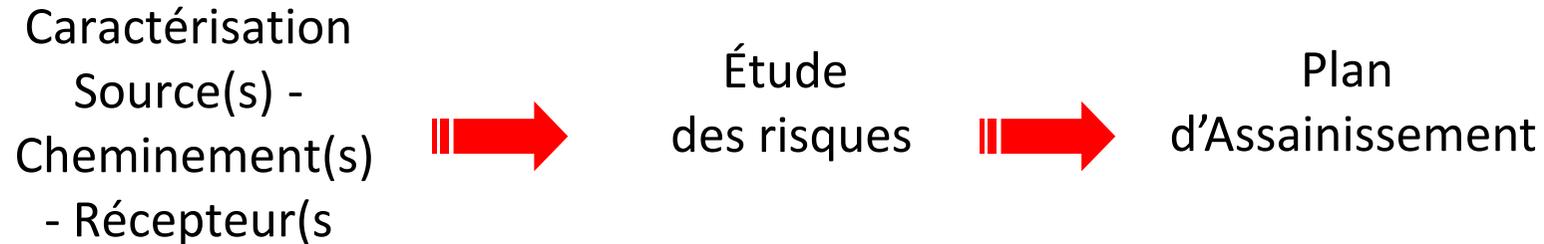


Caractérisation des eaux souterraines par des approches centrées sur les flux: concepts et applications

Serge Brouyère, Pierre Jamin

Hydrogéologie & Géologie de l'Environnement, Urban & Environmental Engineering,
Université de Liège, Belgique, Tel: +3243662377, Email: Serge.Brouyere@uliege.be

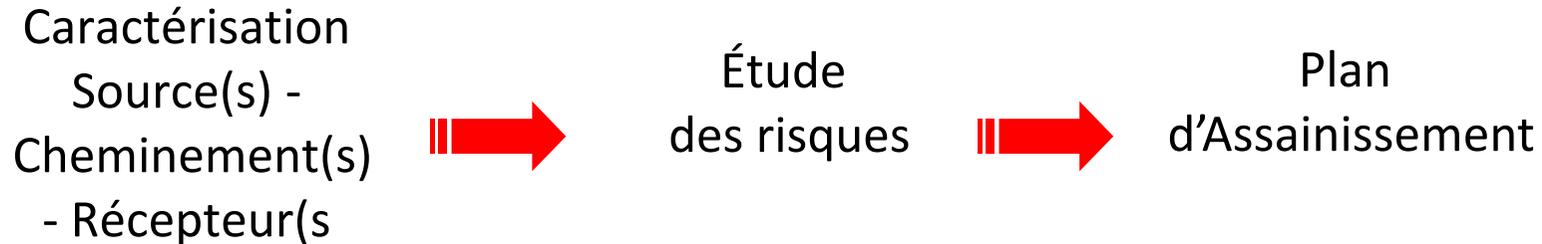
Chaque étape d'une étude de sol demande d'acquérir des données et informations spécifiques, y compris pour l'eau souterraine ...



Le plus souvent, le processus décisionnel prévalant pour la définition des programmes d'investigations et pour les conclusions qui en découlent **repose sur des mesures de concentrations** en polluants dans le sol et dans l'eau souterraine...

... Et cela est bien compréhensible puisque **tout le système normatif est basé sur des concentrations** (normes de potabilités, écotoxicologiques ...)

Chaque étape d'une étude de sol demande d'acquérir des données et informations spécifiques, y compris pour l'eau souterraine ...



Les mesures de concentrations en polluants nous fournissent **une photographie**, donc un instantané de l'état du sol et de l'eau souterraine...

Si on souhaite voir comment tout cela évolue au cours du temps, on doit constituer **un film** et donc d'informations sur la mobilité de l'eau et des polluants

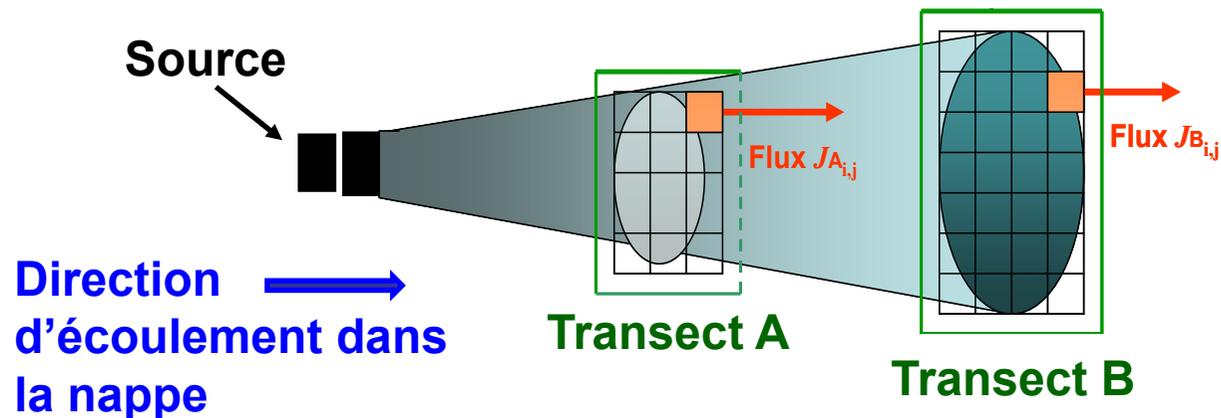
→ **besoin de quantifier, par des approches complémentaires, les flux d'eau et de polluants et leur dynamique temporelle**

Qu'entend-on par flux?

- **Flux massique de polluant ($J_{A_{ij}}$)**

- Quantité de polluant qui transite localement par unité de surface (A_{ij}) à travers un transect (*panneau de contrôle*) recoupant le panache de polluant (unités= $M.L^{-2}.T^{-1}$)
- Mesure locale de la quantité de polluant qui circule

Flux massique à travers divers transects



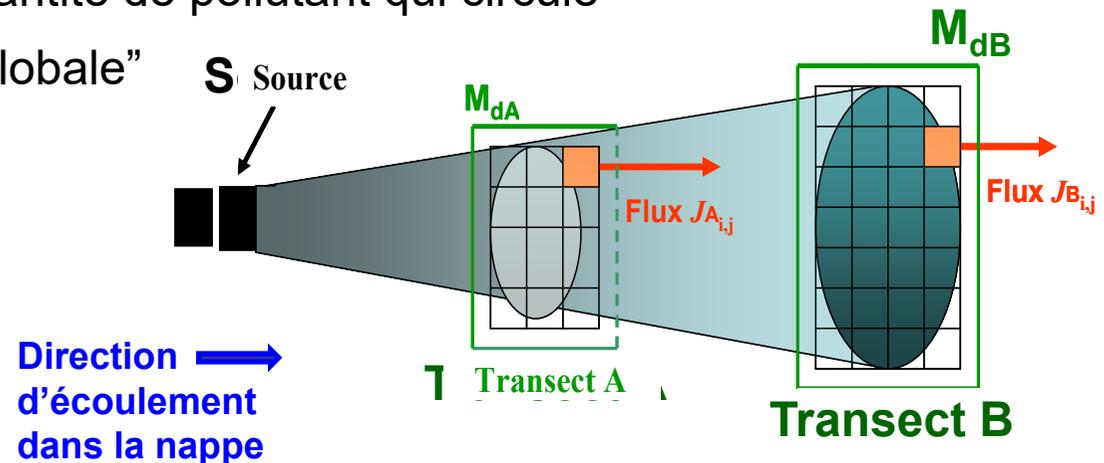
$J_{A_{ij}}$ = mesure locale du flux massique
au droit du Transect A
(ITRC MASSFLUX-1, 2010)

Quelques définitions avant d'aller plus loin ...

- **Débit massique de polluant (M_d) (*mass discharge*)**

- Intégrale à l'échelle du transect des flux massiques
- Masse de polluant en transit par unité de temps [M.T⁻¹]
- Mesure globale de la quantité de polluant qui circule

- Indicateur de la "puissance globale" de la source ou du panache



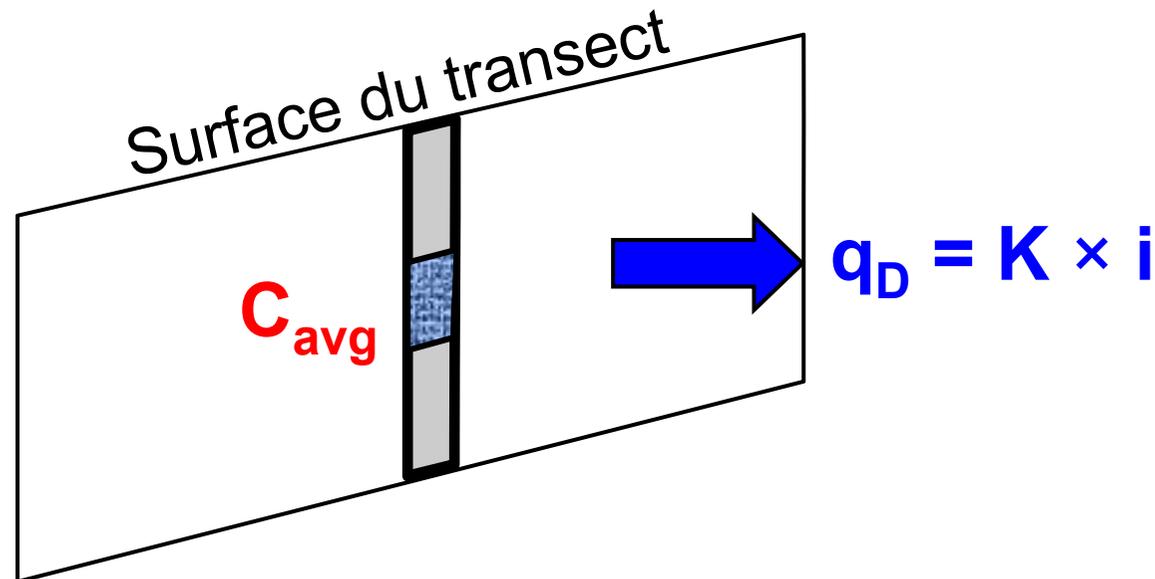
$$M_d = \int_A J_c dA$$

M_{dA} = débit massique à travers le transect A

$$M_{dA} = \sum [J_{a_{ij}} \times A_{ij}]$$

Flux massiques versus concentrations

1. Flux d'eau (flux de Darcy): $q_D = K \times i$ [$L.T^{-1}$] ou [$L^3.L^{-2}.T^{-1}$]
2. Concentration moyenne: C_{avg} [M/L^3]
3. Flux massique: $J = q_D \times C_{avg}$ [$M.L^{-2}.T^{-1}$]



En quoi le « Référentiel concentrations » coince-t-il?

Il nous amène parfois un peu à « *jouer aux fléchettes* » pour implanter des forages ... Mais une fois encore, c'est bien logique puisque le cadre normatif nous impose en premier de délimiter l'extension spatiale et verticale de la pollution ...

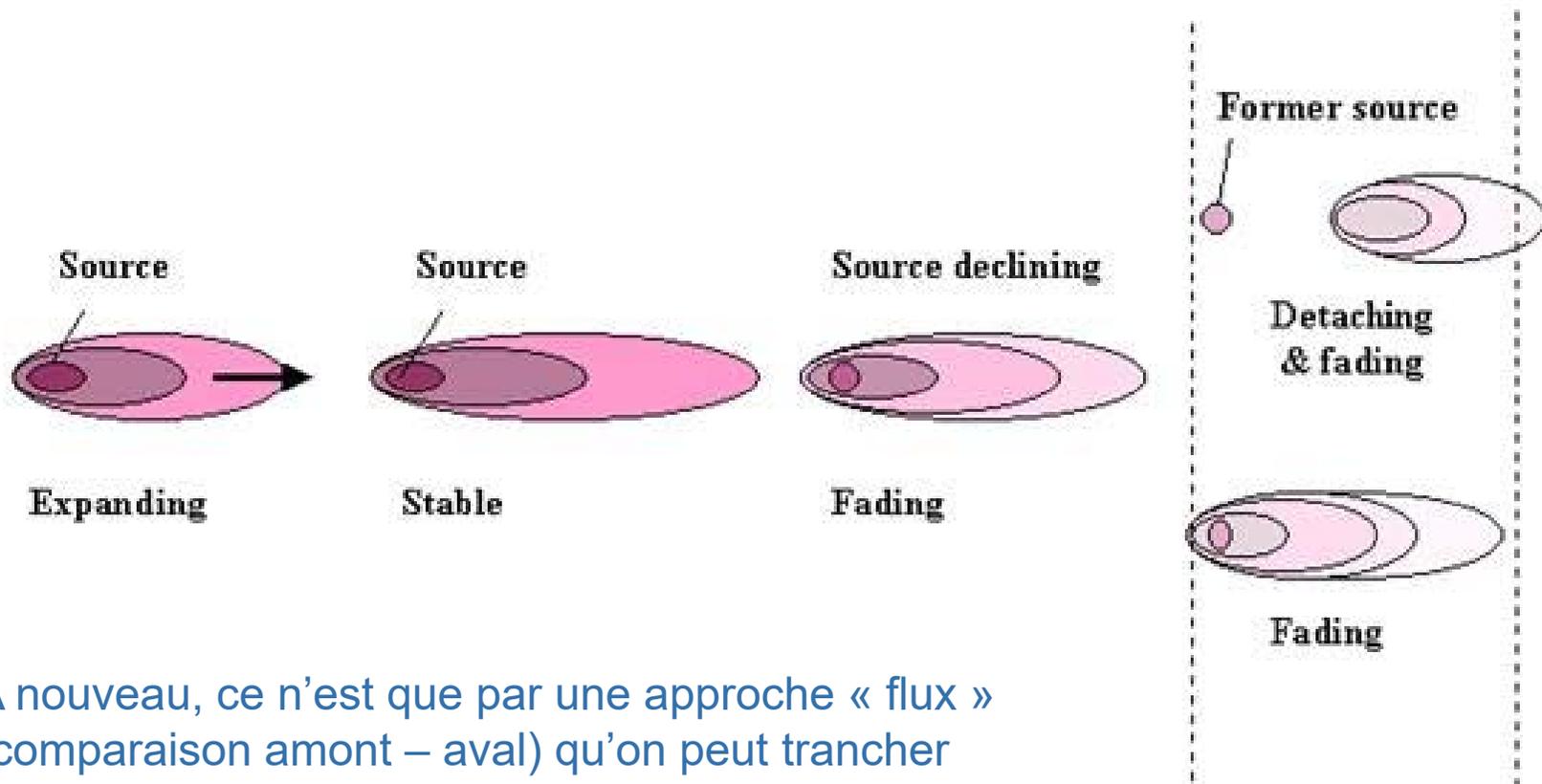
Conséquences =

1. On est fréquemment amenés à forer « un peu partout »
2. Sur base de ces mesures de concentrations, on a fréquemment du mal à évaluer la dynamique temporelle du panache
3. On a tendance à “courir derrière” la pollution



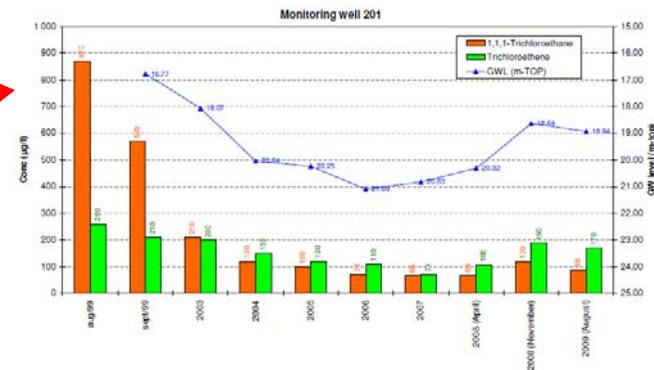
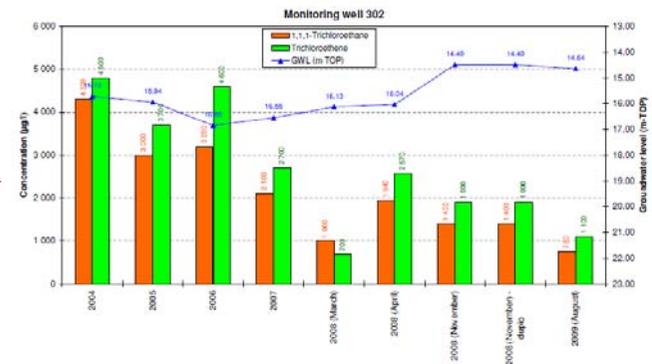
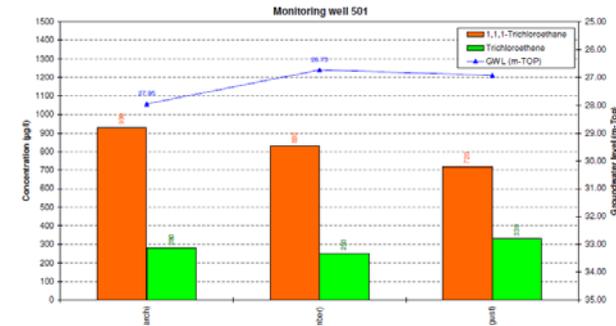
Pollution délimitée, oui ... Et pourtant, elle bouge!

