

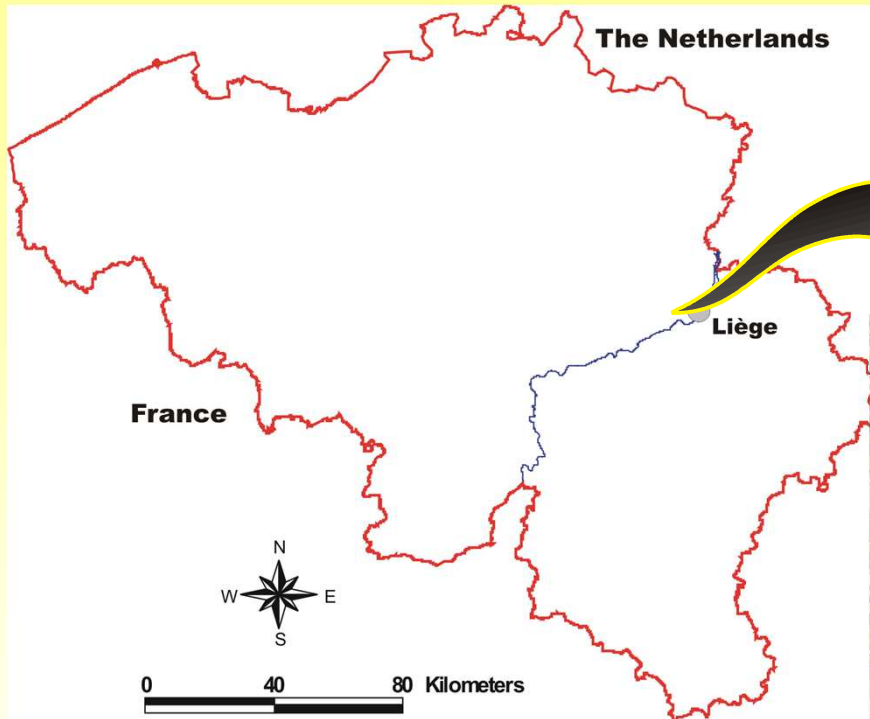
Exemple d'étude hydrogéologique d'un système rivière - aquifère: *Flémalle test site* (Belgique)

Unité d'Hydrogéologie
Université de Liège
BELGIQUE

Ir. Jordi BATLLE AGUILAR
Doctorant
jbattle@ulg.ac.be

Dr. Ir. Serge BROUYÈRE
Directeur de thèse
Serge.Brouyere@ulg.ac.be

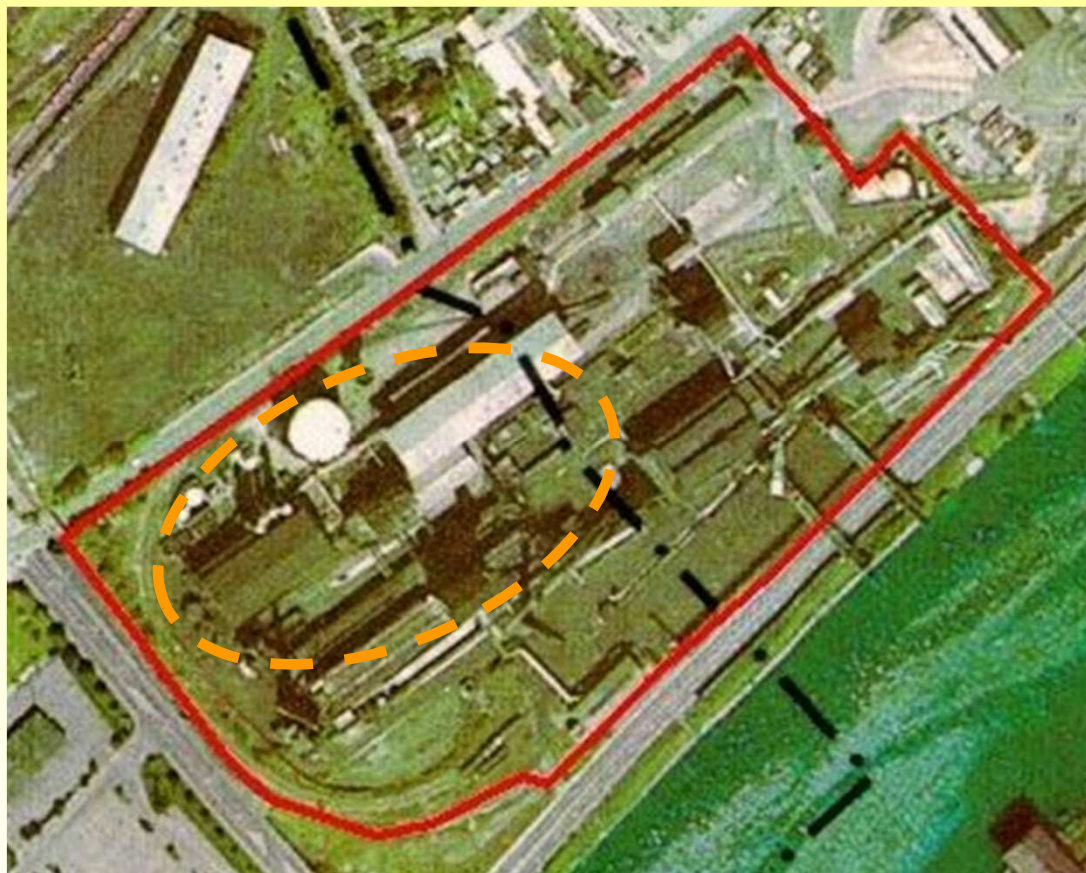
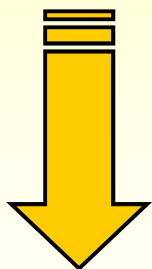
1. Où se trouve le site de Flémalle?



- En amont de la ville de Liège,
- rive gauche,
- 30 m de la Meuse,
- zone urbaine – industrielle,
- site nommé orphelin.

2. Historique du site

- Activité industrielle commence en 1922,
- usine à production de coke pendant 62 ans,
- arrête en 1984.



- forte contamination dans les sol et dans la nappe aquifère,
- HAPs, BTEX, huiles minérales, cyanures, sulfates et métaux lourds,
- localisation des contaminants en fonction des différentes installations industrielles.

3. Études préalables

- Depuis 1992, il y a eu 6 études de caractérisation du site,
- dernier étude en mars - avril 2005.



- nombreux puits et piézomètres sont toujours sur place et en bon état,
- 41 piézomètre superficiels (~ 8 m de profondeur),
- 44 piézomètres profonds (~ 14 m de profondeur).

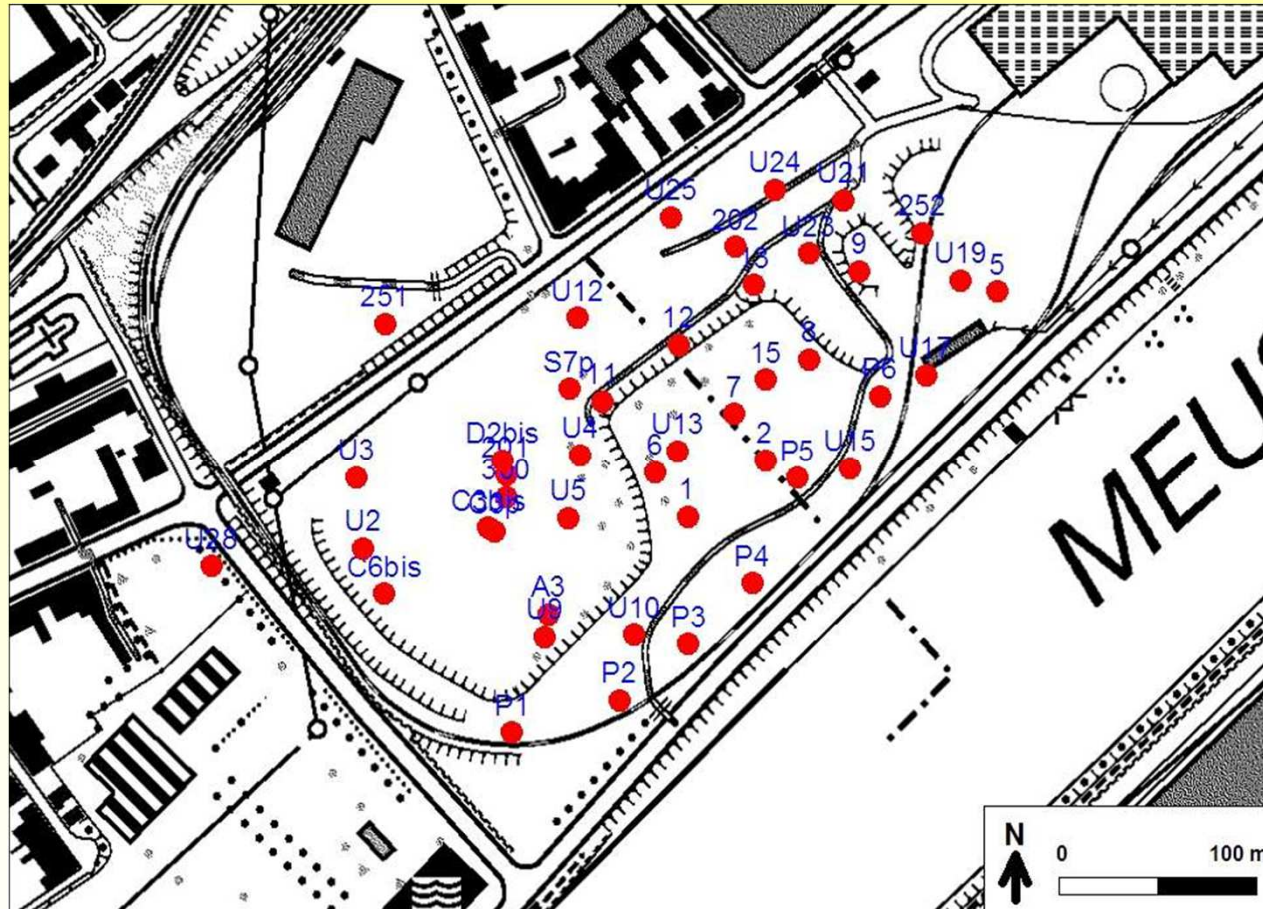


...pourtant...

- Absence d'un suivi piézométrique au cours du temps,
- méconnaissance de la direction d'écoulement de la nappe, du gradient...
- absence de tests hydrogéologiques (notamment essais de pompage),
- méconnaissance de l'ordre de grandeur de K, T et S.

