Évaluer les surfaces potentiellement contaminées

20 novembre 2014 7^e journée technique ChloroNet 26






<p style="font-size: small;">C-SET Benutzerhandbuch Version 1.1.2</p> <p style="text-align: center;">C-SET Benutzerhandbuch</p>  <p style="font-size: x-small; text-align: center;">Dr. Uwe Hekel Dr. Adalbert Huss Juni 2013</p>	<p style="font-size: x-small;">Integrierte Altlastuntersuchung Baden-Württemberg 2008 Baden-Württemberg, 2010 Baden-Württemberg Planungsamt Stuttgart, 2010</p> <p style="text-align: center;">Vergleichsstudie „Aufwand-/Qualitätsverhältnis von Auswerteverfahren für Immissionspumpversuche“</p>  <p style="font-size: x-small; text-align: center;">Dr. Uwe Hekel Juni 2012</p>	<p style="font-size: x-small;">Integrierte Altlastuntersuchung Baden-Württemberg 2008 Baden-Württemberg, 2010 Baden-Württemberg Planungsamt Stuttgart, 2010</p> <p style="text-align: center;">Strategie und Methoden einer integralen Untersuchung flacher Porengrundwasserleiter im urbanen Raum</p>  <p style="font-size: x-small; text-align: center;">April 2014</p>	<p style="font-size: x-small;">Schriftenreihe altlastenforum Baden-Württemberg e. V. Flächenregulierung, Boden- und Grundwasserchutz Heft 16</p>  <p style="text-align: center;">Grundwasserabstromerkundung mittels Immissionspumpversuchen</p> <p style="font-size: x-small;">In Kommission: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Hilgert u. Obermiller - Stuttgart)</p>
---	--	---	--

www.lubw.baden-wuerttemberg.de

-> Altlasten -> Anwendungsprogramme -> C-SET

www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de

- Étude comparative : méthodes d'évaluation d'essais de pompage intégraux
- Rapport : stratégie et méthodes d'investigation intégrales

Série **altlastenforum** du Baden-Württemberg (cahier 16) :

- Investigation des eaux souterraines à l'aide d'essais de pompage intégraux

20 novembre 2014
7^e journée technique ChloroNet
29