Mais un même panache peut correspondre à plusieurs cas de figures très contrastés, avec des conséquences potentiellement très différentes ...



A nouveau, ce n'est que par une approche « flux » (comparaison amont – aval) qu'on peut trancher

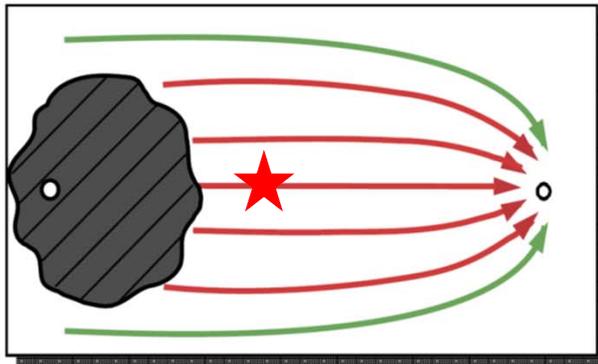
Elle court, elle court la pollution, oui mais jusqu'où?



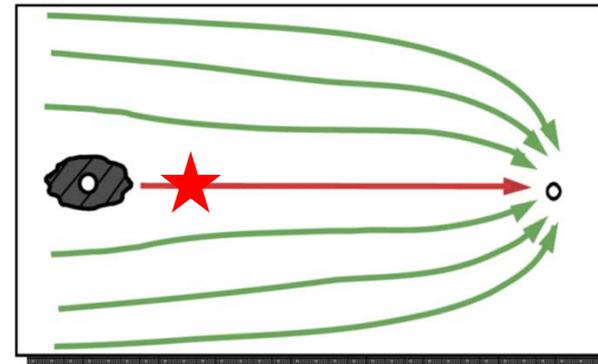
Les études de risques nous confrontent aussi à des casse-têtes et paradoxes quand on se base sur les concentrations ...

→ Importance du volume de sol pollué

**Case A: Large Release
High Max. Conc. and High Md**



**Case B: Small Release
High Max. Conc. and Low Md**

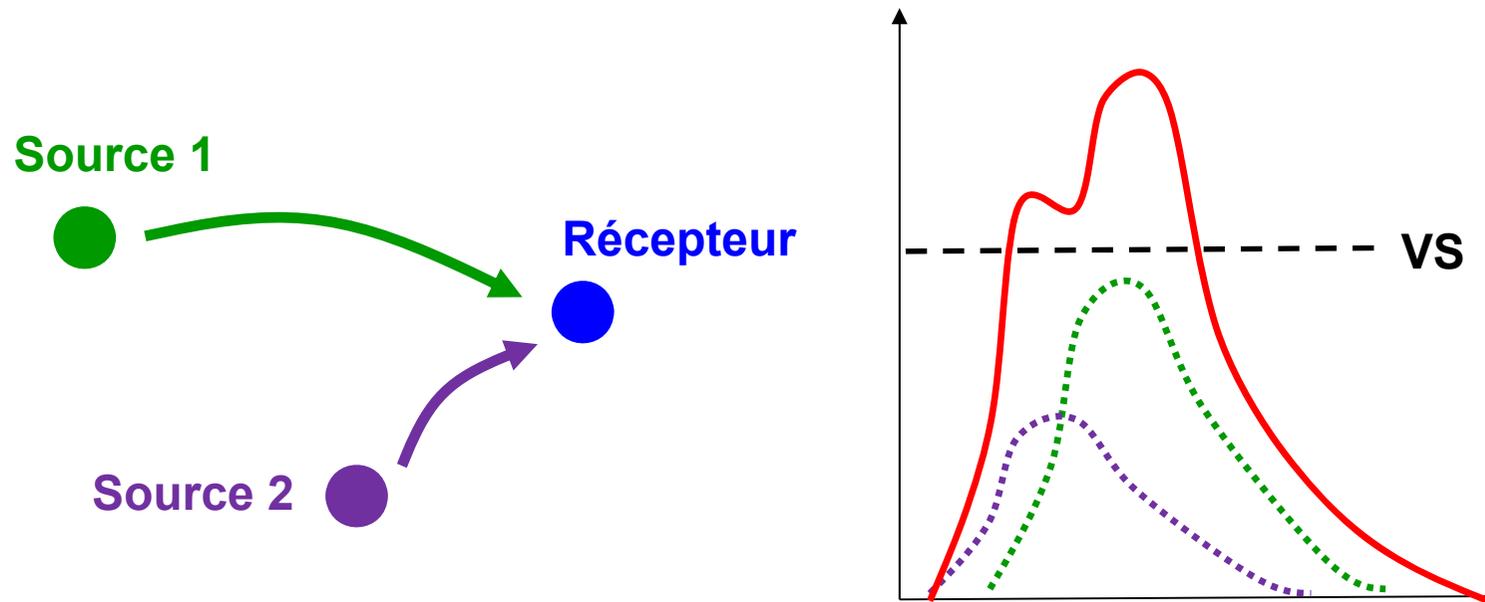


Source: ITRC Technology Overview Document
Use and Measurement of Mass Flux and Mass Discharge

Ce qui pose problème, c'est la masse et le flux total de polluant qui est en jeu, pas seulement sa concentration en tant que telle

Les études de risques, nous confrontent aussi à des casse-têtes et paradoxes quand on se base sur les concentrations ...

→ Problématique de l'additivité des tâches de pollution

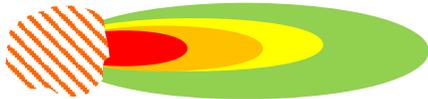


Le flux massique cumulé de polluants venant des différentes sources conduit à un dépassement du seuil, pas les concentrations effectivement associées à chacune d'elles

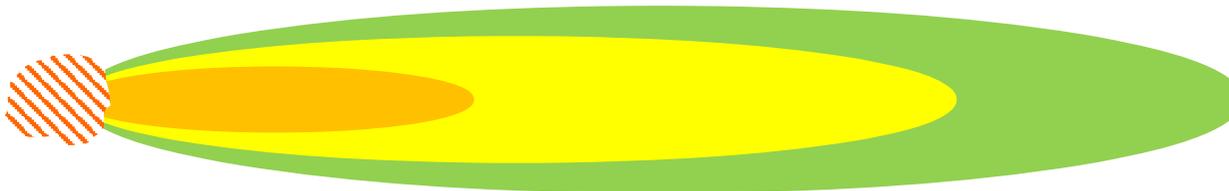
Les études de risques, nous confrontent aussi à des casse-têtes et paradoxes quand on se base sur les concentrations ...

→ Le « paradoxe » du coefficient de dilution qui rend les aquifères perméables moins à risque ...

Aquifère « moins perméable » : $Q_{\text{ESO}} \ll \rightarrow$ panache moins étendu et plus concentré



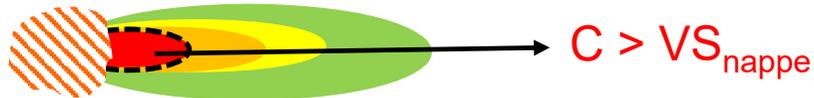
Aquifère « plus perméable » : $Q_{\text{ESO}} \gg \rightarrow$ panache plus étendu et moins concentré



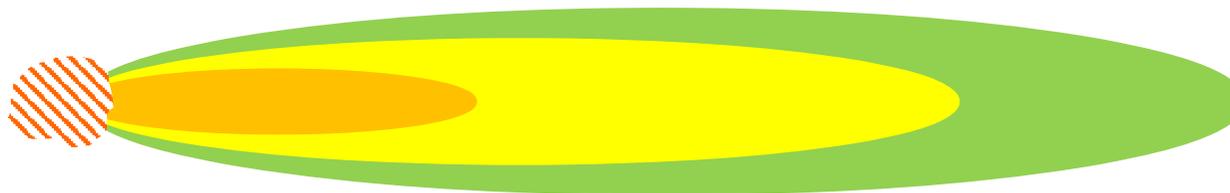
Les études de risques, nous confrontent aussi à des casse-têtes et paradoxes quand on se base sur les concentrations ...

→ Le « paradoxe » du coefficient de dilution qui rend les aquifères perméables moins à risque ...

Aquifère « moins perméable » : $Q_{ESO} \ll \rightarrow$ panache moins étendu et plus concentré



Aquifère « plus perméable » : $Q_{ESO} \gg \rightarrow$ panache plus étendu et moins concentré

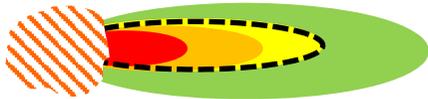


Si la VS_{nappe} correspond au rouge et au-delà (intérieur du contour en tirets noirs),
le 1^{er} cas de figure conduit à un risque avéré, le 2^{ème} pas...

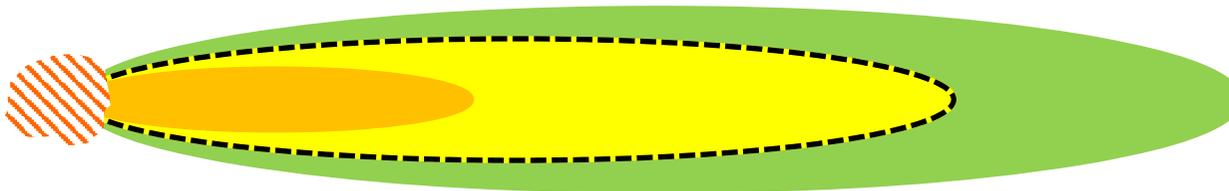
Les études de risques, nous confrontent aussi à des casse-têtes et paradoxes quand on se base sur les concentrations ...

→ Le « paradoxe » du coefficient de dilution qui rend les aquifères perméables moins à risque ...

Aquifère « moins perméable » : $Q_{\text{ESO}} \ll \rightarrow$ panache moins étendu et plus concentré



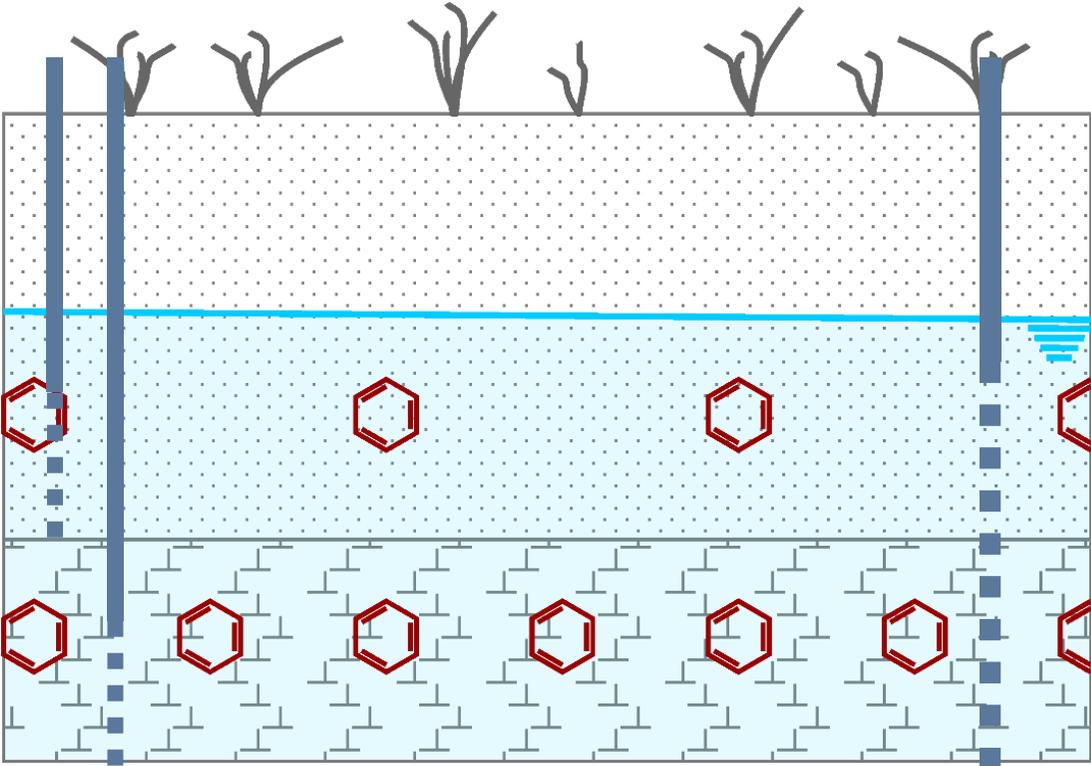
Aquifère « plus perméable » : $Q_{\text{ESO}} \gg \rightarrow$ panache plus étendu et moins concentré



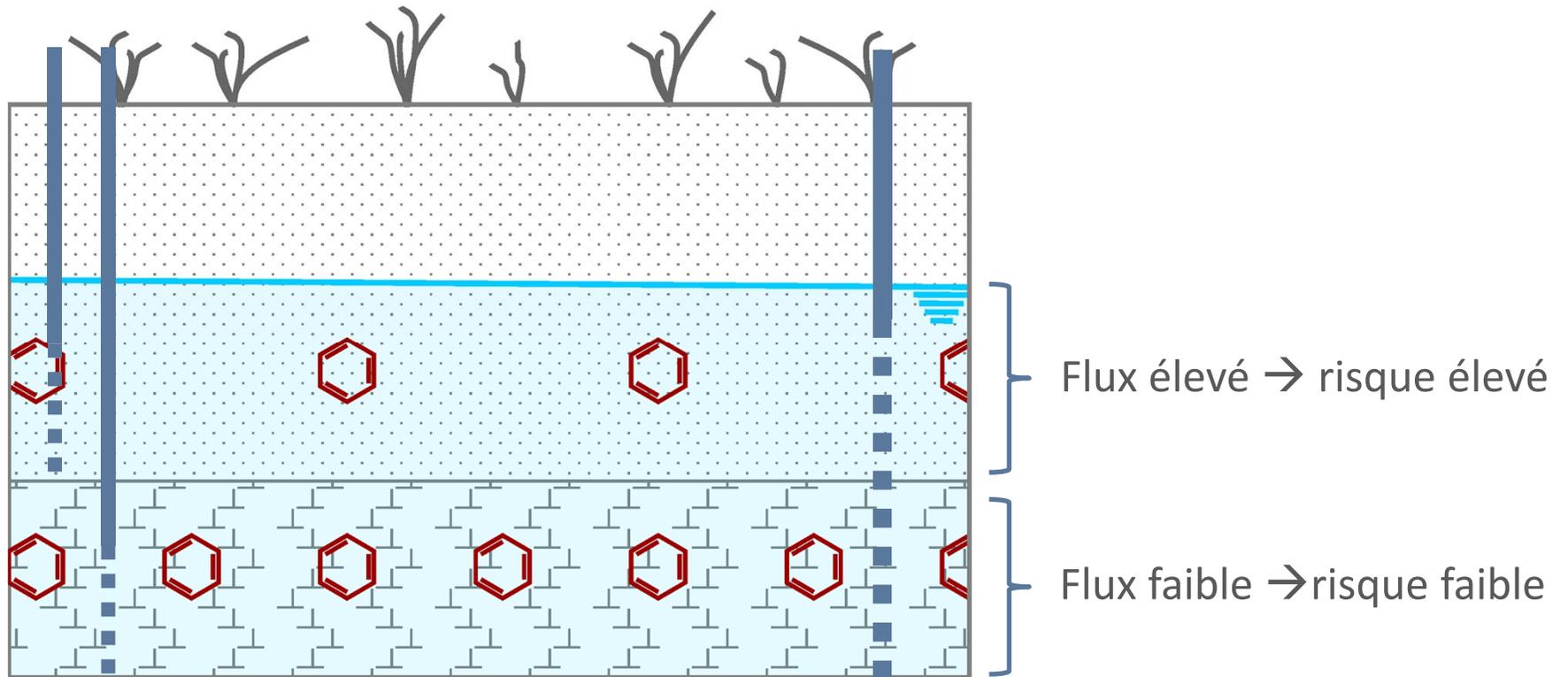
Si la VS_{nappe} correspond au jaune et au-delà (intérieur du contour en tirets noir),
le volume d'ESO dégradée est plus important dans le 2^{ème} cas, même si les concentrations sont moins élevées!