4. Équipement hydrogéologique

Localisation des 44 puits et piézomètres profonds

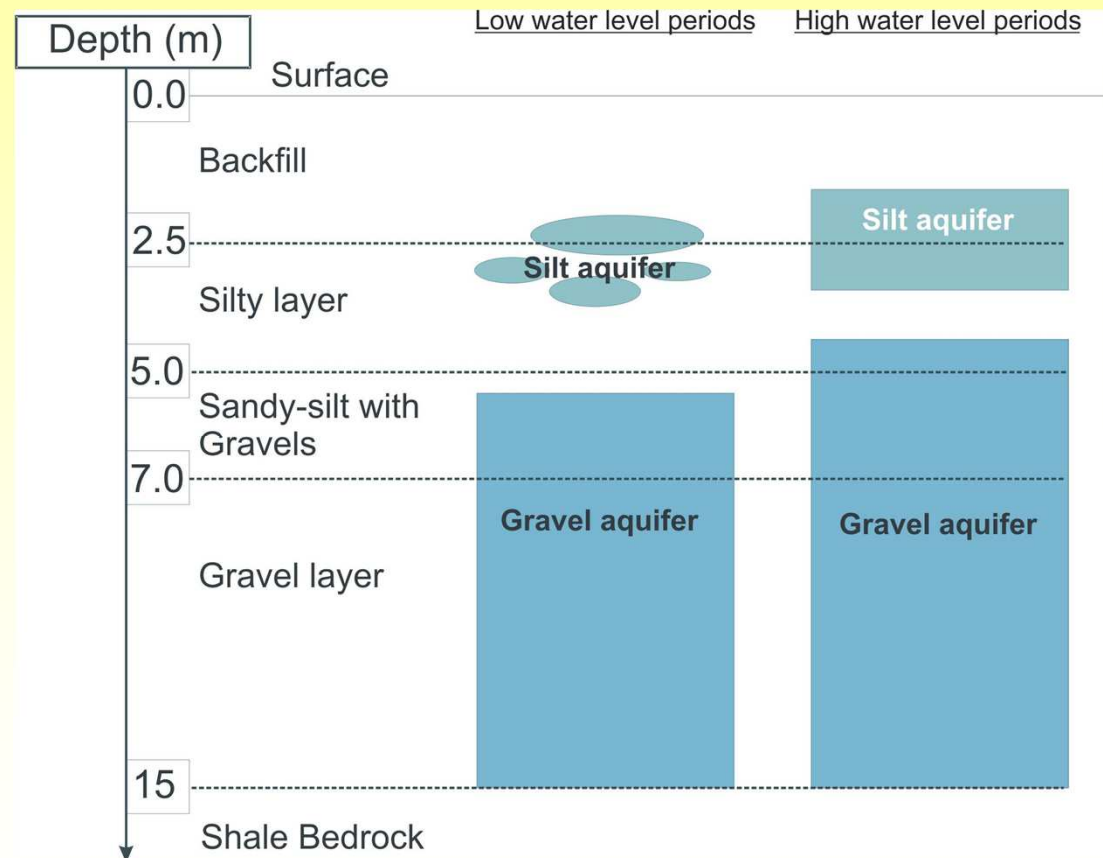


A tenir en compte lors de la planification des essais de terrain: 3 diamètres différents parmi les 44 puits (5, 10 et 15 cm)

5. L'aquifère alluvial

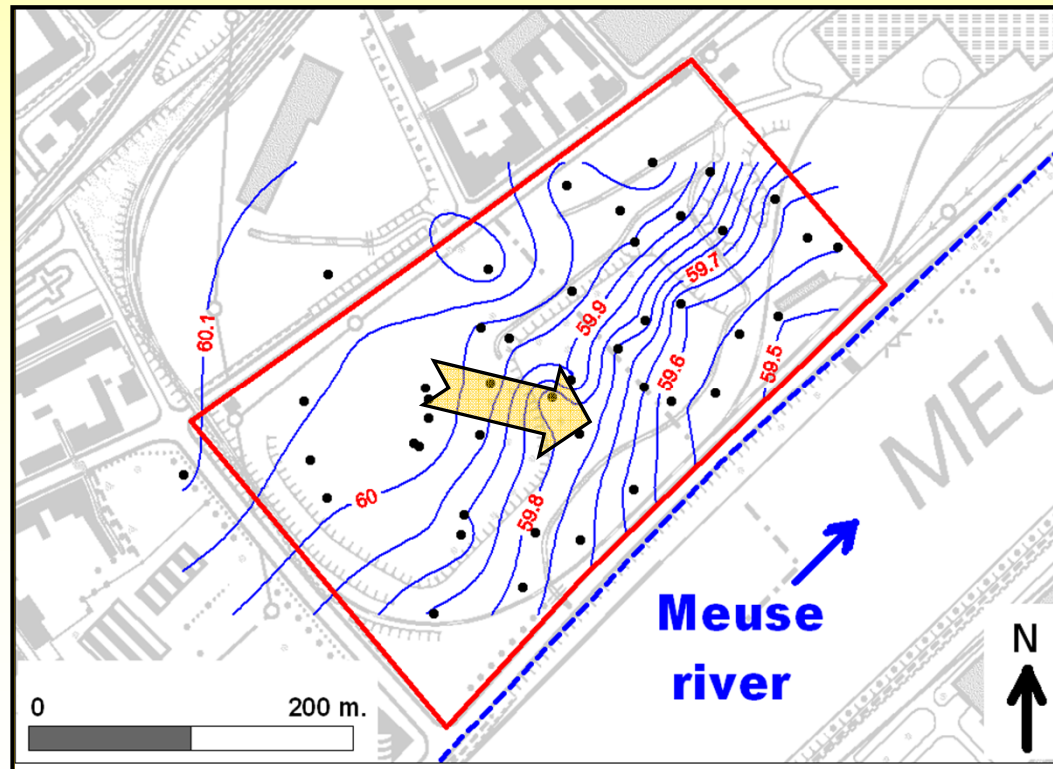
En grandes lignes, la géologie du site, de haut en bas, et formé par:

- 0 – 2.5 m, remblais de différents origines (briques, cendres...),
- 2.5 – 5.0 m couche sableuse – limoneuse,
- 5.0 - 7.0 m couche sableuse – graveleuse,
- 7.0 – 15.0 m graviers alluviaux,
- > 15.0 m schiste carbonifère bedrock.



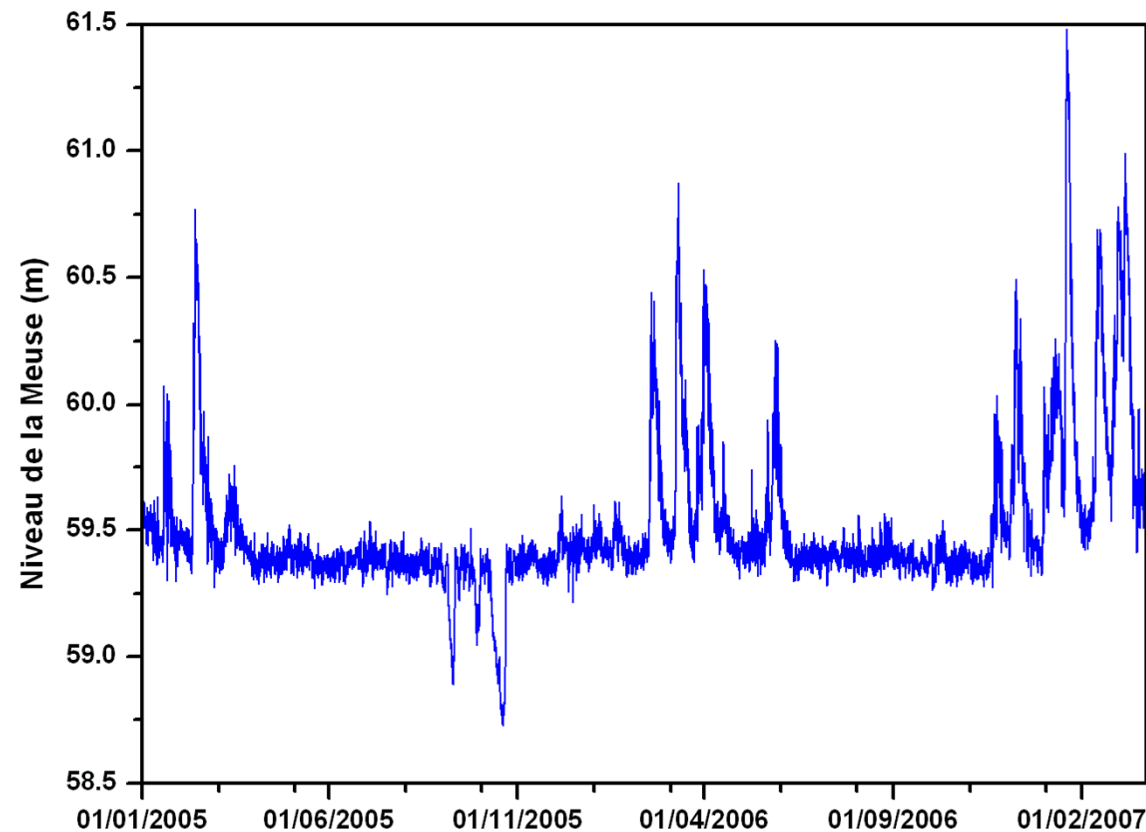
6. Suivi piézométrique

- 14 campagnes de mesure piézométrique depuis février 2005,
- la dernière a eu lieu en Décembre 2006,
- direction d'écoulement NW-SE, vers la Meuse,
- faible gradient hydraulique ($\sim 2\text{‰}$).



7. Monitoring en continue (I). Meuse, aquifère et pluie

- La Meuse est suivi avec un pas de temps horaire par une centrale TGV (Turbine Gaz-Vapeur) électrique,
- niveau, débit et température,
- début 2005.



7. Monitoring en continue (II). Meuse, aquifère et pluie

Depuis juin 2005, le niveau est contrôlée aussi avec un pas de temps d'1 heure à plusieurs puits, à l'aide des sondes automatiques (Minitroll®) .

Le critère de sélection des puits à contrôler se fait principalement en fonction de:

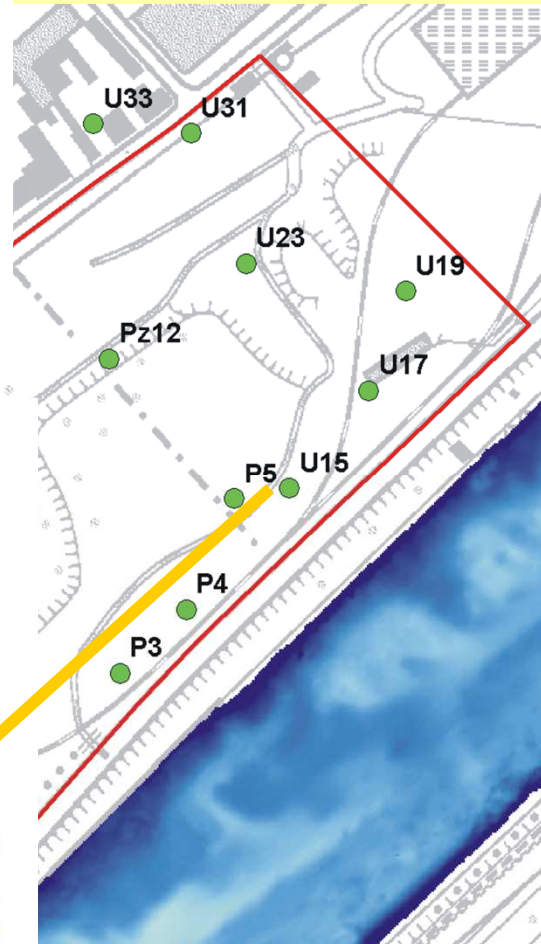
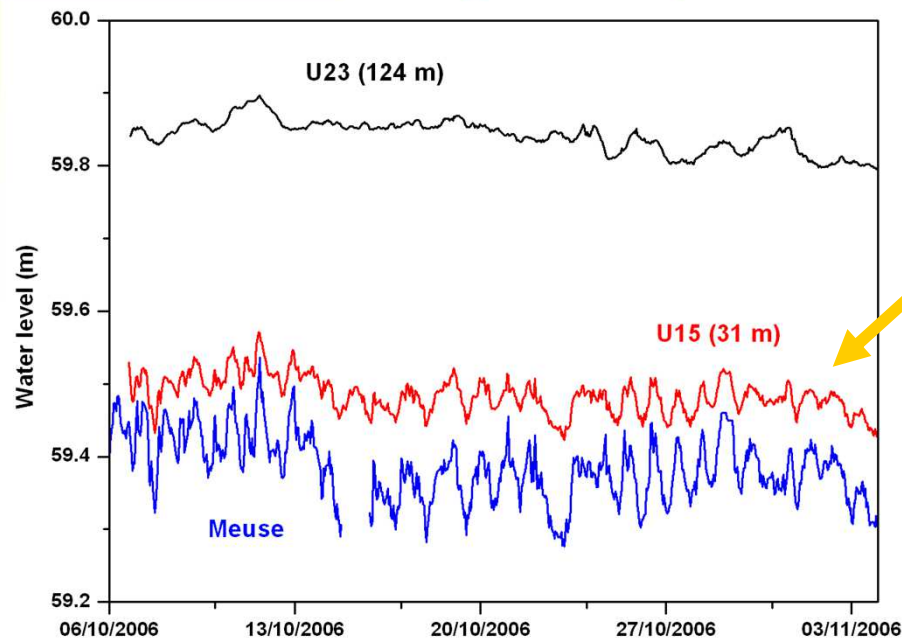
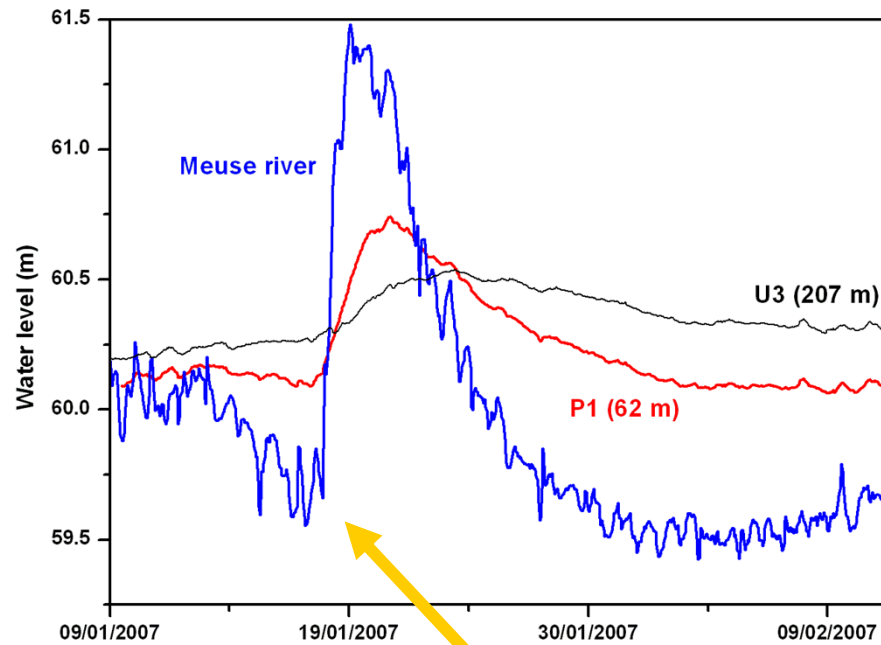
- distance du puits à la Meuse,
- obtenir une distribution spatiale telle qui couvre tout le site.



Sonde piézométrique automatique (Minitroll®)

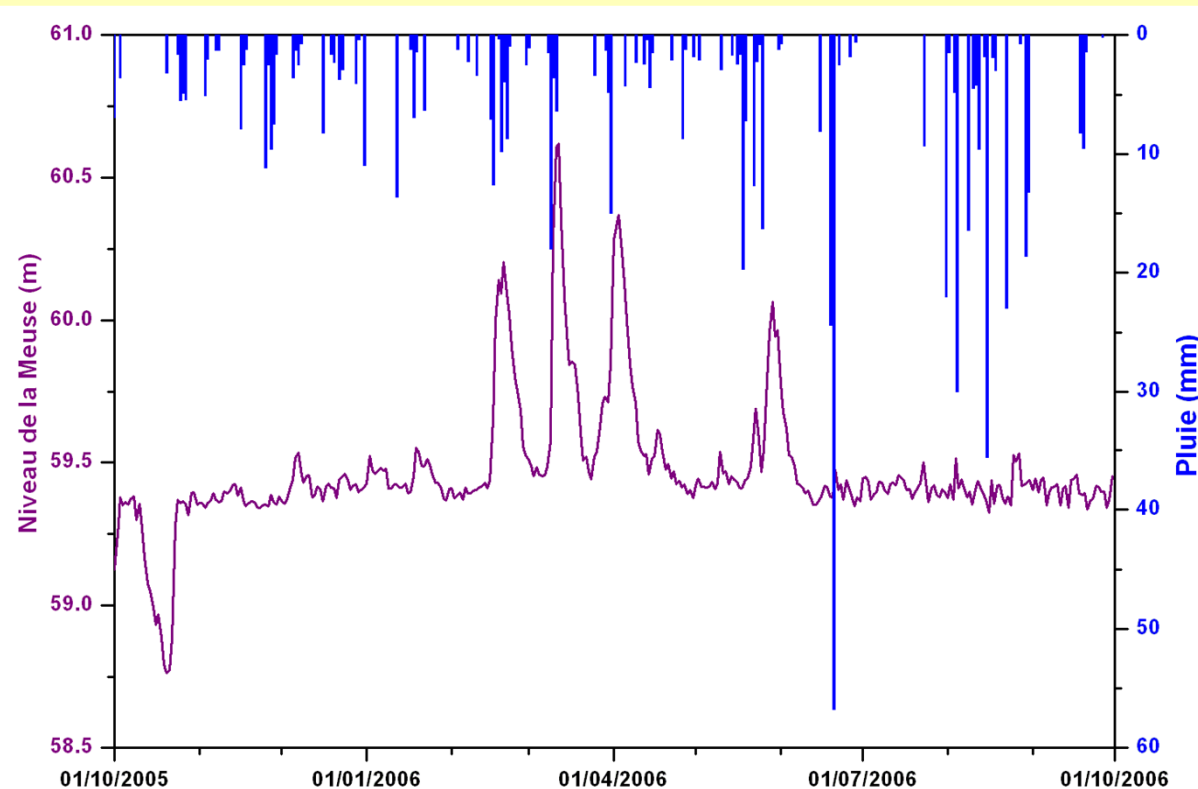
7. Monitoring en continue (III). Meuse, aquifère et pluie

des Minitroll® jusqu'à présent.



7. Monitoring en continue (IV). Meuse, aquifère et pluie

Depuis janvier 2005, enregistrements pluvieux horaires sont obtenus des stations météorologiques de Bierset (6 Km au sud-est), Sart Tilman (4.4 km au nord-ouest) et le pont barrage d'Ivoz-Ramet (1km en amont du site).

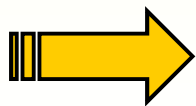
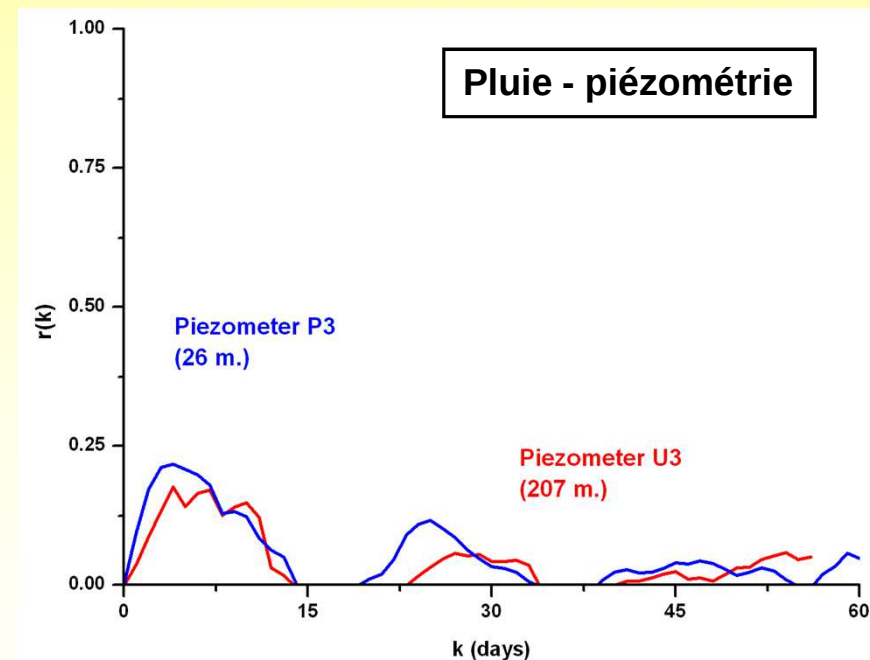
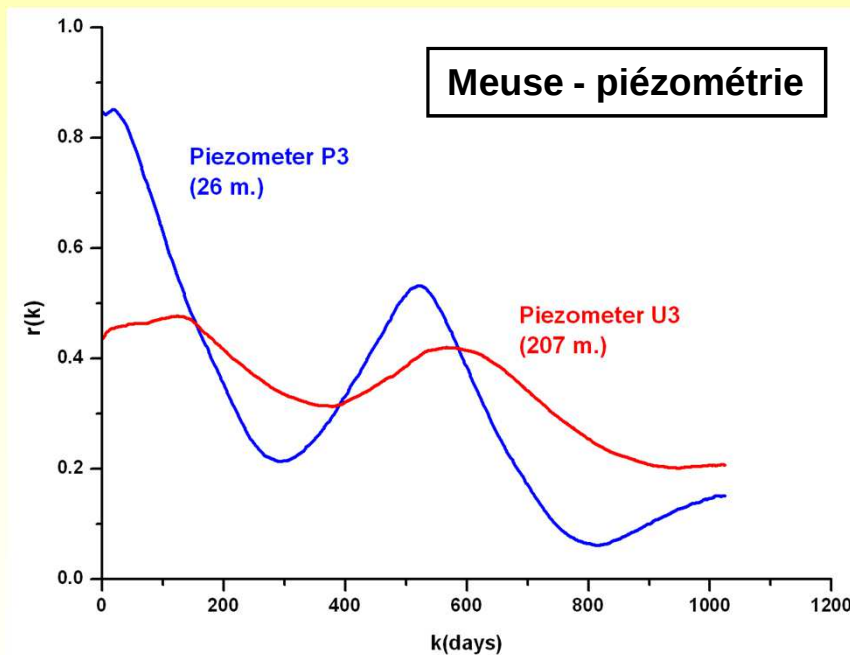


Les stations de Bierset et Sart Tilman finalement n'ont pas été tenus en compte car leur registres sont plus élevés en étant au sommet de la vallée de la Meuse

8. Analyse des données temporelles

Analyse corrélatoire entre:

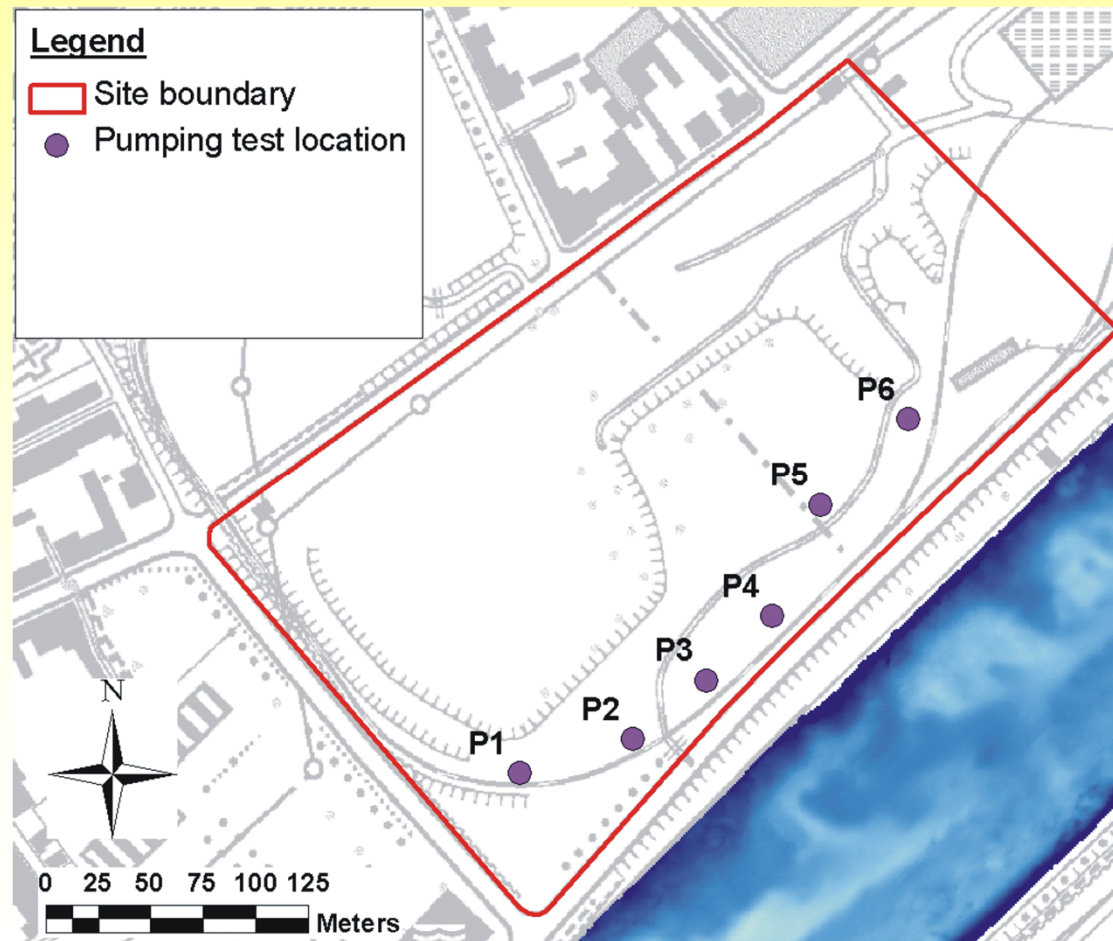
- pluie (entrée) et hauteur d'eau souterraine (sortie),
- pluie (entrée) et hauteur d'eau de la Meuse (sortie),
- hauteur d'eau de la Meuse (entrée) et hauteur d'eau souterraine (sortie).



Le niveau d'eau souterraine est principalement contrôlé par les variations de niveau de la rivière

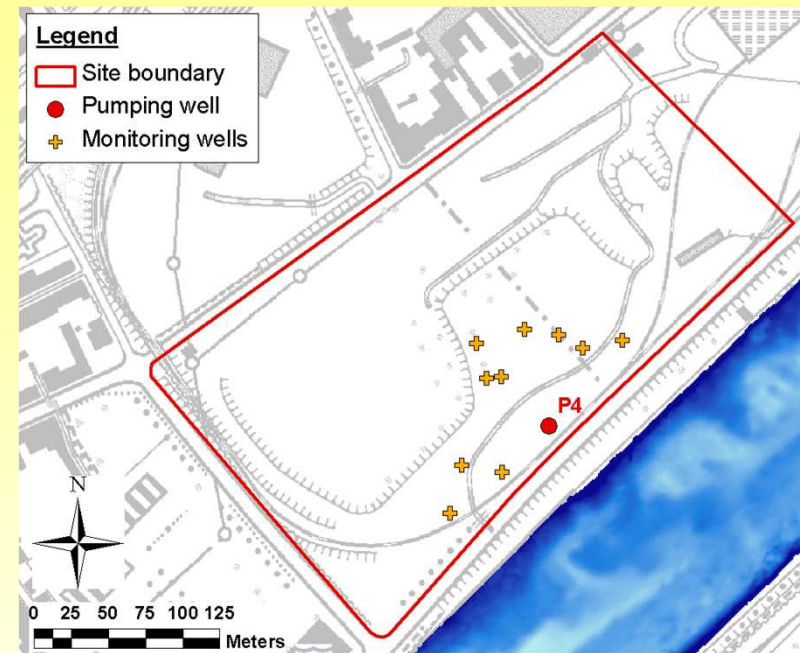
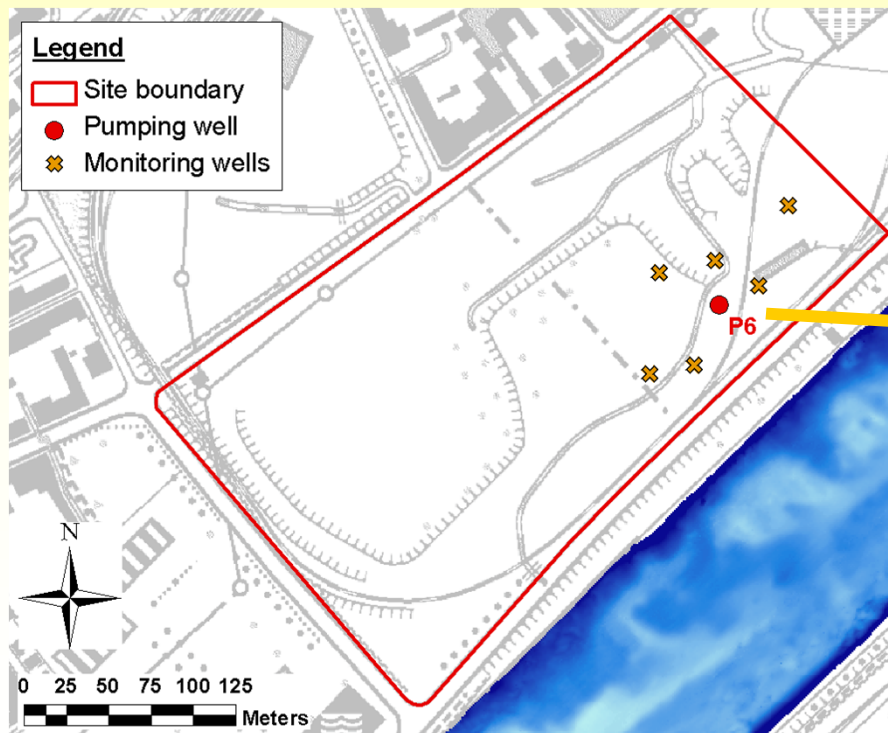
9. Essais de pompage (I)

Des essais de pompage de longue durée et par paliers on étés menés dans une ligne de puits situés au bord Meuse du site

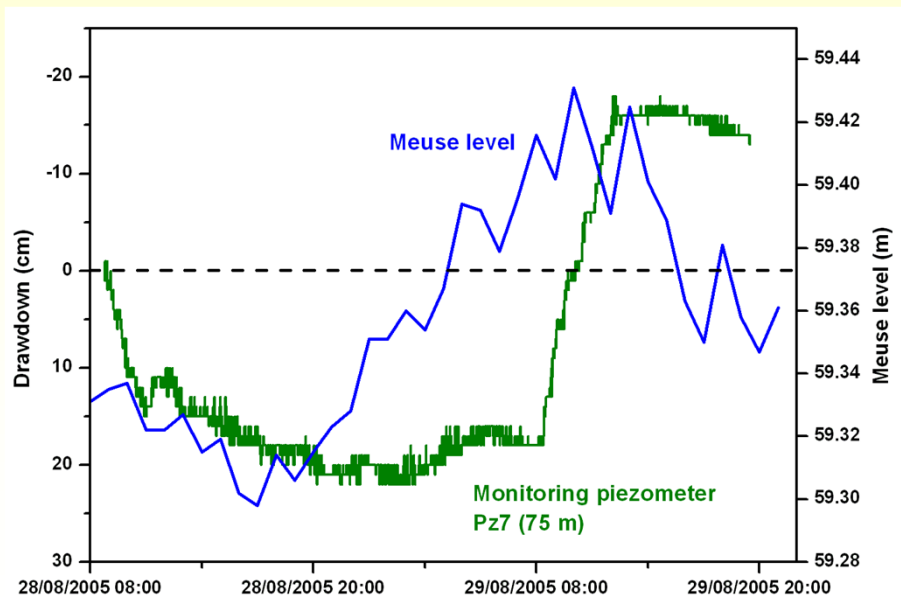
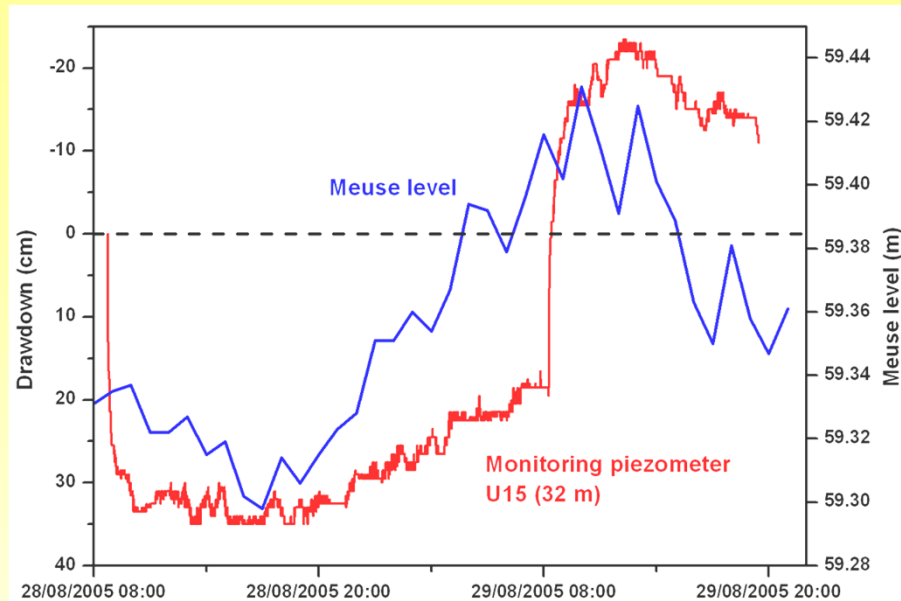