→ Les flux d'eau et de polluants sont plus élevés dans le deuxième cas!

Concentrations élevées = risques élevés?

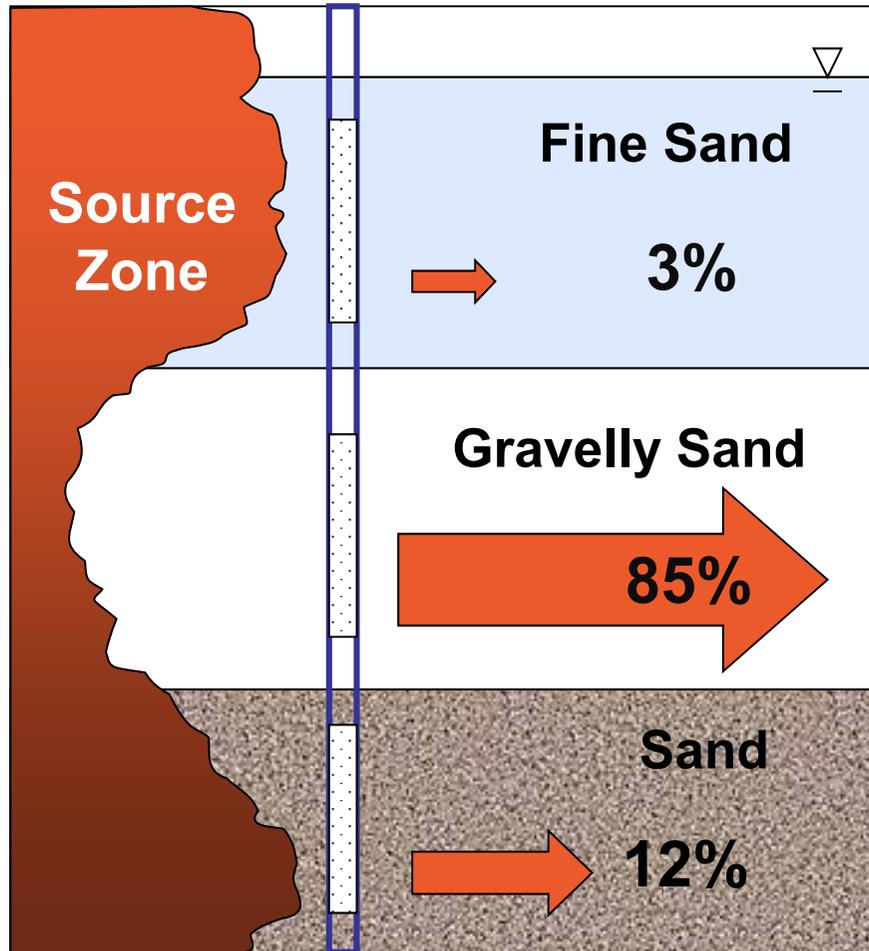


Concentrations élevées = risques élevés?



Ce qui pose problème, ce sont les polluants qui bougent (vers la nappe puis dans la nappe), donc les flux de polluants

Flux massiques versus concentrations



$$\text{Mass Flux } (J) = qC = KiC$$

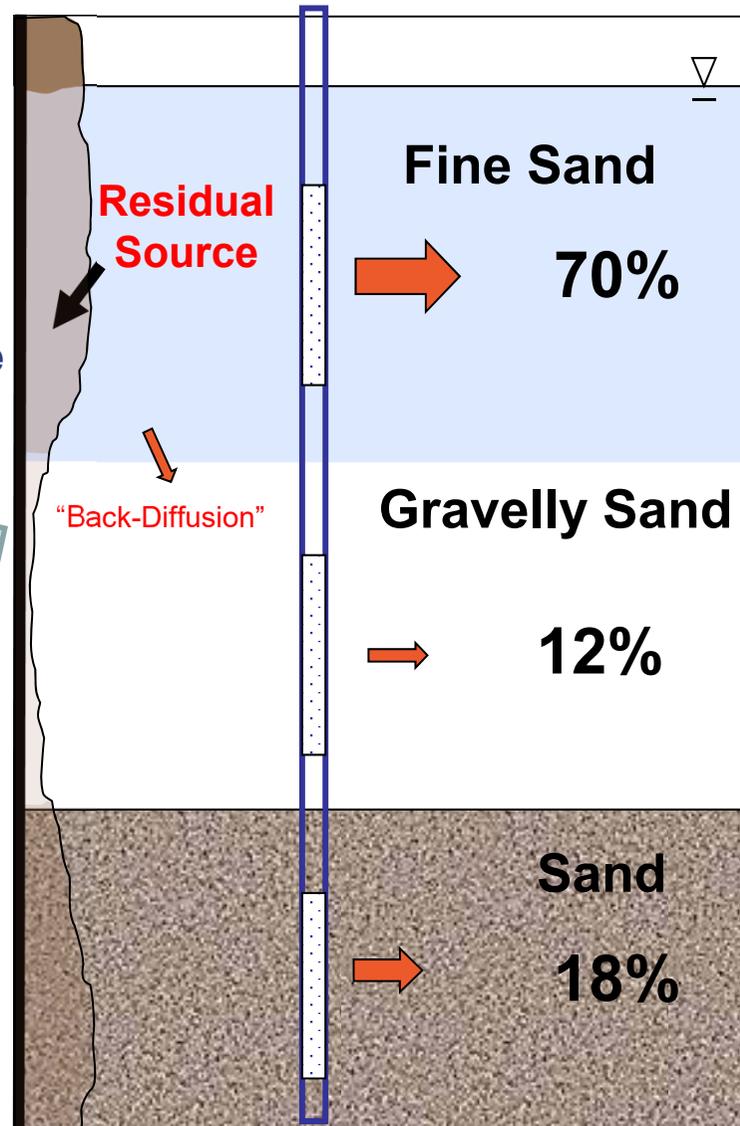
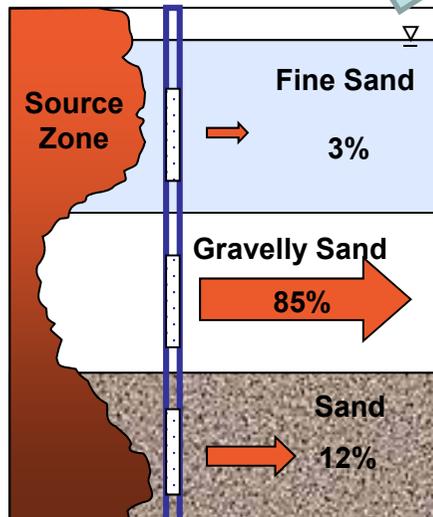
$$\begin{aligned} K &= 1.0 \text{ m/day} \\ i &= 0.003 \text{ m/m} \\ C &= 10,000 \text{ } \mu\text{g/L} \\ \text{Mass Flux} &= 0.03 \text{ g/m}^2\text{/day} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K &= 33.3 \text{ m/day} \\ i &= 0.003 \text{ m/m} \\ C &= 10,000 \text{ } \mu\text{g/L} \\ \text{Mass Flux} &= 1 \text{ g/m}^2\text{/day} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K &= 5.0 \text{ m/day} \\ i &= 0.003 \text{ m/m} \\ C &= 10,000 \text{ } \mu\text{g/L} \\ \text{Mass Flux} &= 0.15 \text{ g/m}^2\text{/day} \end{aligned}$$

Flux massiques versus concentrations

- If the source is exhausted, more mass remains in the less permeable zones
- The total mass discharge has been reduced by 95% and the flux profiles have changed. This aging scenario can lead to "Back-Diffusion"



$$\text{Mass Flux } (J) = KiC$$

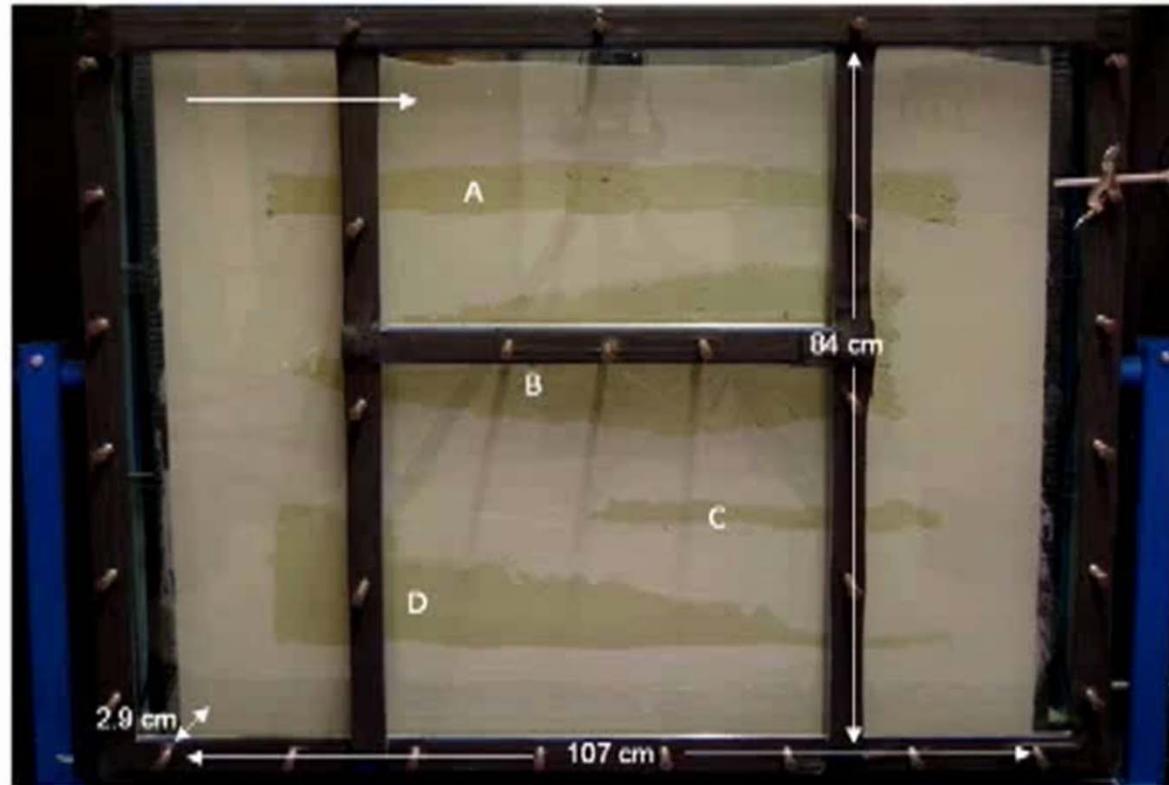
$K = 1.0 \text{ m/day}$
 $i = 0.003 \text{ m/m}$
 $C = 10,000 \text{ } \mu\text{g/L}$
Mass Flux = 30 mg/m²/day

$K = 33.3 \text{ m/day}$
 $i = 0.003 \text{ m/m}$
 $C = 50 \text{ } \mu\text{g/L}$
Mass Flux = 5 mg/m²/day

$K = 5.0 \text{ m/day}$
 $i = 0.003 \text{ m/m}$
 $C = 500 \text{ } \mu\text{g/L}$
Mass Flux = 7.5 mg/m²/day

Flux massiques versus concentrations

Source: G.Verreydt, iFLux

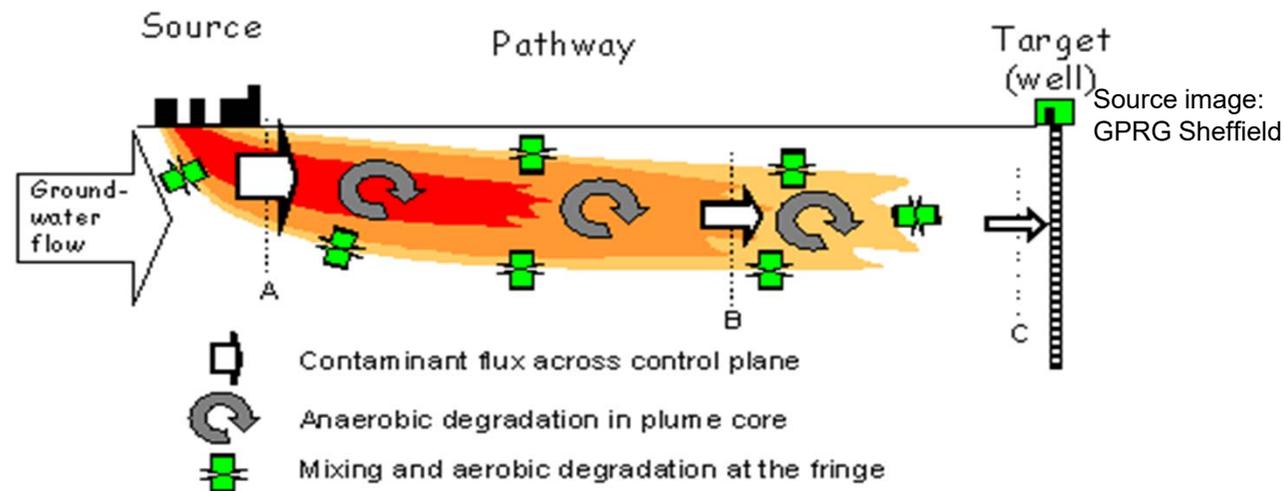


Au niveau du plan d'assainissement aussi il y a des besoins...