9. Essais de pompage (II)

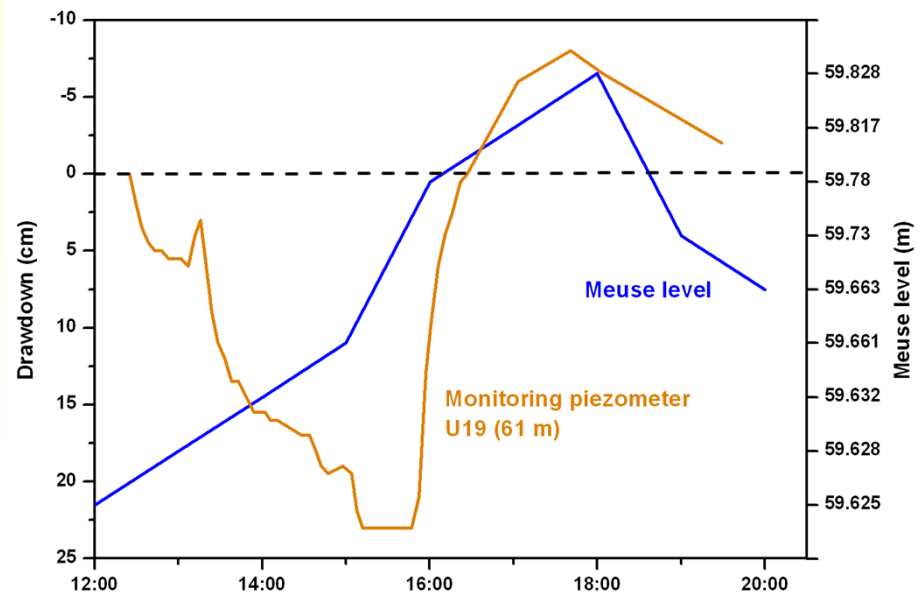
Lors de chaque essai de pompage, entre 6 et 10 piézomètres on été monitorés (Minitrolls® et manuellement) pour contrôler le rabattement et remontée correspondantes.



9. Essais de pompage (III)



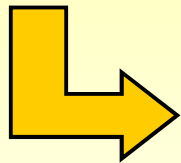
Lors de la phase de remontée, le niveau initial d'eau souterraine fut surpassé à plusieurs piézomètres. Variations du niveau de la Meuse sont à l'origine de cet effet.



9. Essais de pompage (IV)

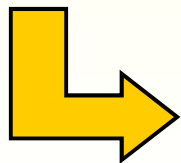
- Valeurs de perméabilité hydraulique entre 1×10^{-3} et $5 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$,
- K plus faible qu'attendu pour un aquifère alluvial graveleux,
- forte hétérogénéité spatiale.

L'aquifère est très sensible aux changements de niveau de la Meuse



Corroboration des résultats obtenus lors des analyses crosse-corrélatoires entre les niveaux d'eau souterraine et la Meuse

Dû à des contraintes pratiques, aucun essai de pompage plus éloigné de la Meuse n'a pas pu être dû à terme. En revanche, des essais d'infiltration (slug tests) ont été effectués.

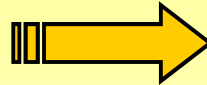


Valeurs de K entre 1.4×10^{-4} et $1.2 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

10. Essais de traçage (I). Radial convergent

2 méthodes différentes mise en oeuvre

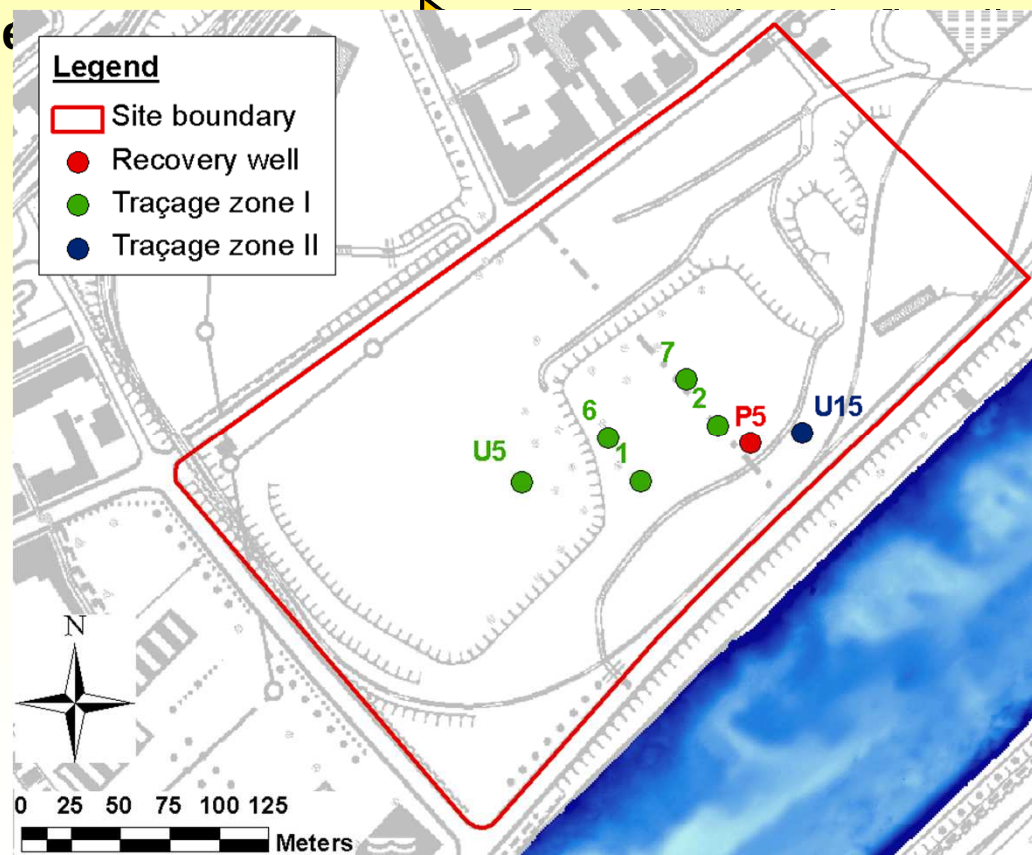
1. Radial convergent



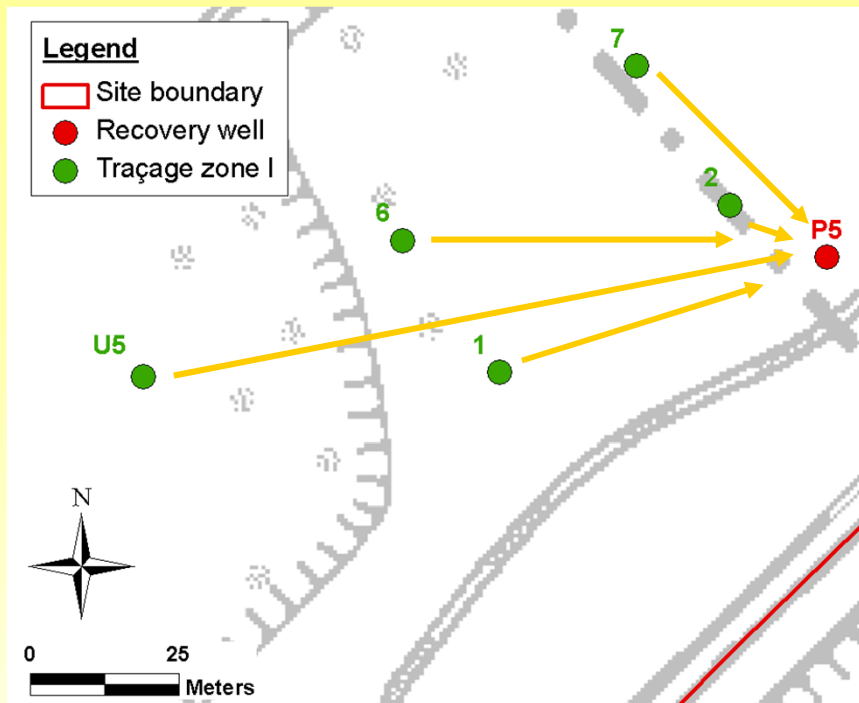
Identification et quantification des processus de transport et piégeage de substances (2 phases)

2. Puits unique

du souterraine au



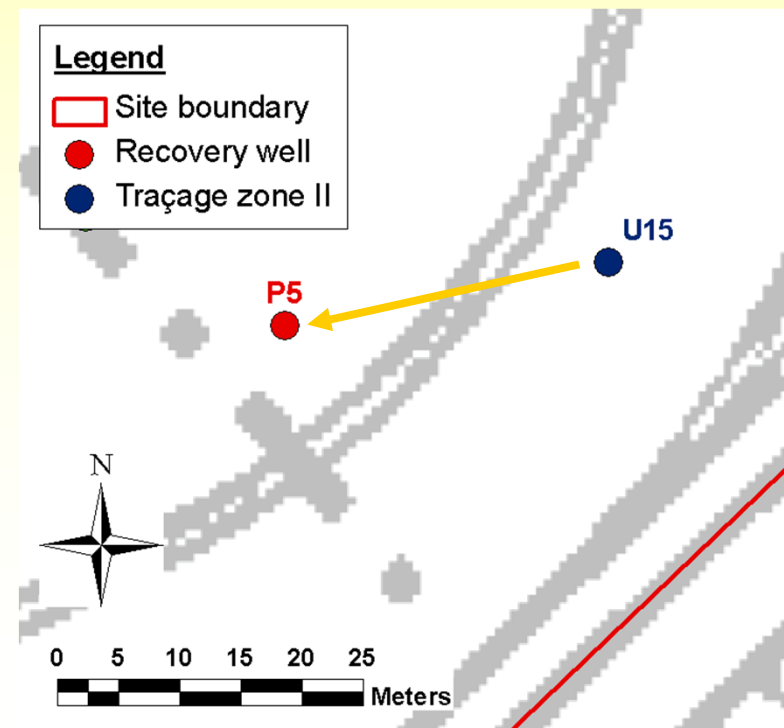
10. Essais de traçage (III). Radial convergent