→ L'efficacité d'un assainissement in situ repose sur une bonne connaissance du milieu souterrain, des flux d'eau, de polluants et d'éventuels co-réactifs (naturellement présents ou injectés)

Ex: Atténuation naturelle contrôlée de produits pétroliers:

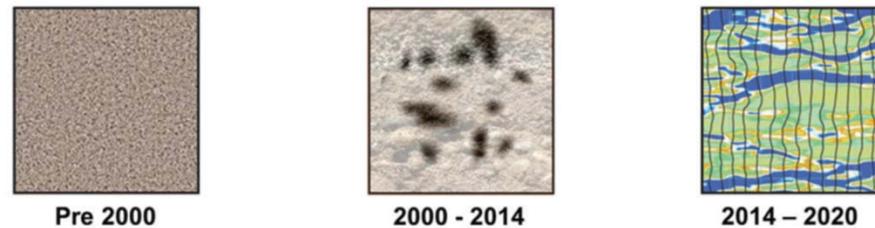
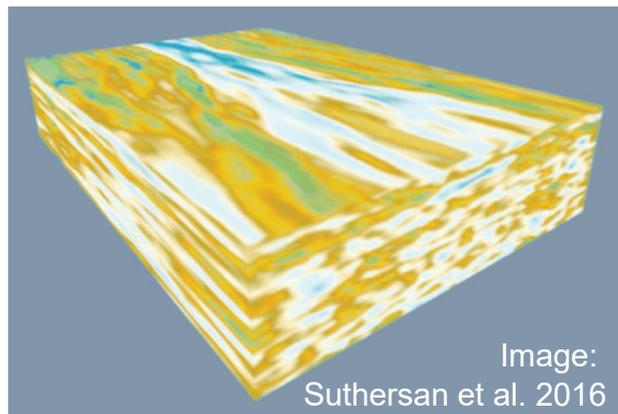
balance entre le flux de polluants et celui des accepteurs d'électrons



$$OXC = \sum ni[Ox]_i - ni[Red]_i = -RDC$$

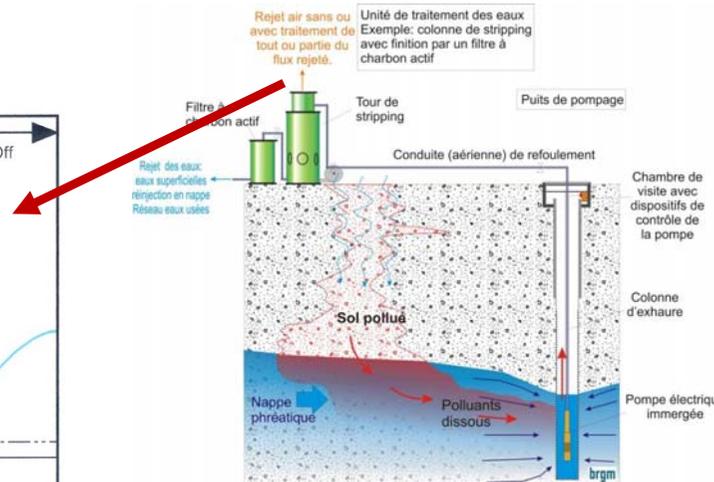
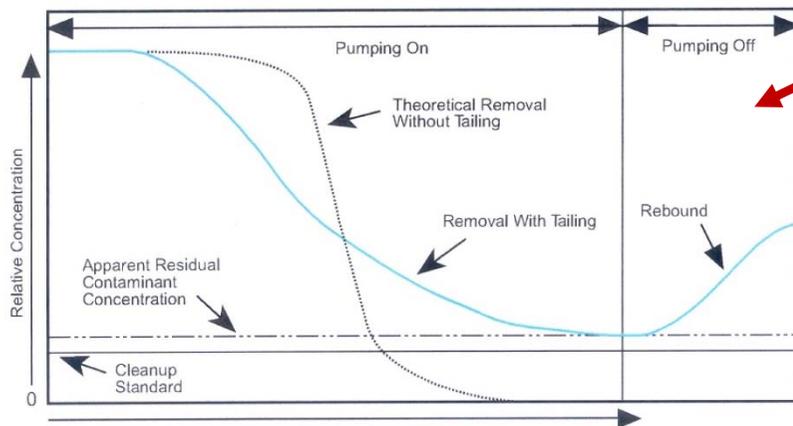
Au niveau du plan d'assainissement aussi il y a des besoins...

→ Le milieu souterrain est généralement très hétérogène et cela a des conséquences sur l'efficacité de certaines techniques ...



Scale of the Data and Information We Collect is Decreasing

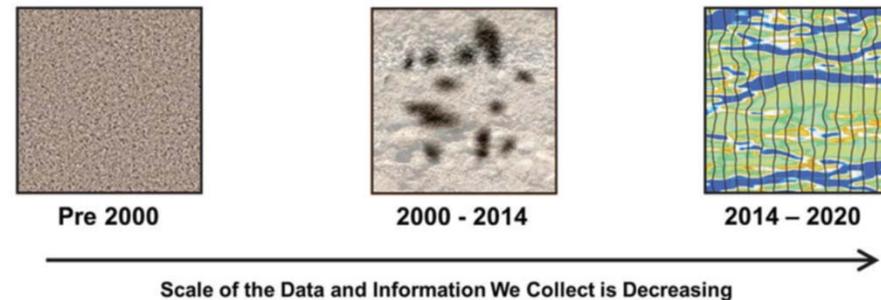
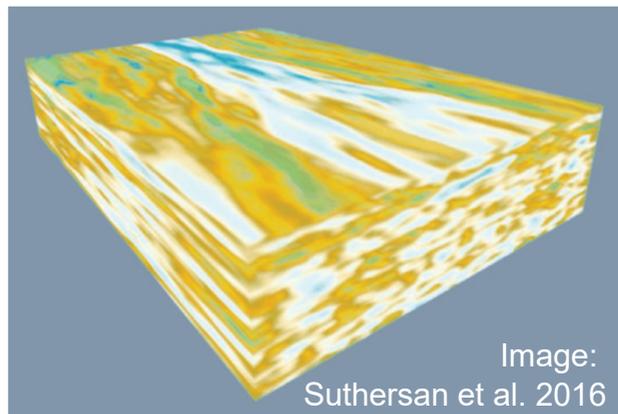
Suthersan et al 2016



Source image: <http://www.selecdepol.fr/fiches-techniques/pompage-et-traitement/principe#>

Au niveau du plan d'assainissement aussi il y a des besoins...

→ Le milieu souterrain est généralement très hétérogène et cela a des conséquences sur l'efficacité de certaines techniques ...



Suthersan et al 2016

ex: barrière réactives perméables (PRB)

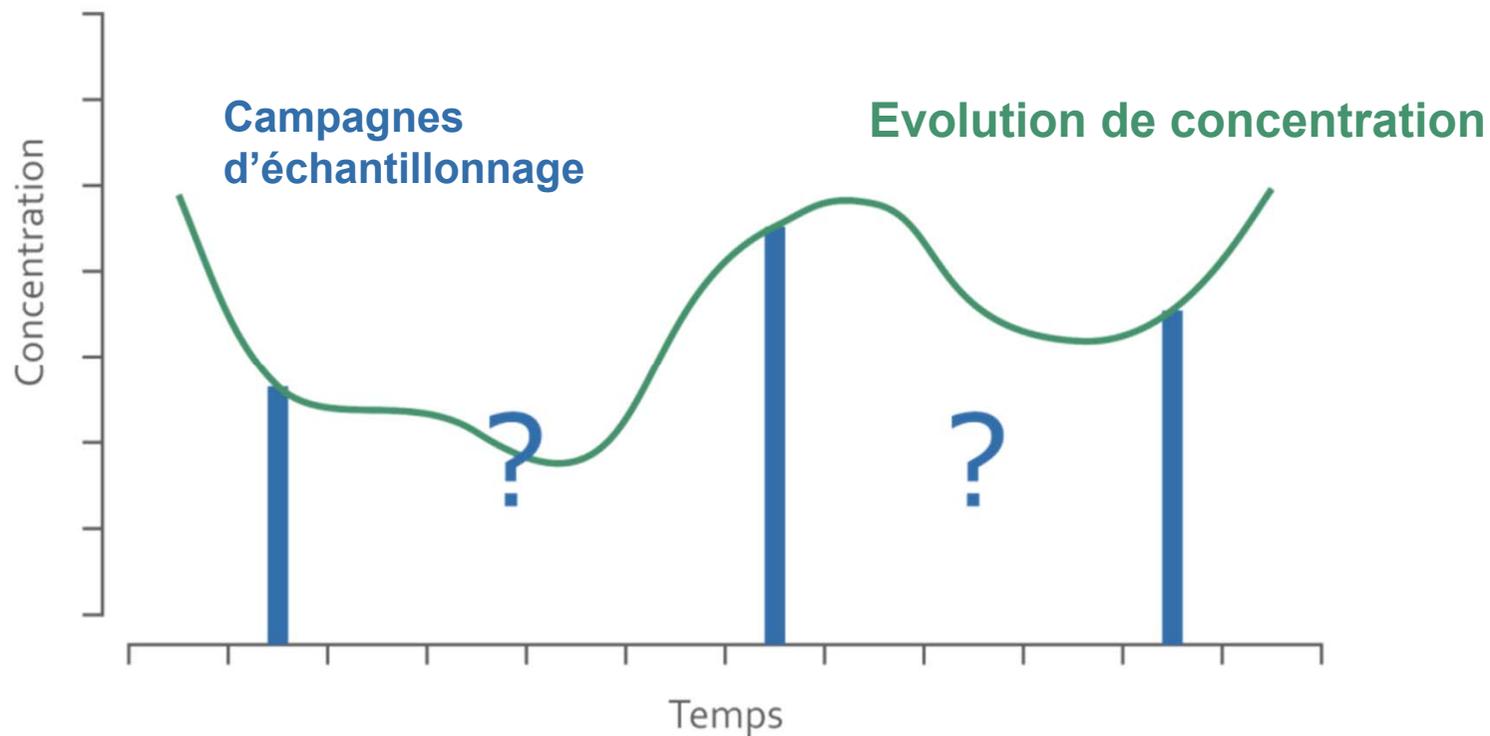


ex: oxydation chimique in situ (ISCO)

Les écoulements souterrains sont transitoires et cela peut aussi affecter la dynamique des polluants et leurs concentrations ...

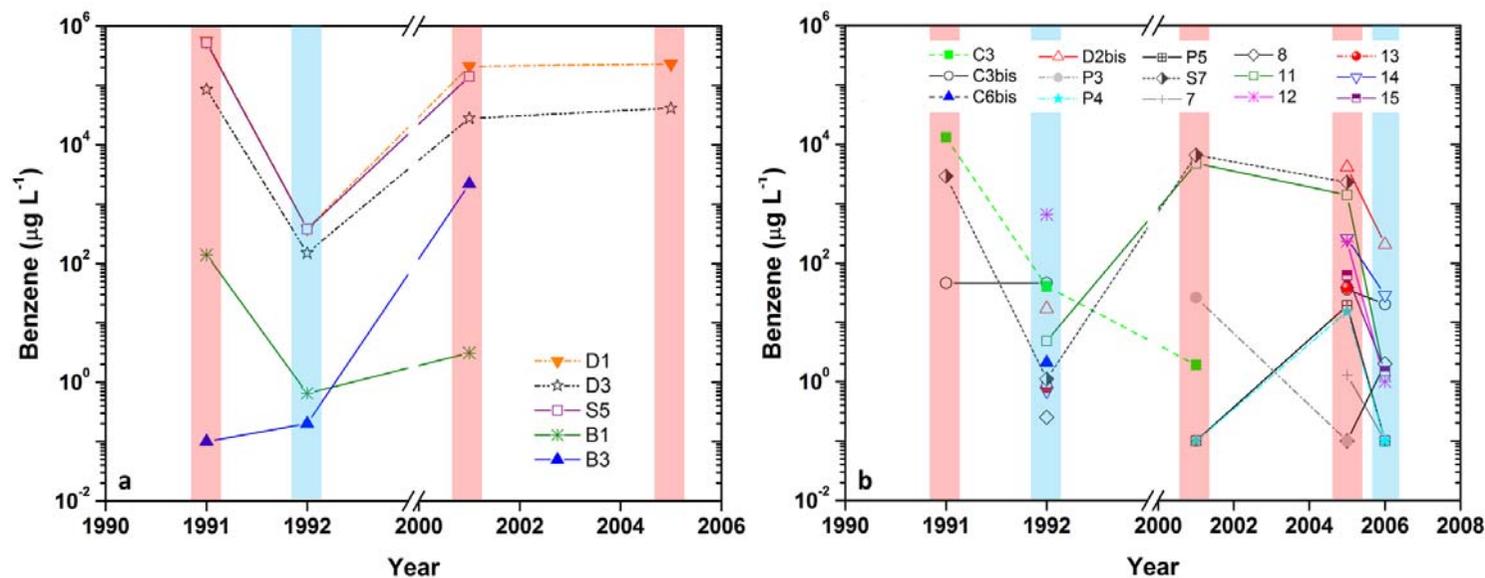
Qu'en est-il de la dynamique temporelle et de la représentativité d'échantillonnages périodiques ?

Quelles sont les alternatives? *Echantillonnage passif?*



Les écoulements souterrains sont transitoires et cela peut affecter la dynamique des polluants et leurs concentrations ...

Les concentrations en benzène varient fortement au cours du temps, à la hausse comme à la baisse, mais sans autres informations, on n'a pas trop d'explication...

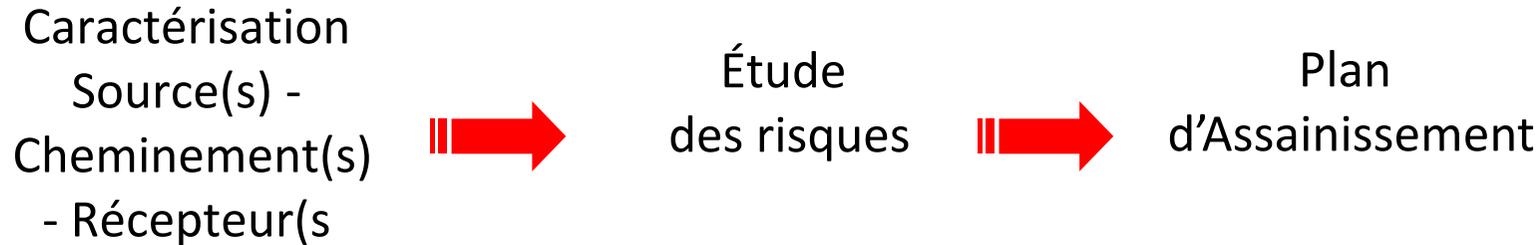


Hypothèse:

En été, cours d'eau à l'étiage → progression vers l'aval du panache de benzène
→ augmentation des concentrations dans les piézos à l'aval des sources

En hiver, crues sur la rivière → intrusion d'eau de surface dans la nappe alluviale
→ régression des panaches de benzène

Premières conclusions découlant de ces exemples ...

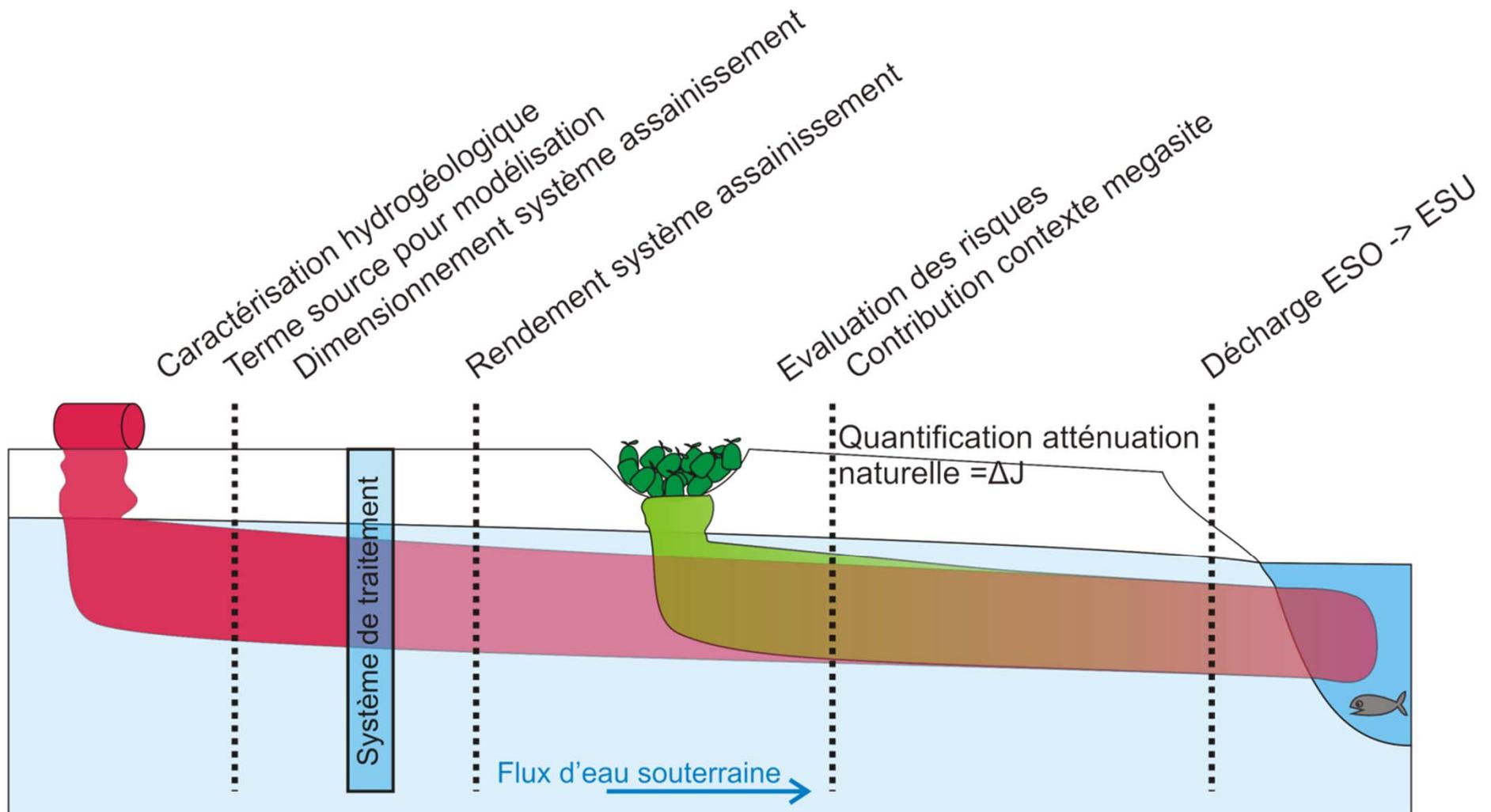


Même si l'on ne peut faire fi des mesures de concentrations, pour aller vers des études de pollution et des projets d'assainissement de l'eau souterraine solides, il y a un réel besoin :

1. D'une quantification précise des **flux d'eau et de polluants** dans le milieu souterrain
2. De la meilleure compréhension possible de la **dynamique temporelle** de ces flux
3. D'une caractérisation précise de **l'hétérogénéité du milieu**, allant de la connectivité des niveaux perméables à la quantité relative des niveaux peu ou moins perméables

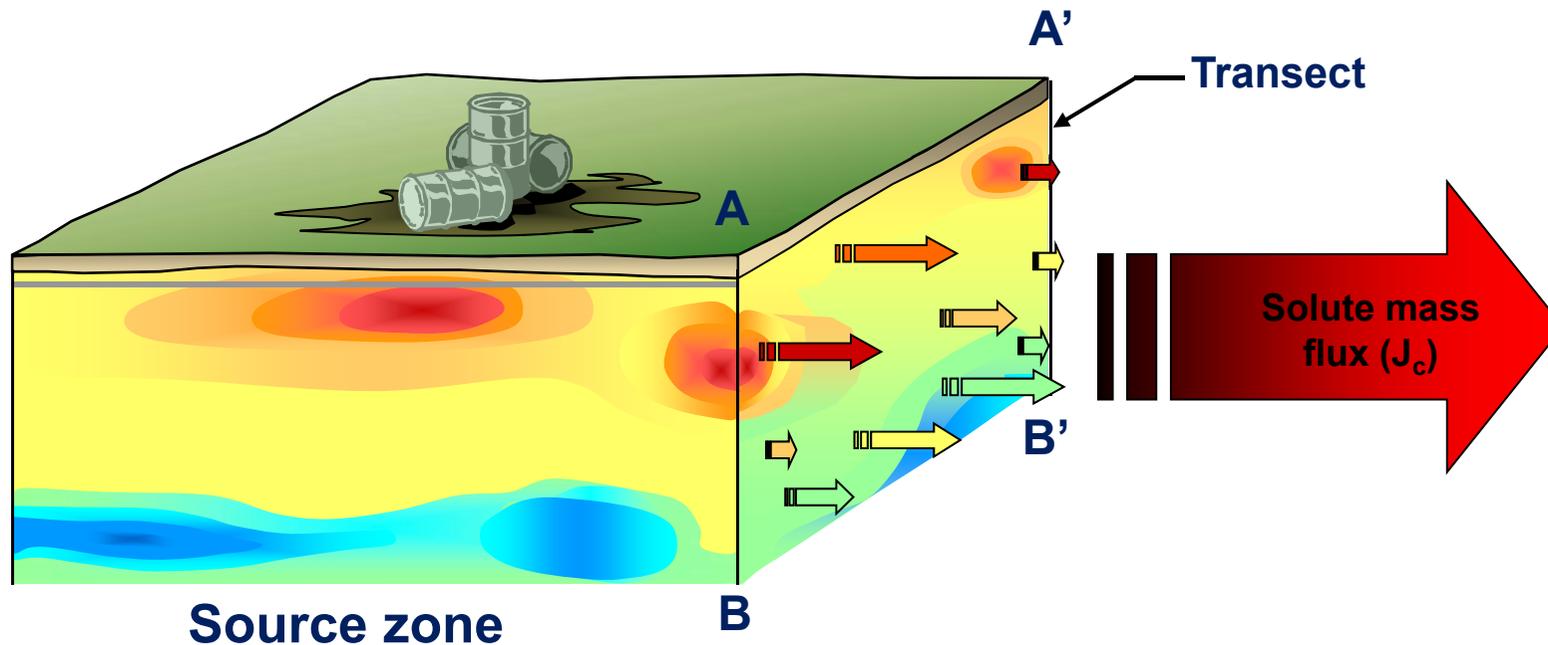
→ **Les techniques de mesures des flux sont susceptibles d'y contribuer de manière significative**

Mesures des flux massiques : intérêt et applications



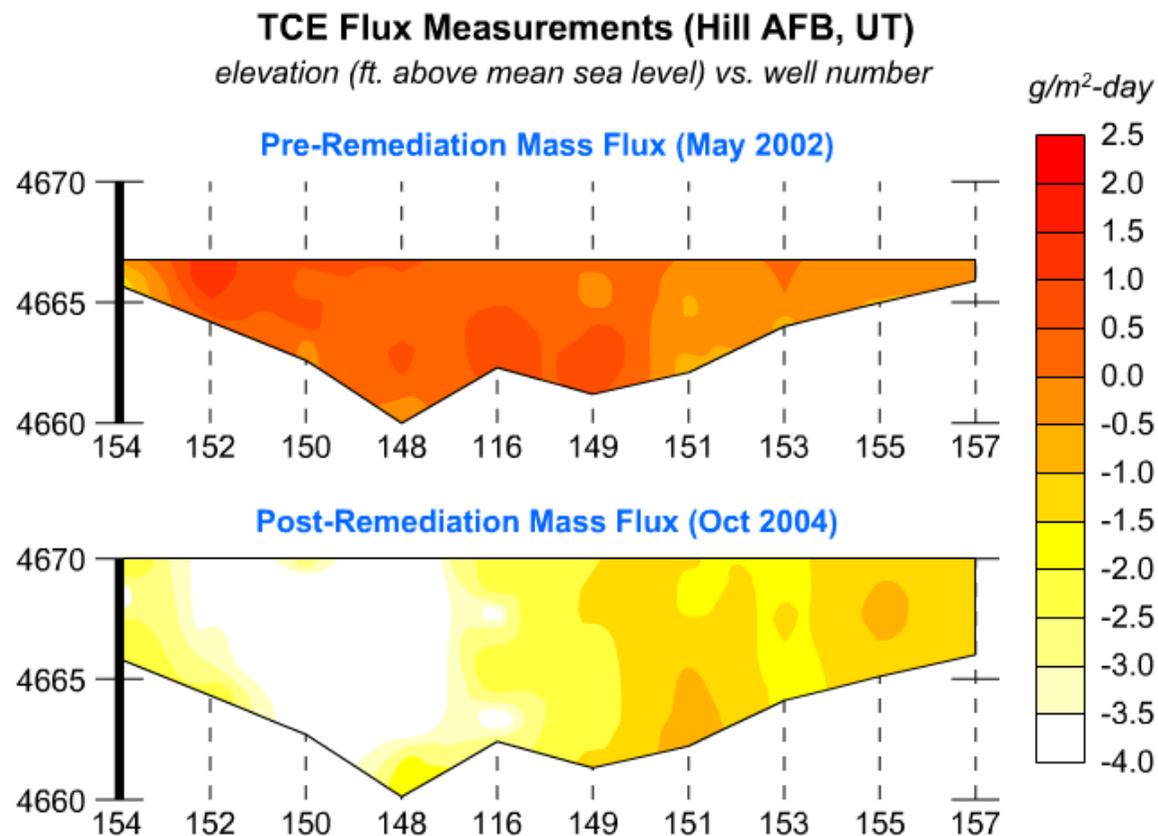
Quantification des flux massiques : différentes approches...

En général, à l'aide d'une série de piézomètres (parfois multi-niveaux) alignés suivant un (ou plusieurs) plan(s) qui recoupe(nt) le panache (panneau de contrôle)



Quantification des flux massiques : différentes approches...

- Comparaison entre panneaux amont et aval
- Comparaison entre mesures effectuées à des moments différents
- Comparaison pré- et post-remédiation



Source
image ? 😞

Quantification des flux massiques : différentes approches...

$$M_d = \int_A J_c dA \approx \sum_{i,j} J_{A_{ij}} \times A_{ij} \quad \rightarrow \text{Échelle du transect}$$

avec $J_{A_{ij}} = q_{D_{ij}} \times C_{ij}$ \rightarrow échelle d'un point de mesure