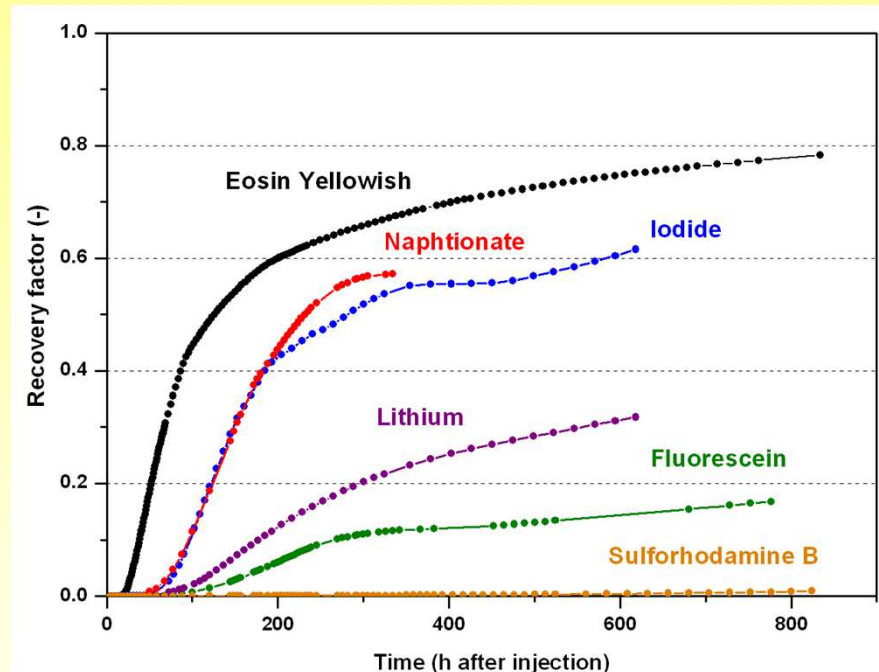
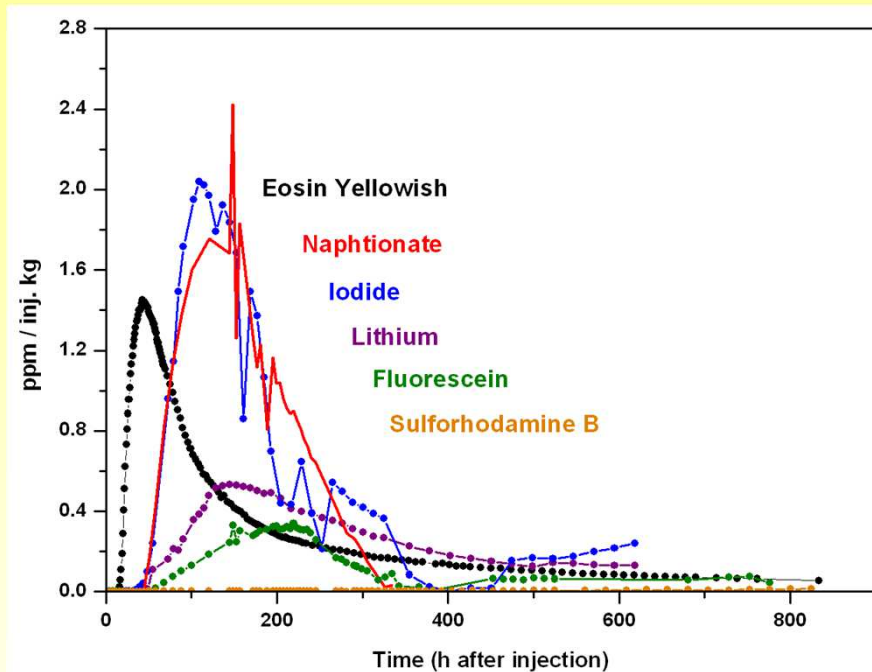
Piézo 1: Li^+ (1.39 kg)
 Piézo 2: NO_3^- (12.16 kg) + sulpho B (0.10 kg)
 Piézo 6: I^- (3.28 kg)
 Piézo 7: Naphtionate (1 kg)
 Piézo U5: Fluorescein (0.2 kg)

Piézo U15

Eosin Yellowish (1 kg)
 Naphtionate (0.01 kg)
 Sulpho B (0.01 kg)
 Fluorescein (0.01 kg)
 Li^+ (0.6 kg)
 I^- (0.76 kg)



10. Essais de traçage (IV). Radial convergent



Résultats Eosin Yellowish diffère fortement de autres ➡ pompage plus élevé.

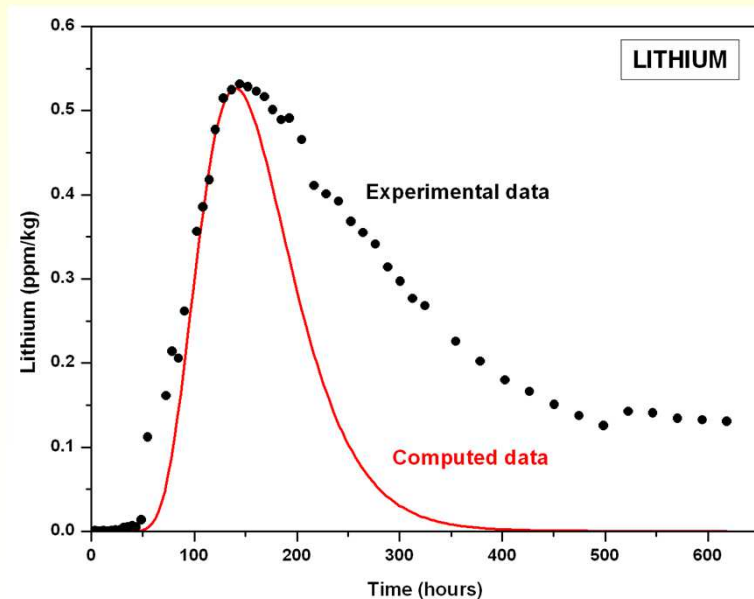
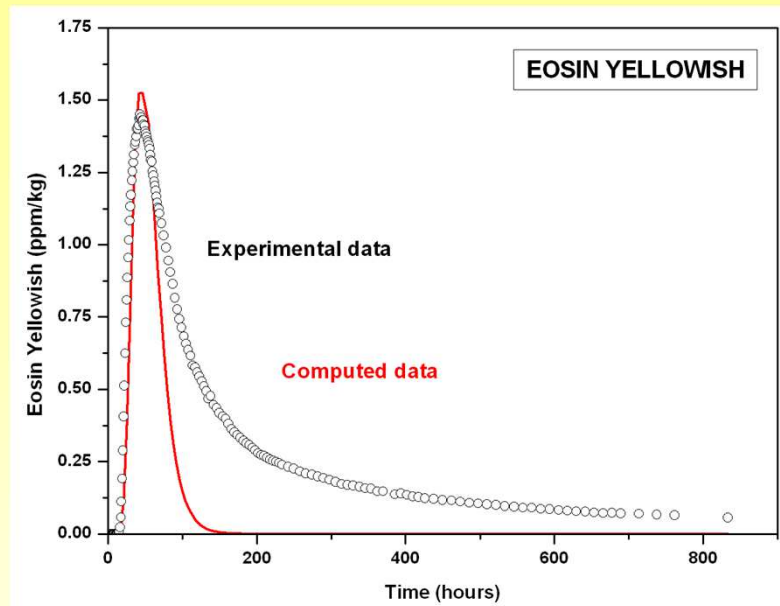
Pour la reste des traçages:

Premières arrivées, temps modal et taux de restitution variables



Différences physico-chimiques des traceurs

10. Essais de traçage (V). Radial convergent



CATTI (Sauty et al., 1992)

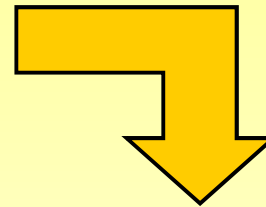
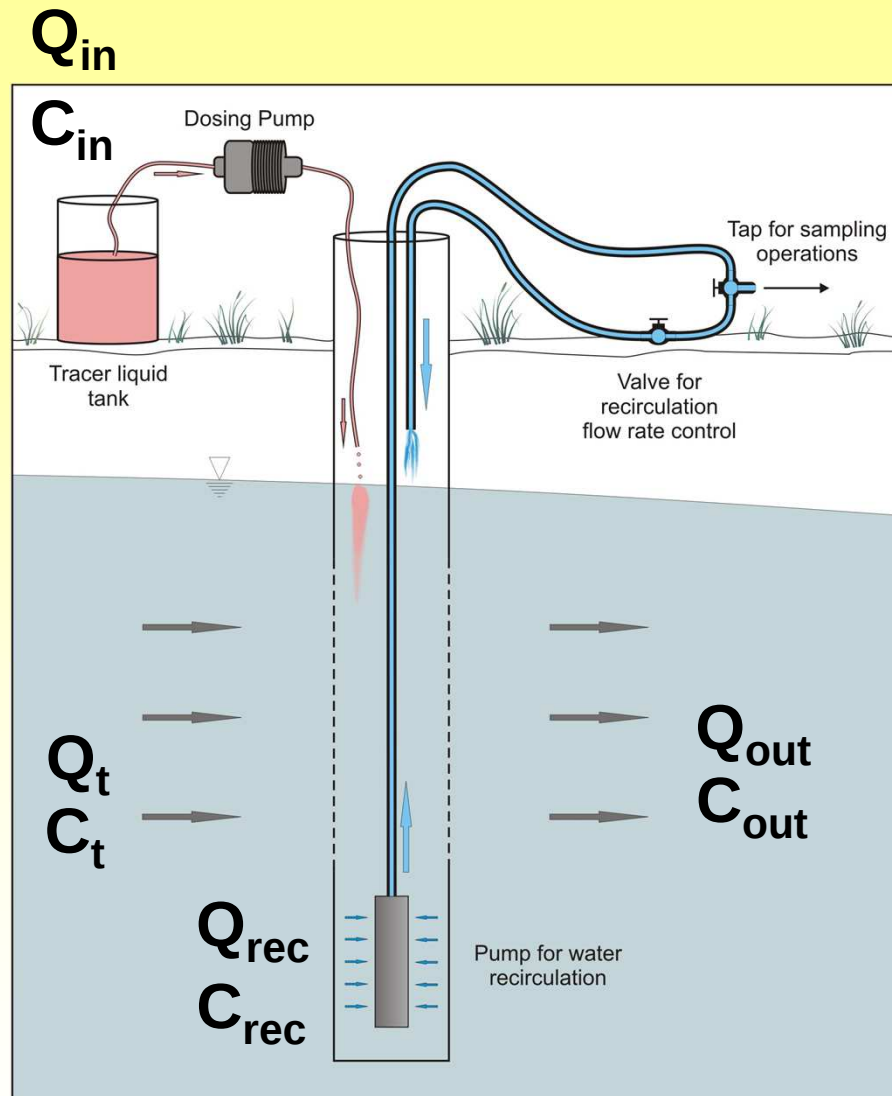
Ajustement des premières arrivées et temps modal des courbes, en utilisant la porosité effective et la dispersion longitudinale.

Ce logiciel ne tiens pas compte des effets de retard complexes (physico-chimiques).