Mesure directe
du flux massique

Passive
sampling

Mesure directe
du flux d'eau

Méthodes
de dilution

Passive flux
sampling

ou

Estimation
du flux d'eau

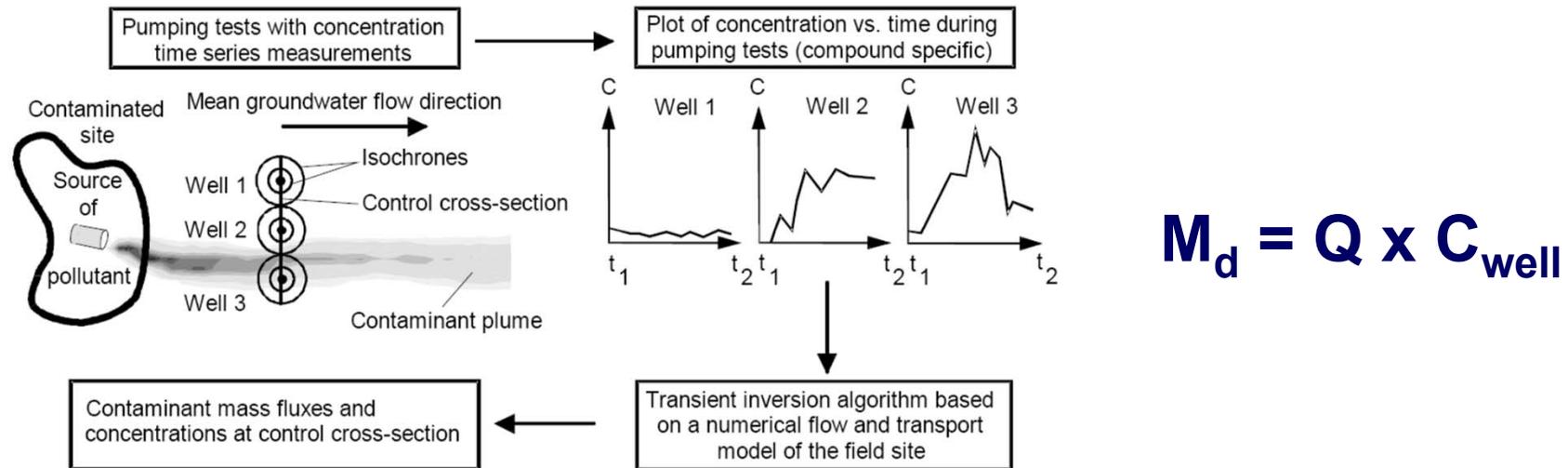
Application
loi de Darcy

Mesure de
la concentration

Mesure du flux massique

Estimation du flux massique

Integral pumping tests



Source:
Ptak et al. ConSoil 2003

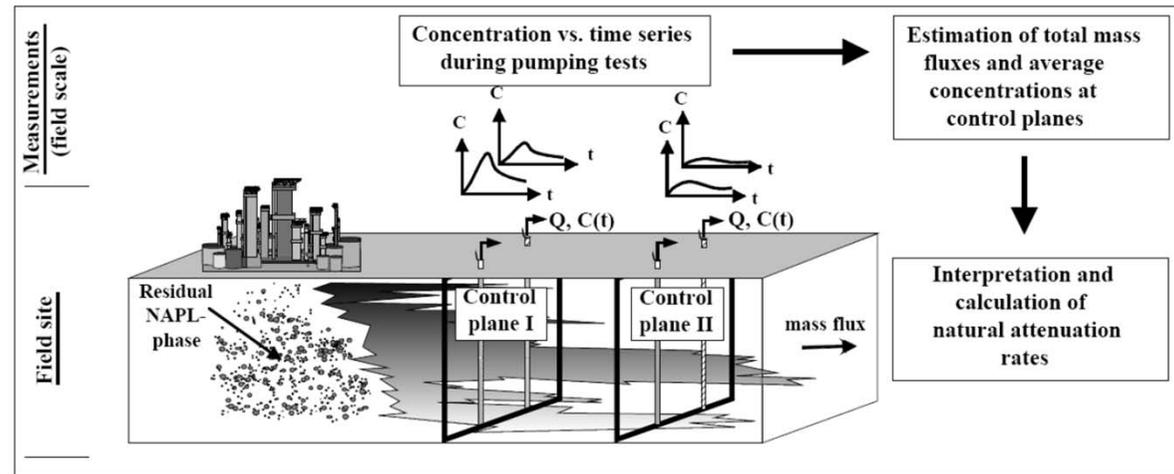
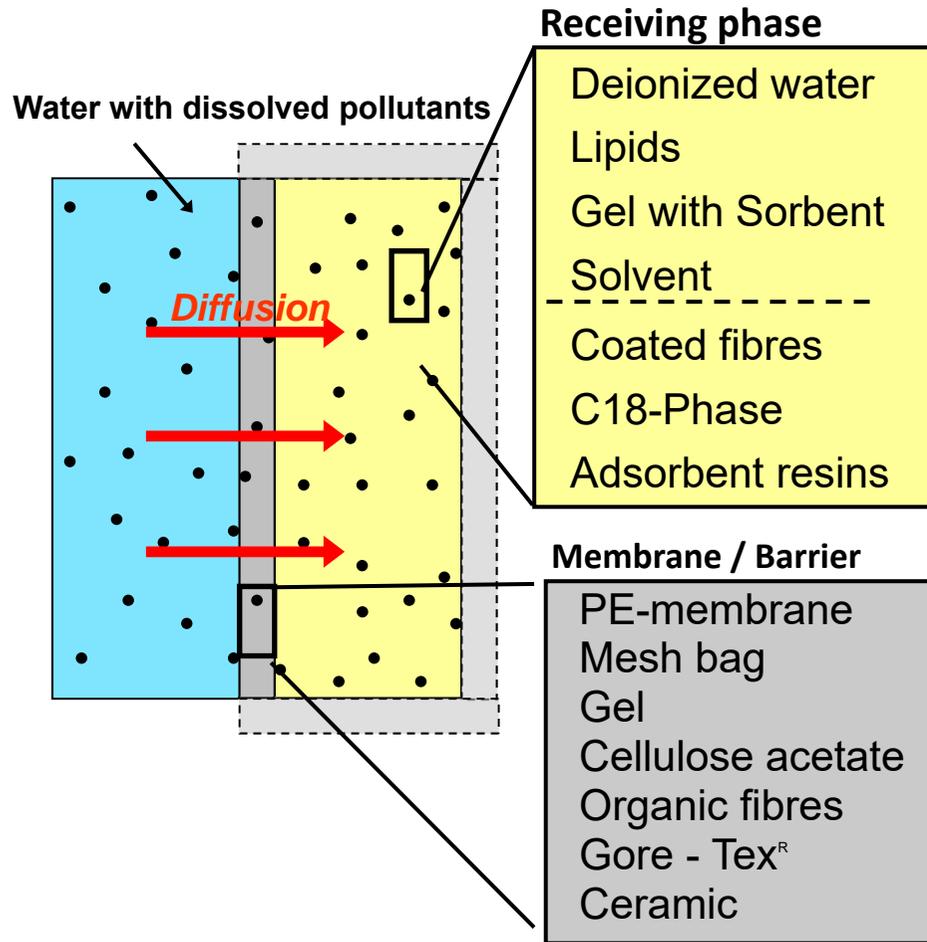
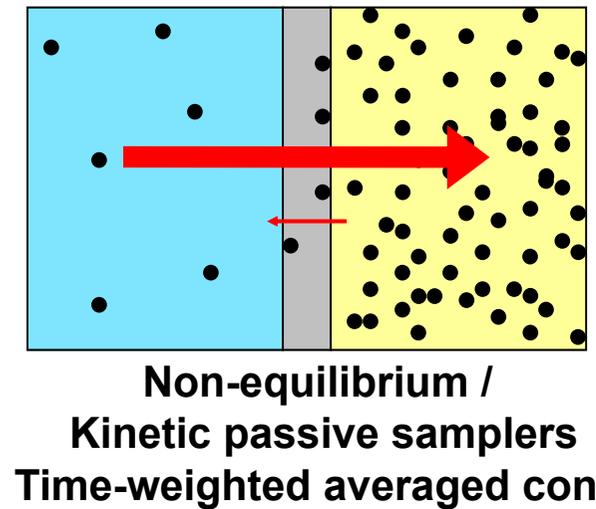
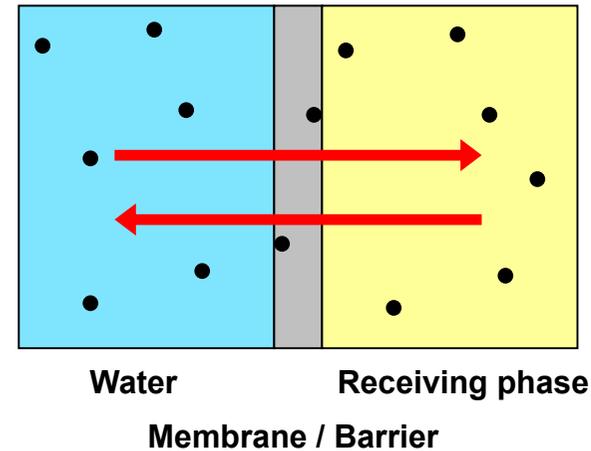


Figure 4: Concept of a multiple control plane approach for the quantification of natural attenuation rate constants at field scale (Bockelmann et al., 2001).

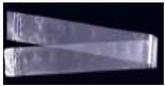
Echantillonneurs passifs



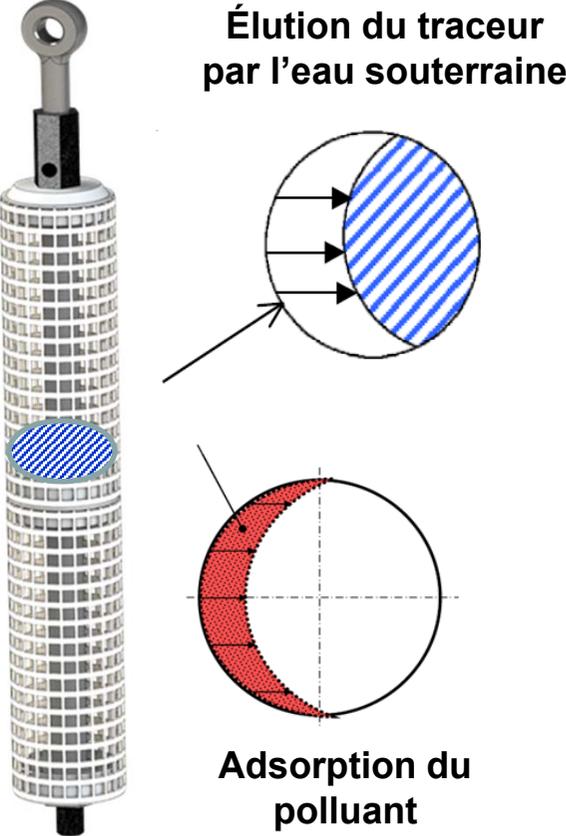
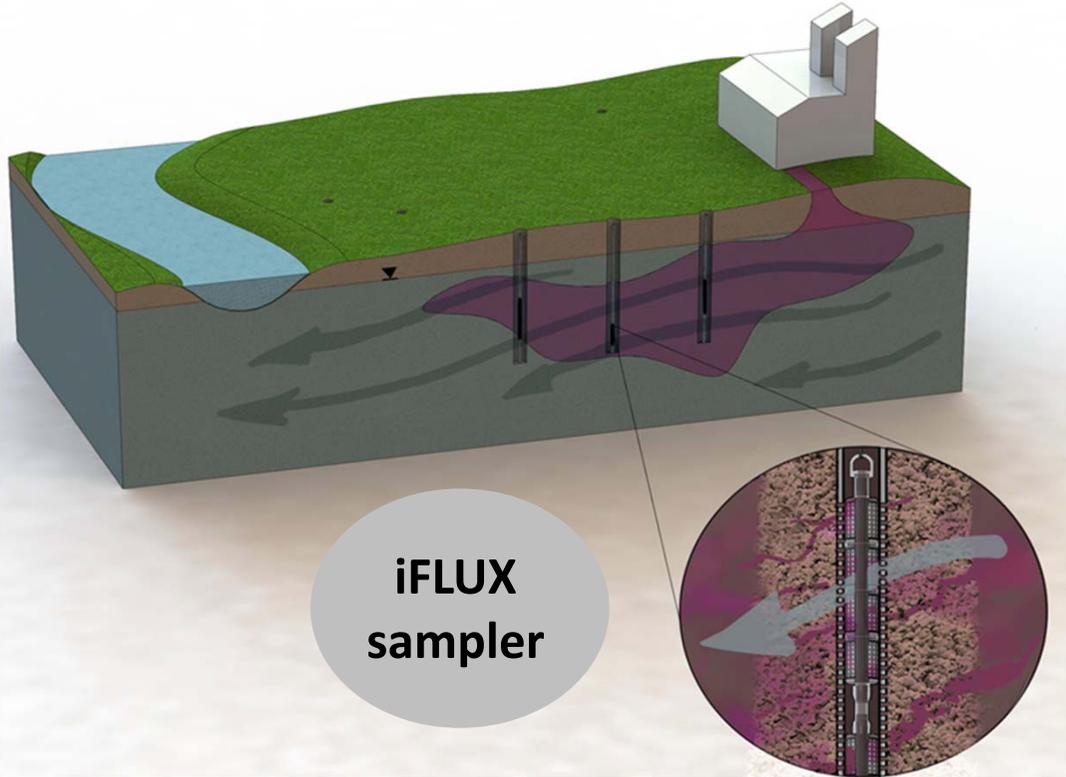
Equilibrium passive samplers



Echantillonneurs passifs

Sampler		Substances	Type	Sampling time
Passiv-Diffusions-Bag (PDB)		High volatile organic compounds VOCs: BTEX, CHCs	equilibrium	min. 2 weeks
Dialysis- Membrane-Sampler (DMS)		Anions, cations, trace metals, explosives, VOCs	equilibrium	1 – 14 days
Ceramic-Dosimeter & Toximeter		PAHs, BTEX, CHCs & toxicity level	TWA	weeks - months
Semi-Permeable-Membran-Device (SPMD)		Hydrophobic, semi-volatile organic compounds	TWA	about 1 month
MESCO (Membrane Enclosed Sorptive Coating)		Hydrophobic organic compounds: PAHs, PCBs, Organochloro pesticides	TWA	2 weeks
Chemcatcher		Polar and non-polar organics	TWA	2 – 4 weeks
POCIS (Polar Organic Chemical Integrative Sampler)		Herbicides and pharmaceuticals	TWA	2 days – 2 months

Passive flux samplers (iFlux technology)

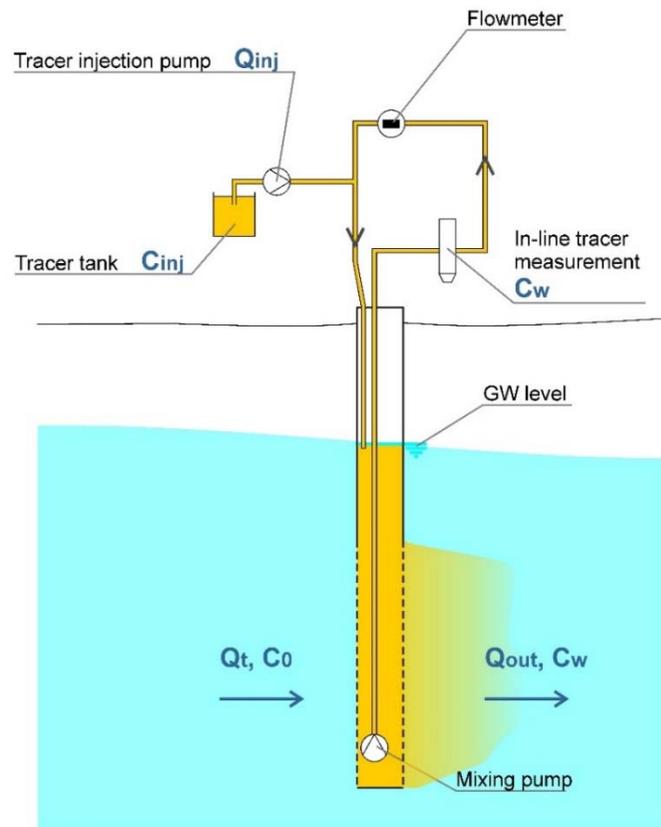


The Finite Volume Point Dilution Method (FVPDM): basic setup

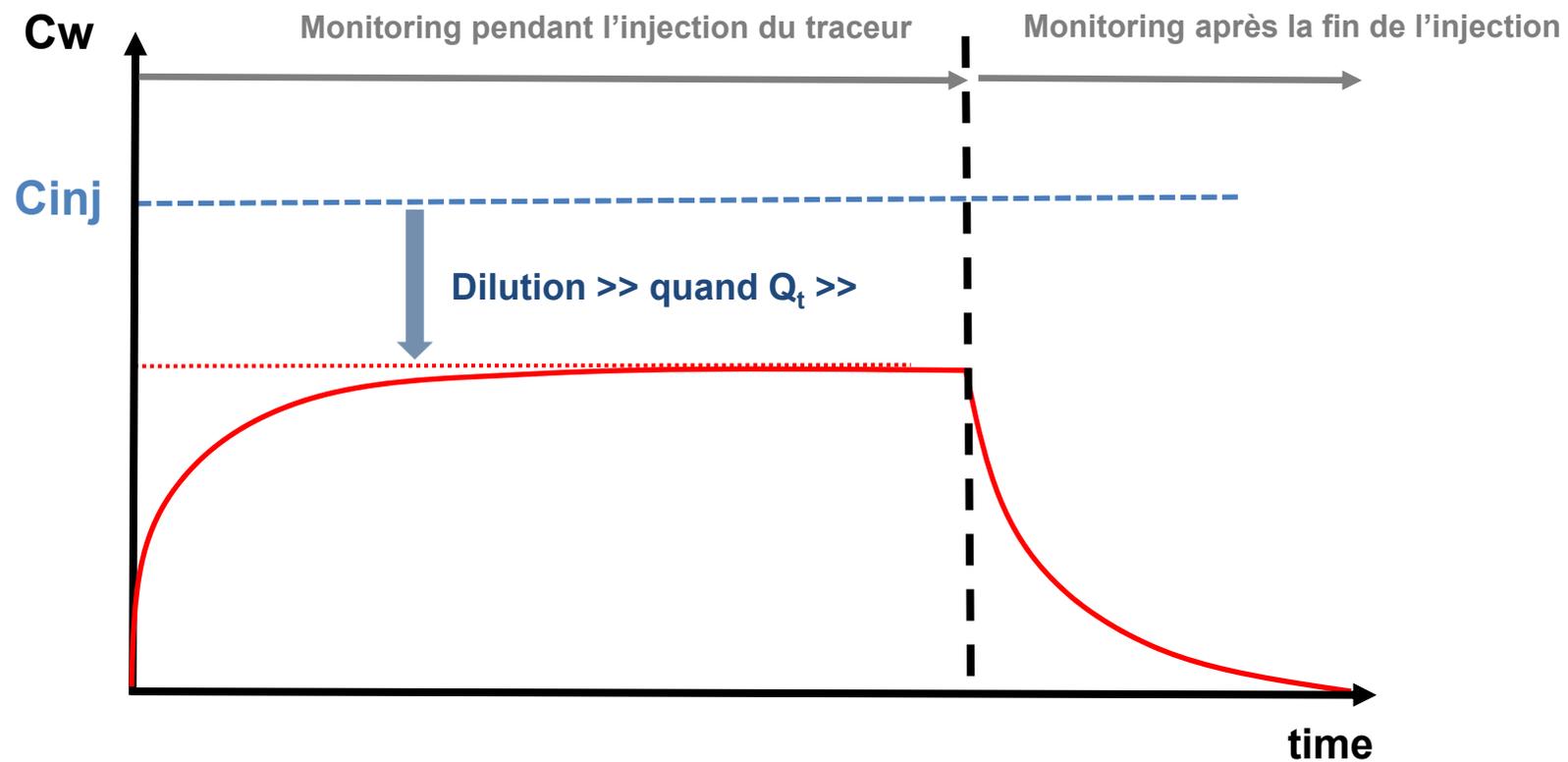
Généralisation de la méthode de dilution ponctuelle (PDM)

[Brouyère *et al.* 2008, J. Cont. Hydrol.]

Différence clé: le traceur est injecté en continu, à un faible débit constant



The Finite Volume Point Dilution Method (FVPDM): 3 étapes



L'évolution de concentration est calculée sur base d'un bilan de masse du traceur au niveau du puits testé

Bilan en eau

+ de détails dans Brouyère (2001) et Brouyère et al. (2008)

$$\frac{\partial V_w(t)}{\partial t} = \pi r_w^2 \frac{\partial h_w}{\partial t} = Q_{inj}(t) + Q_t(t) - Q_{out}(t)$$

Bilan en traceur

$$\frac{\partial M_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (V_w C_w) = r_w^2 \left(C_w \frac{\partial h_w}{\partial t} + h_w \frac{\partial C_w}{\partial t} \right) = Q_{inj} C_{inj} + Q_t C_t - Q_{out} C_{out}$$

Evolution de concentration dans le forage testé

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

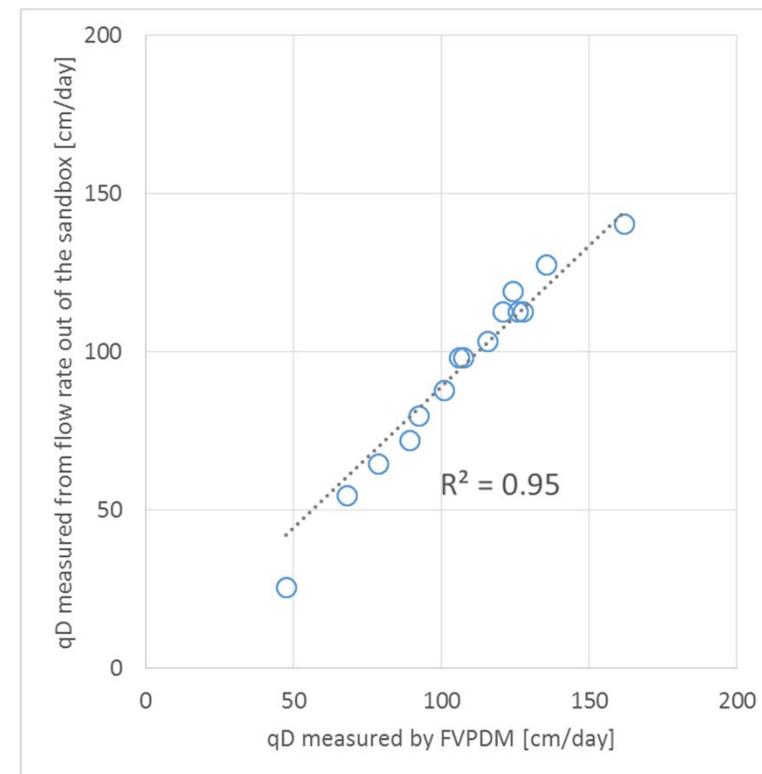
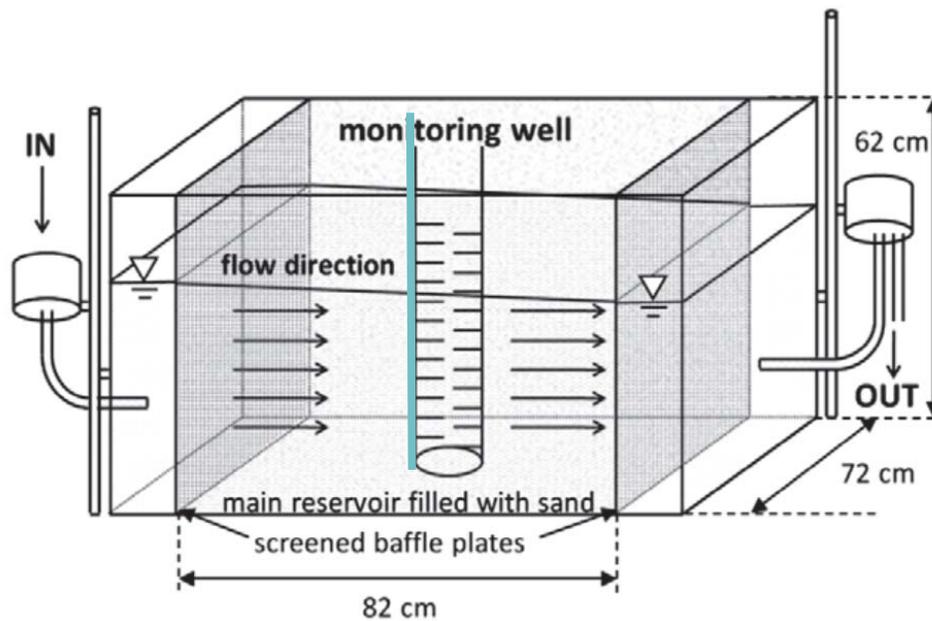
$$Q_t = Q_{out} - Q_{inj}$$

Validation : Mesures de flux avec la FVPDM sur un « bac à sable »

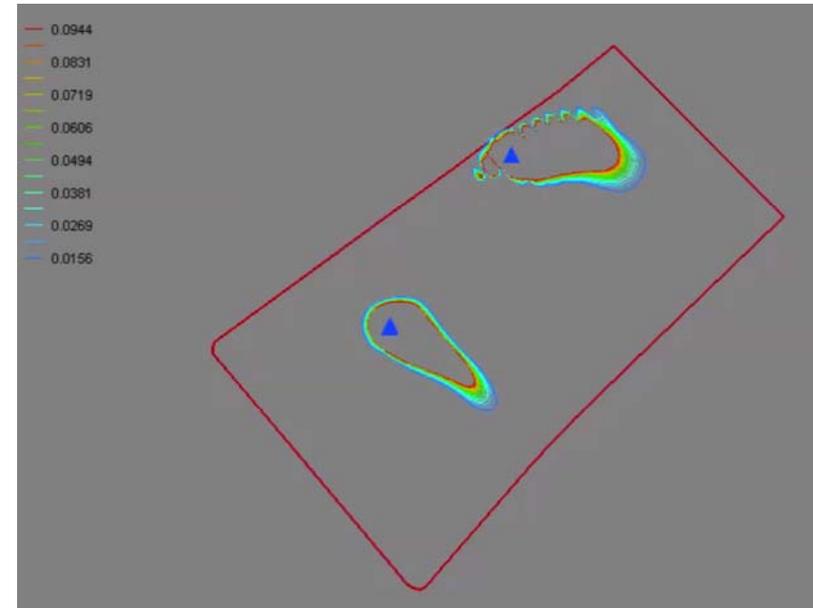
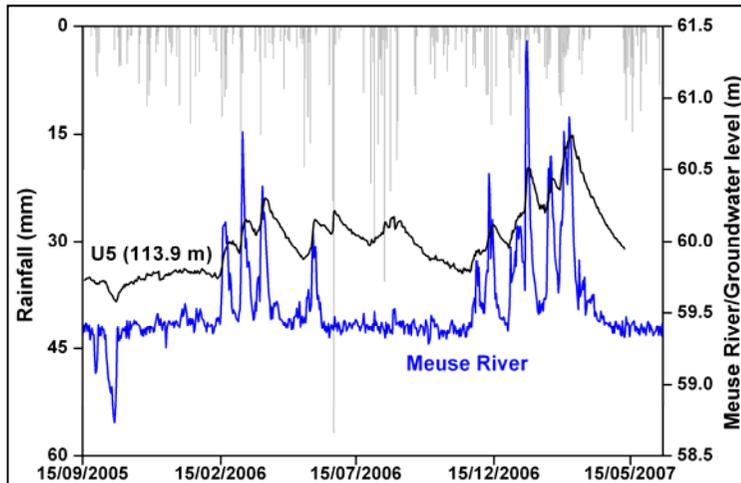
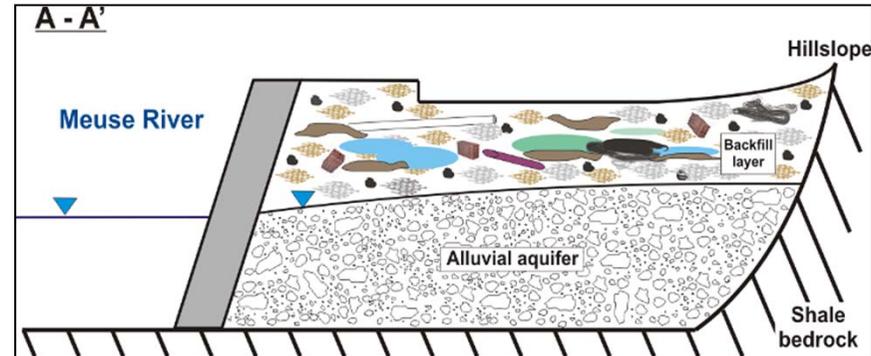
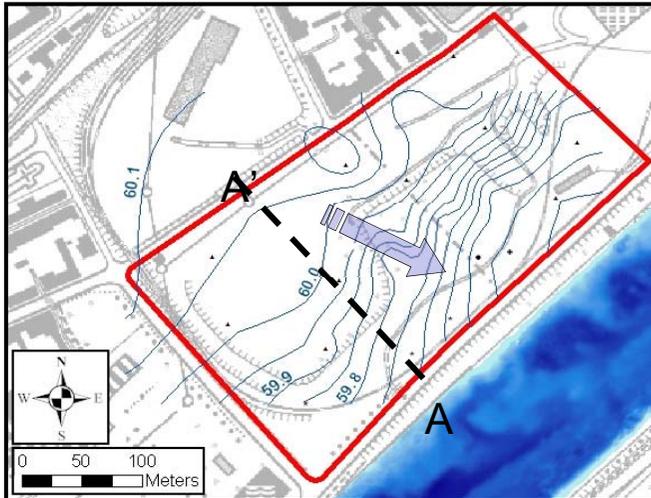
Essais FVPDM dans des conditions d'écoulement contrôlées sur un modèle réduit

Validation pour des flux d'eau entre 0.40 to 1.6 m/j

(Flow field distortion of the monitoring well 1.7 according to Verreydt et al. 2014, Groundwater)

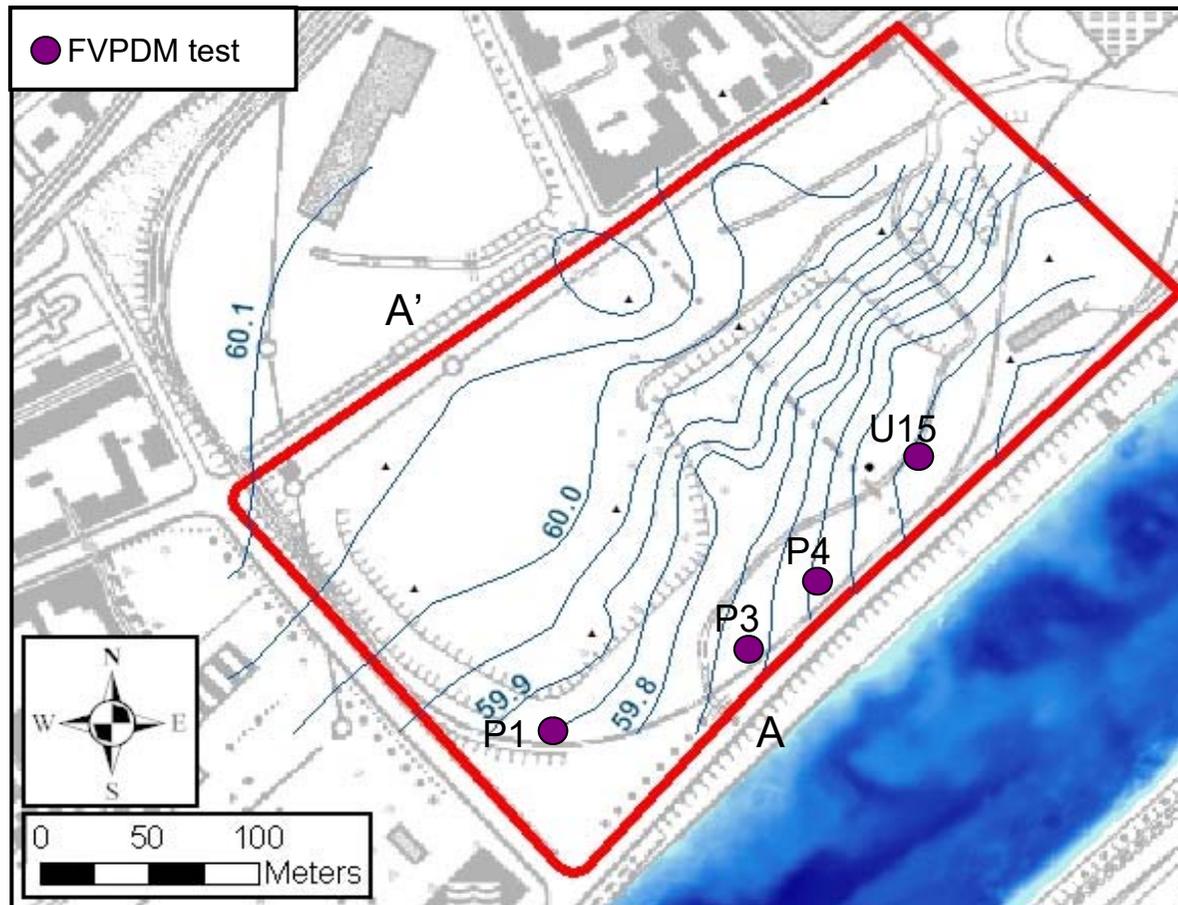


1^{er} case study en Belgique: Friche industrielle (ancienne cokerie) en bord de rivière (pollution benzène)