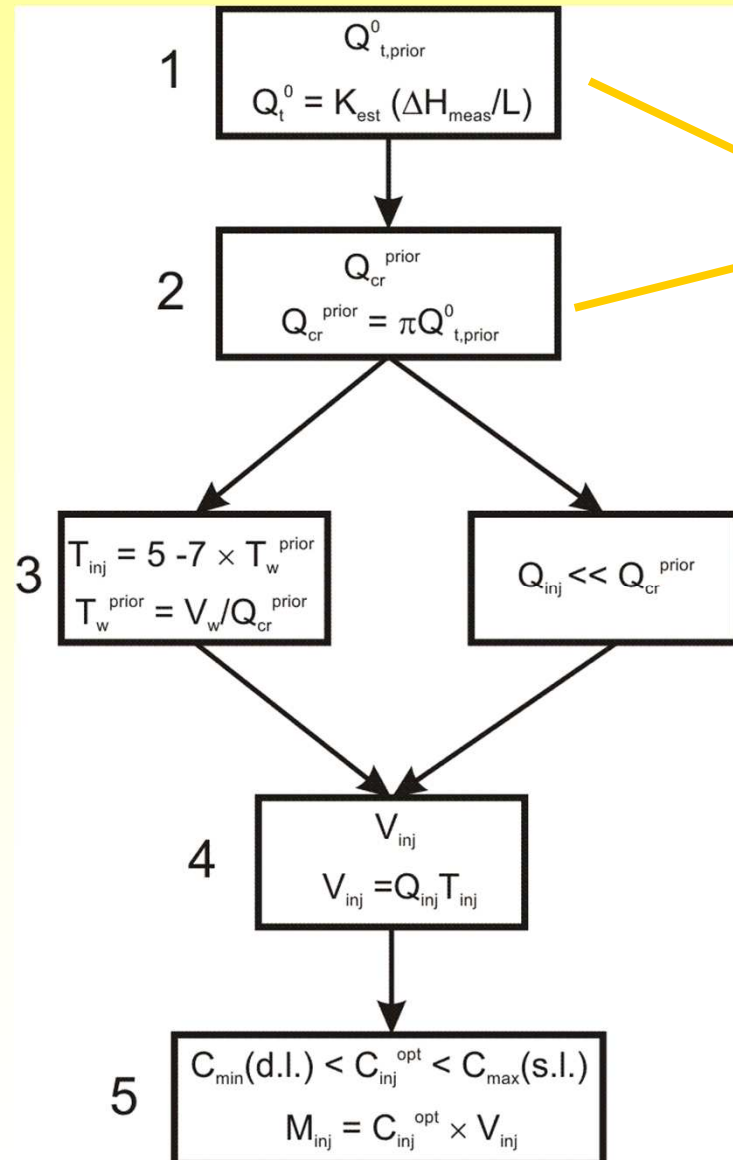
Porosité efficace (θ_m): 1.5 – 2.9 %

Dispersion longitudinale (α_L): 1.4 - 3.4 m.

11. Essais de traçage (I). Puits unique (FVPDM)



11. Essais de traçage (II). Puits unique (FVPDM)

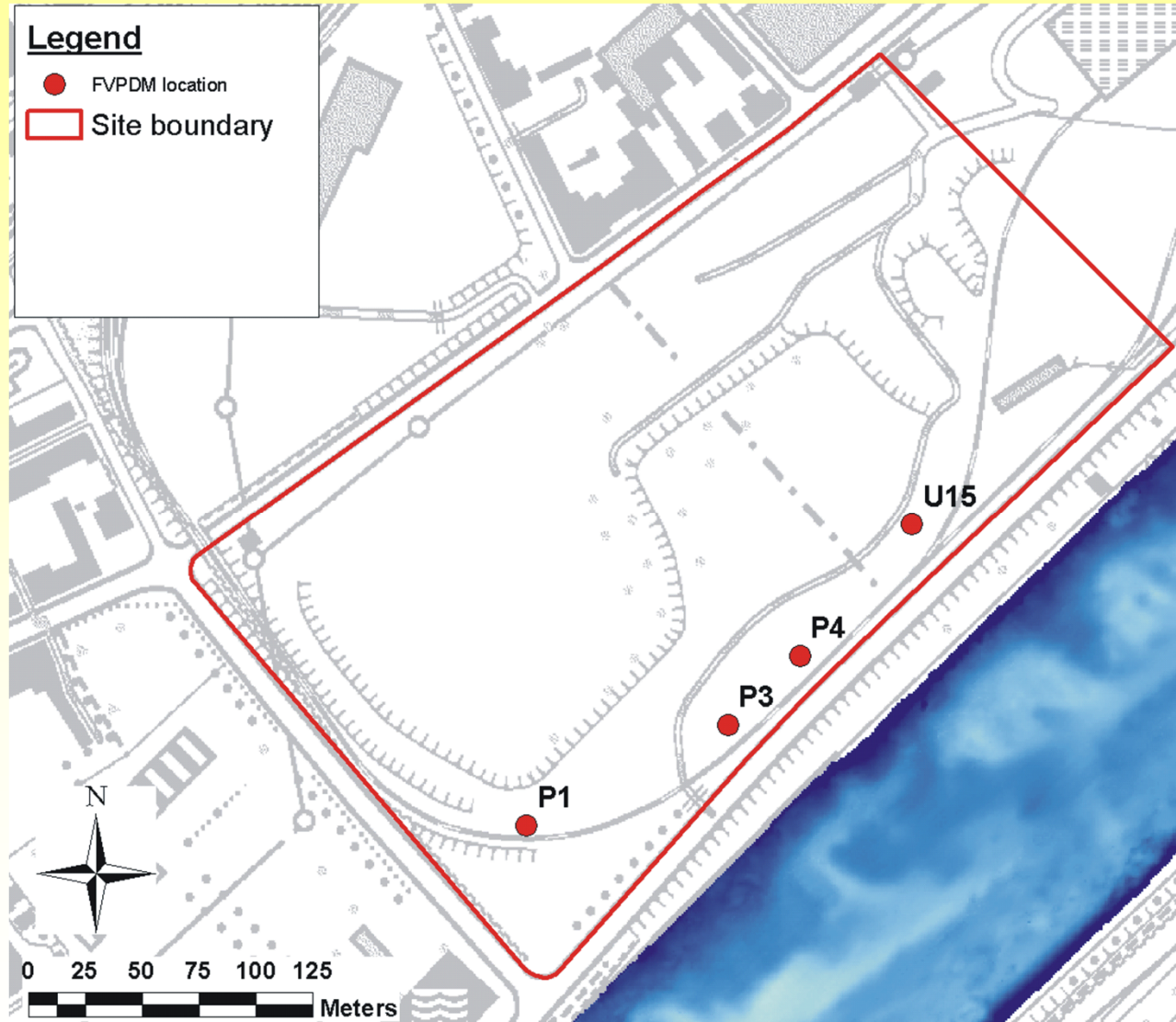


$$Q_{cr} = 2\pi e_{scr} r_w v_{ap} = 2\pi e_{scr} \alpha_w |v_D|$$



$$C_w(t) = \frac{Q_{in} C_{in} - (Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_{w,0}) \exp\left(-\frac{Q_{out}}{V_w} (t - t_0)\right)}{Q_{out}}$$

11. Essais de traçage (III). Puits unique (FVPDM)



Traceurs

U15. Br⁻ (2.7 kg)

P4. I⁻ (2.77 kg)

P3.

Sulforhodamine B (0.05 g)

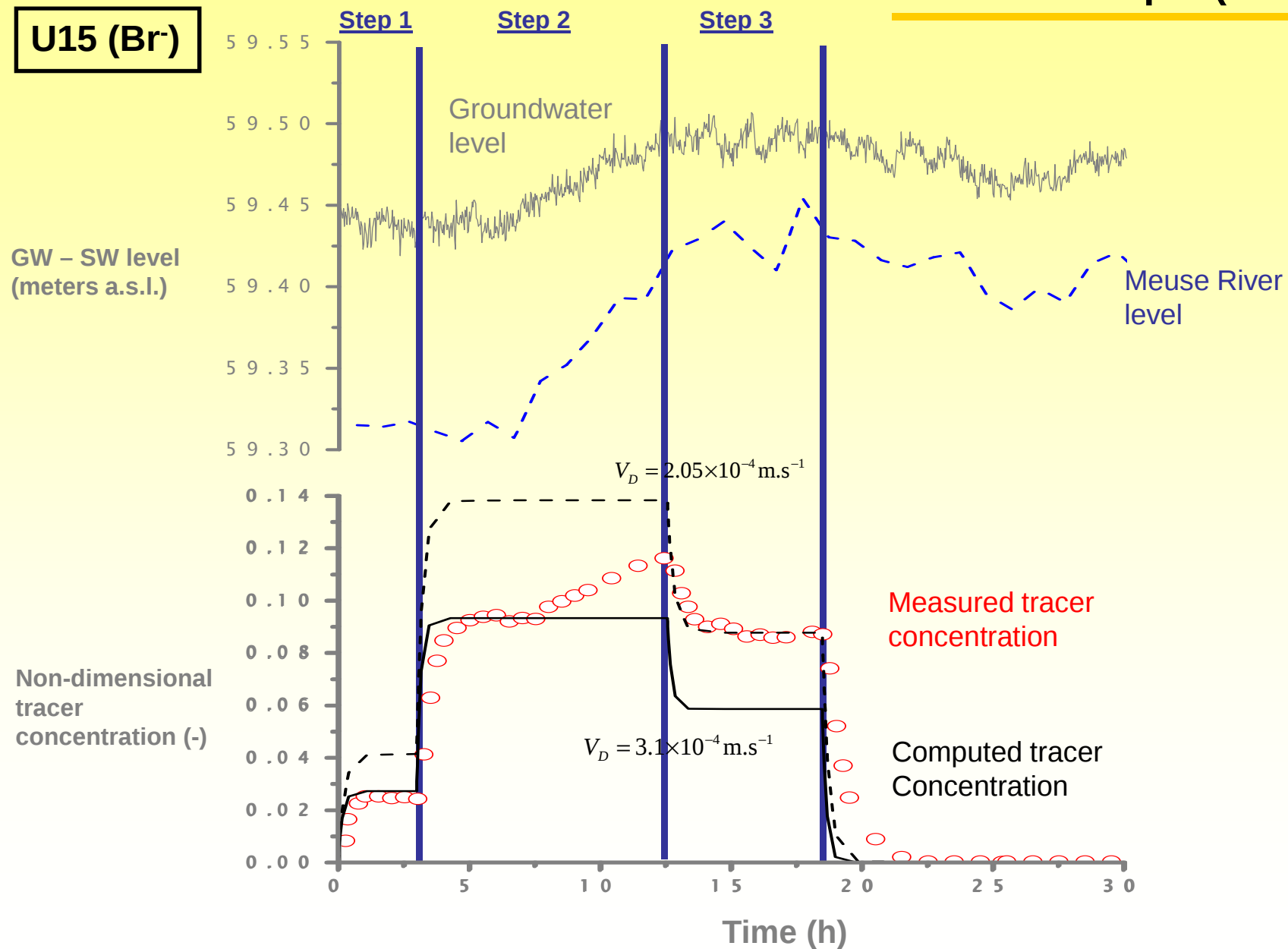
P1.

Fluorescein (0.05 g)

Naphtionate (0.05 g)

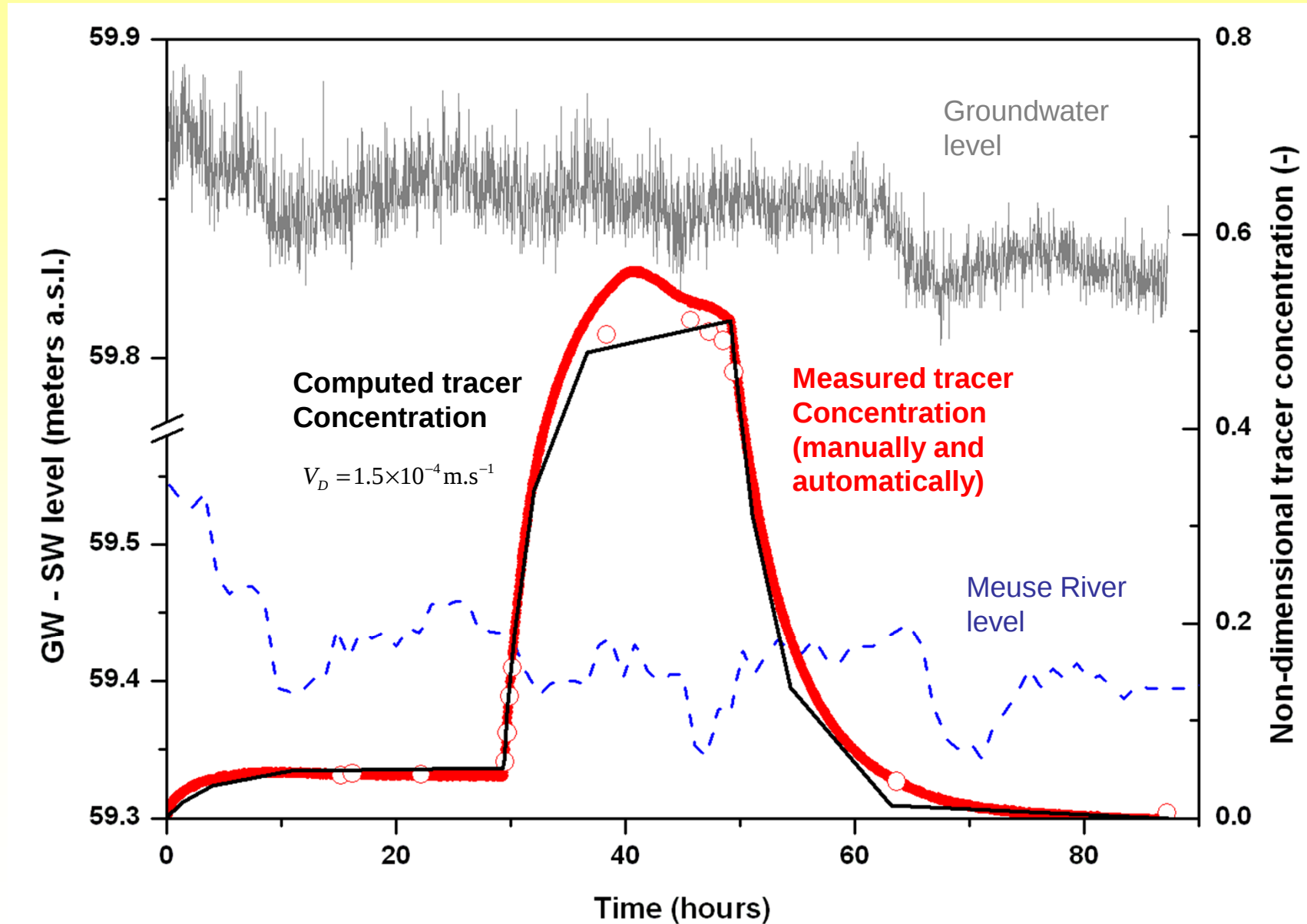
Sulforhodamine B (0.05 g)

11. Essais de traçage (IV). Puits unique (FVPDM)



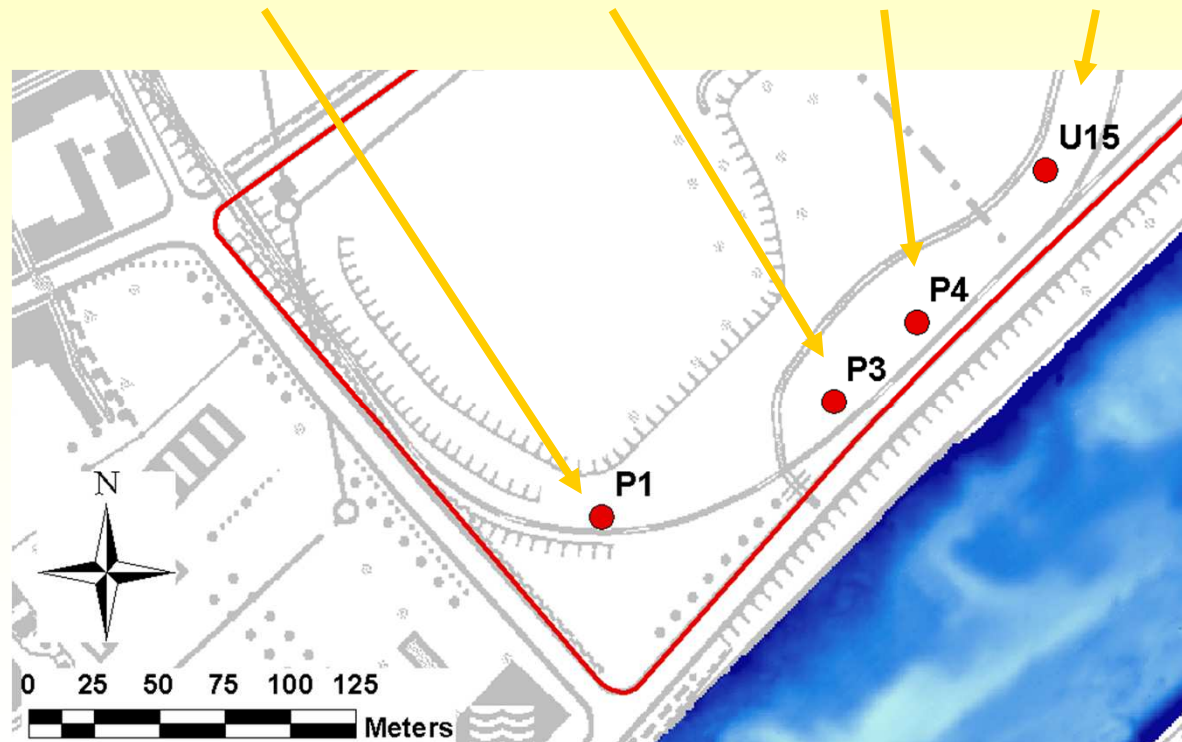
P3 (Sulforhodamine B)

11. Essais de traçage (V). Puits unique (FVPDM)



11. Essais de traçage (VI). Puits unique (FVPDM)

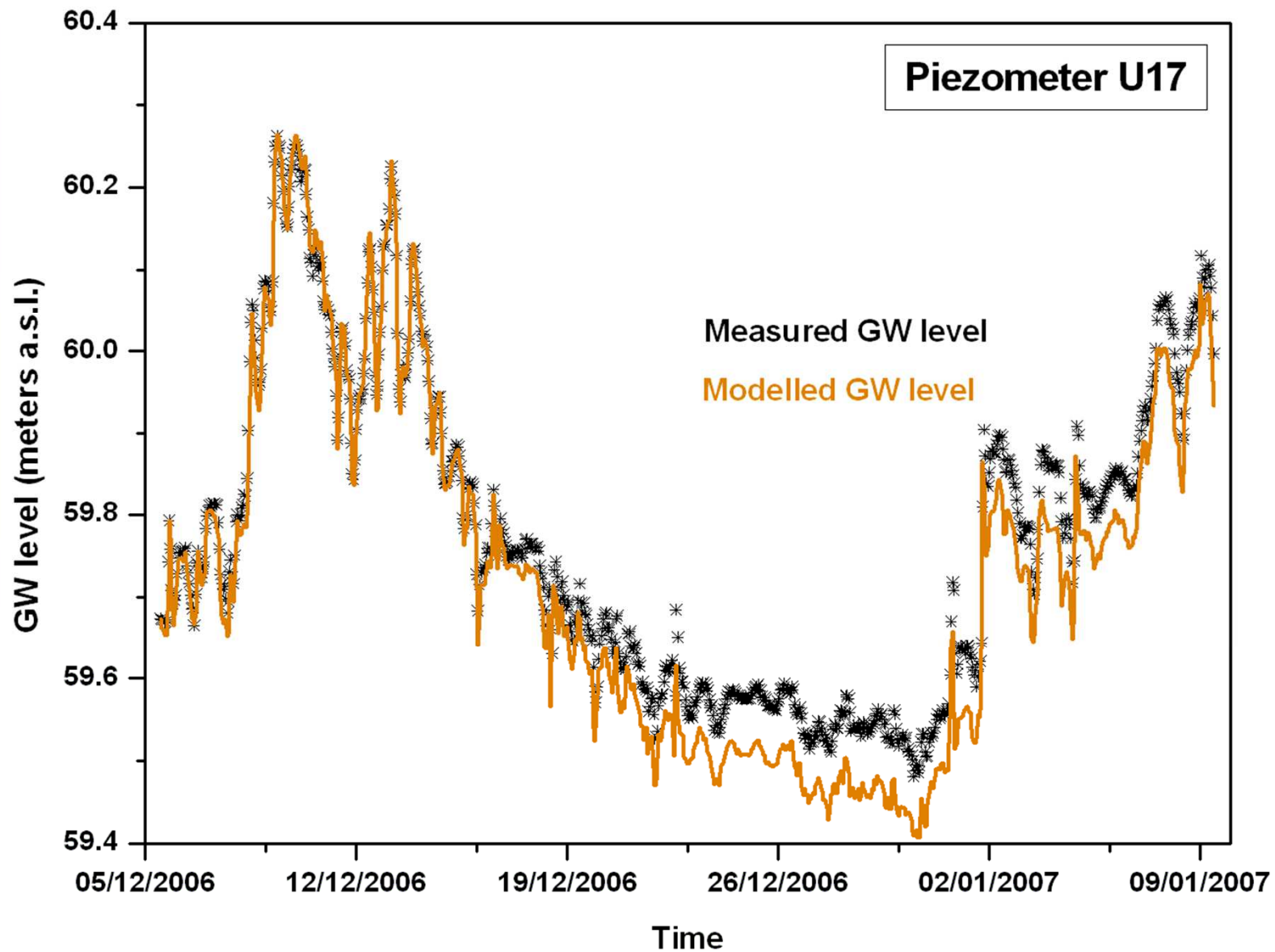
	P1	P3	P4	U15
Darcy flux v_D (m.s ⁻¹)	3.0×10^{-6}	1.5×10^{-5}	2.7×10^{-5}	$2.05 - 3.1 \times 10^{-5}$
Q_t^0 (m ³ .s ⁻¹)	3.01×10^{-6} (10.1 l.h ⁻¹)	4.8×10^{-6} (17.28 l.h ⁻¹)	1.1×10^{-5} (40.1 l.h ⁻¹)	$3.08 - 4.65 \times 10^{-5}$ (110.7 - 167.4 l.h ⁻¹)



1. Modélisation analytique

- Simulation du niveau d'eau souterraine à partir des variations temporelles du niveau de la Meuse,
- paramètres: K (T), S et α (coefficient transfert entre la rivière et l'aquifère, dépendant de la conductivité hydraulique de la berge),
- détermination du *seepage* (transfert des flux entre les deux systèmes),
- possibilité de corriger les effets de la Meuse sur la phase de remontée lors des essais de pompage

12. Travaux en cours (II)



2. Modélisation numérique

- Utilisation des paramètres hydrodynamiques et hydrodispersifs obtenus lors des essais de terrain,
- modélisation du flux d'eau souterrain et transport de contaminants au sein de l'aquifère graveleux de Flémalle,
- reproduction de différents scénarios avec migration de contaminants dissous dans l'aquifère