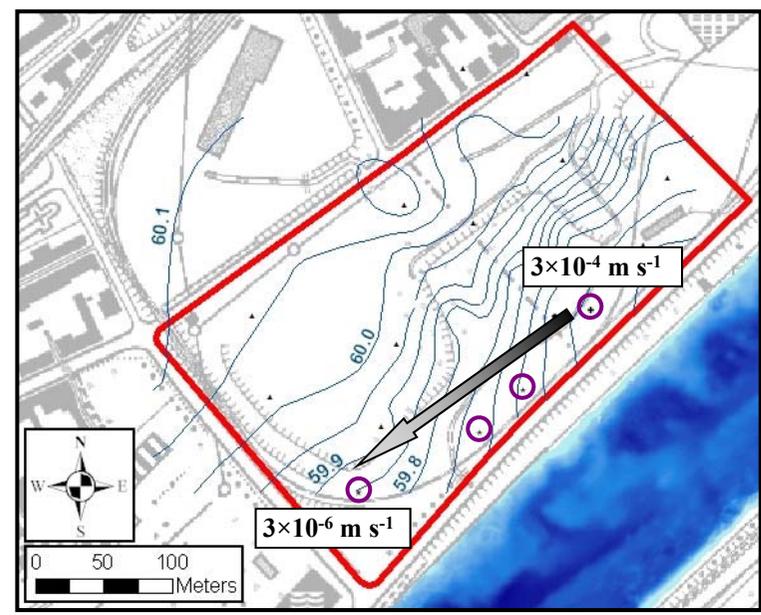
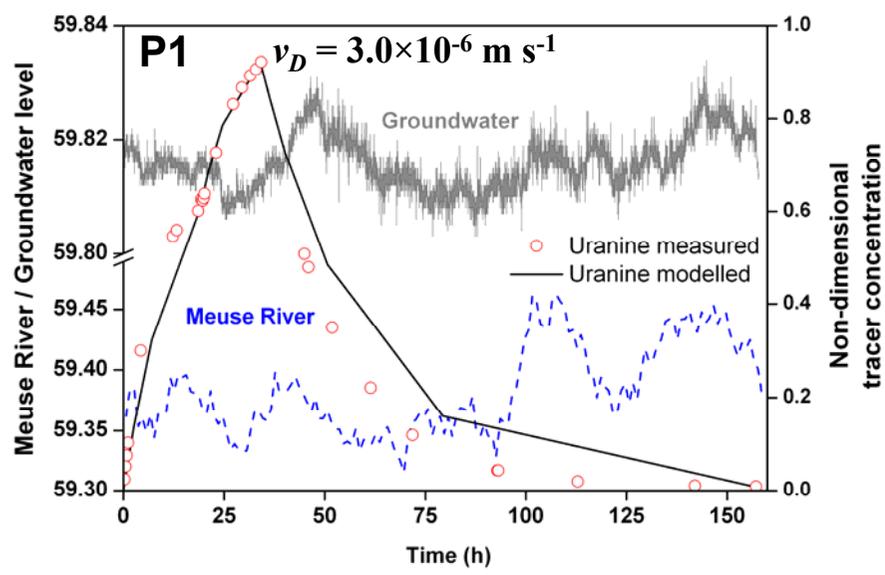
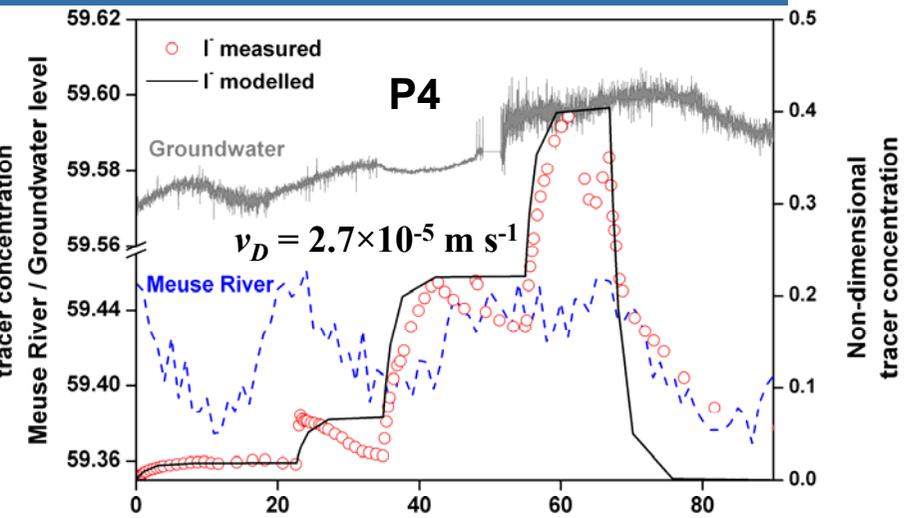
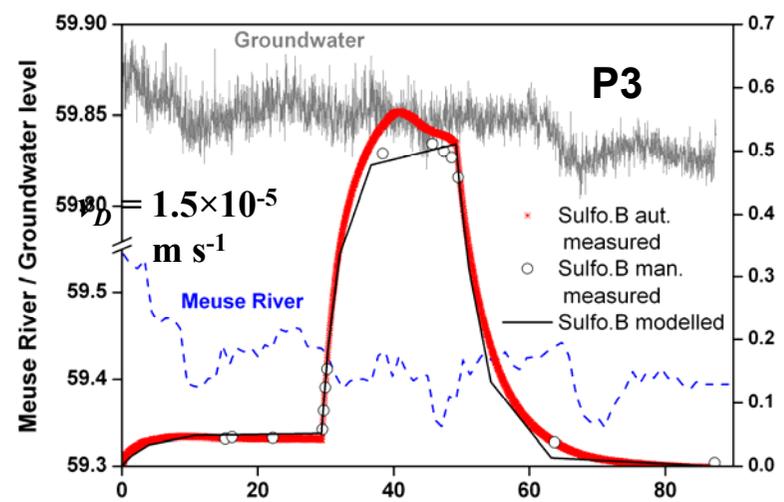


1^{er} case study en Belgique: Friche industrielle (ancienne cokerie) en bord de rivière (pollution benzène)

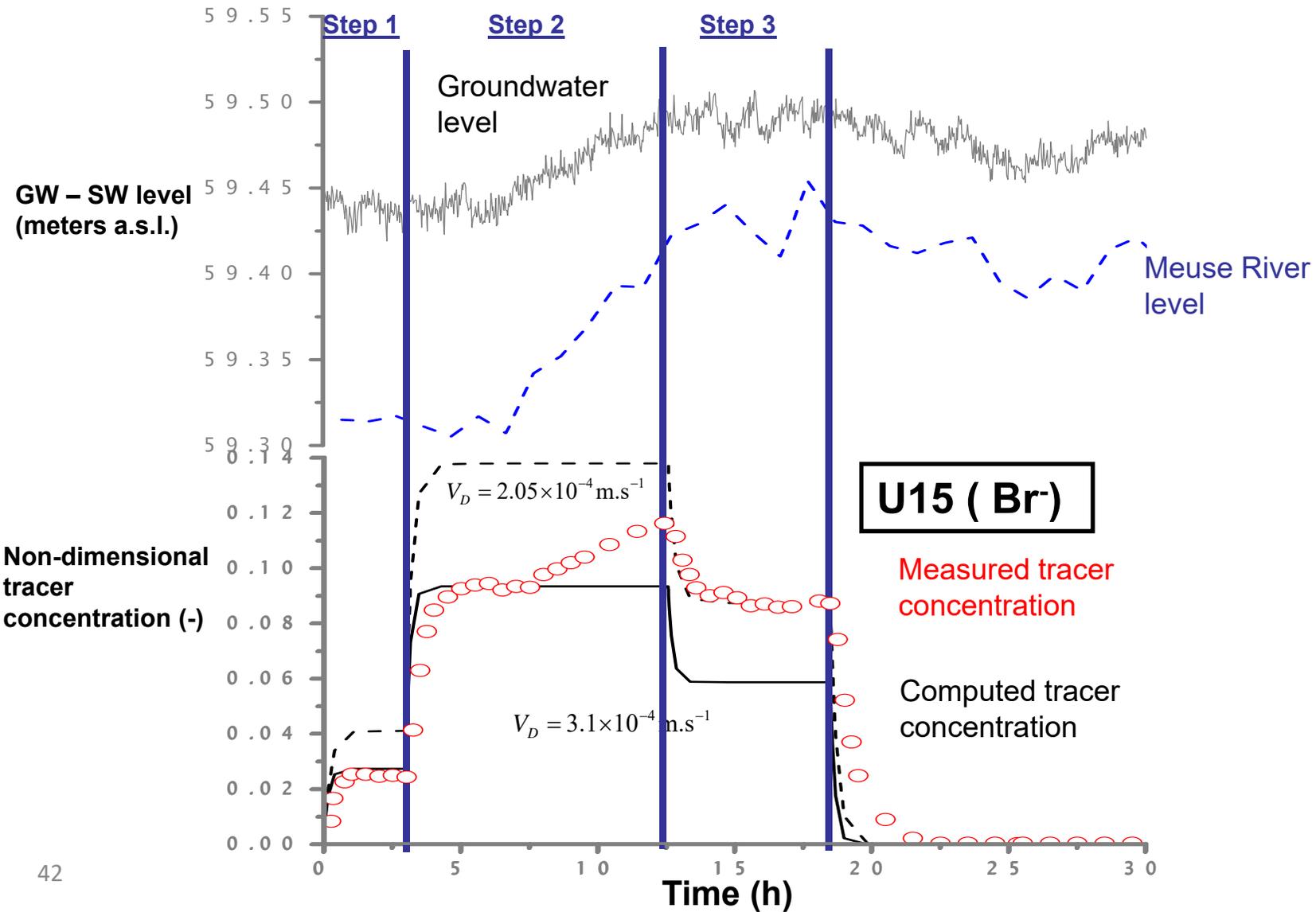
Objectif: mesurer des flux d'eau souterraine en bordure du site pour quantifier les échanges nappe-rivière



1^{er} case study en Belgique: Friche industrielle (ancienne cokerie) en bord de rivière (pollution benzène)



La FVPDM permet également de suivre des variations temporelles des flux d'eau souterraine ...



L'échelle de mesure des flux est fondamentale!

Finite Volume Point Dilution Method (FVPDM)

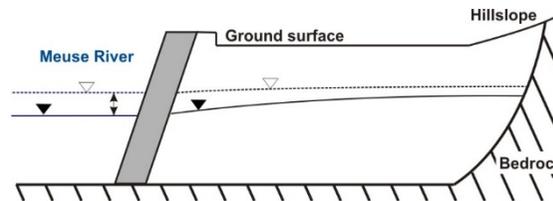
$3.0 \times 10^{-6} \rightarrow 3.0 \times 10^{-4}$
 m.s^{-1}



- local measure,
- direct estimation,
- poor aquifer integration,
- poor heterogeneity,
- monitoring changes of Darcy flux.

STWT1 (analytical modelling)

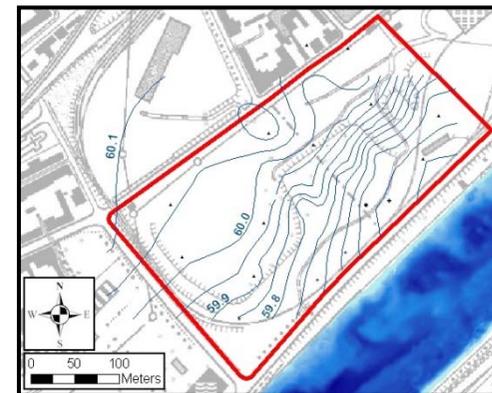
$1.2 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$



- orthogonal transect,
- indirect estimation,
- poor heterogeneity,
- mean value of Darcy flux,
- changes on seepage rate and direction.

Darcy's law (hydraulic gradient)

$2.3 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$



- aquifer integration,
- indirect estimation,
- poor heterogeneity,
- global mean value of Darcy flux.

EXEMPLES D'APPLICATIONS DE LA FVPDM

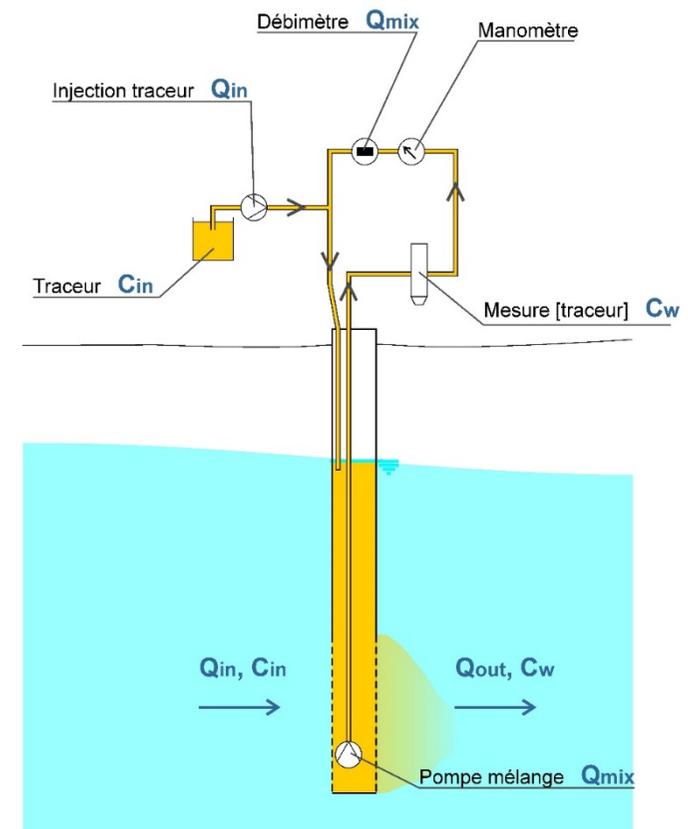
Pierre Jamin

FVPDM : setup expérimental classique

Injection de traceur en continu dans un piézomètre

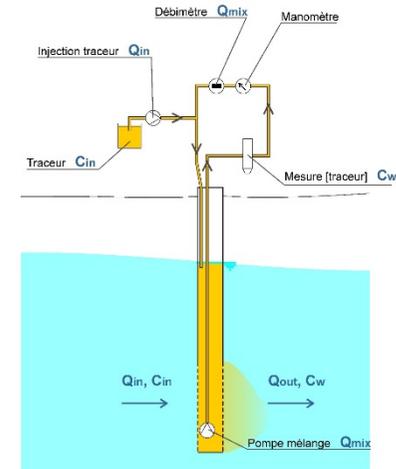
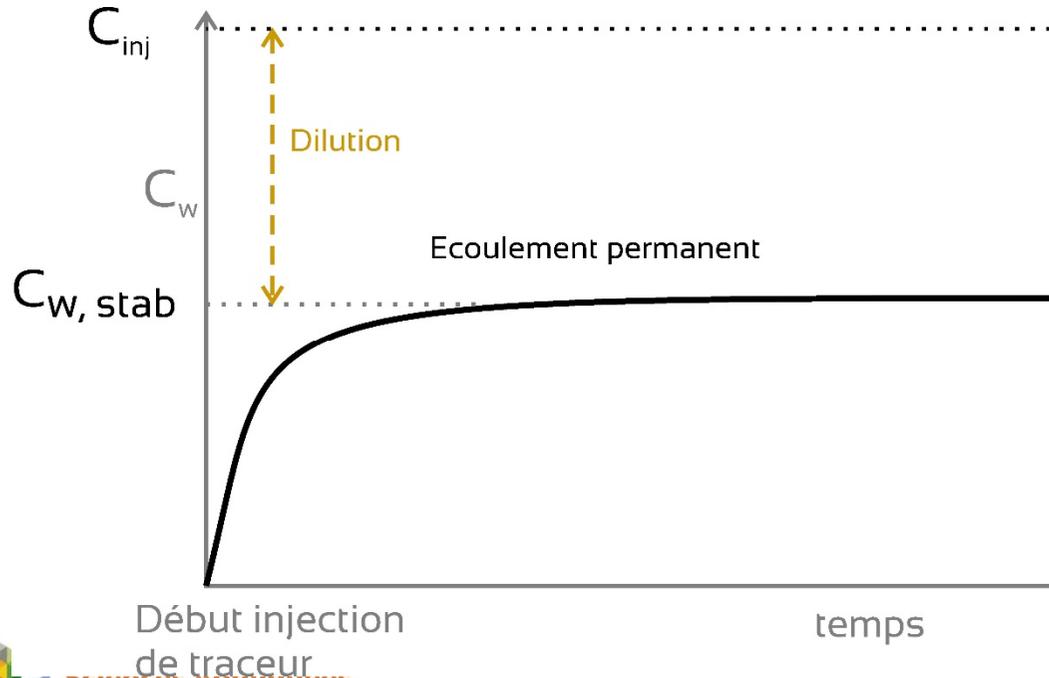
Mélange de la colonne d'eau pour homogénéiser la concentration en traceur

Monitoring en continu de la concentration en traceur



FVPDM : mesure du flux d'eau souterraine

Augmentation de la concentration en traceur jusqu'à un équilibre entre le traceur injecté et le traceur lessivé par l'eau souterraine qui traverse les crépines.

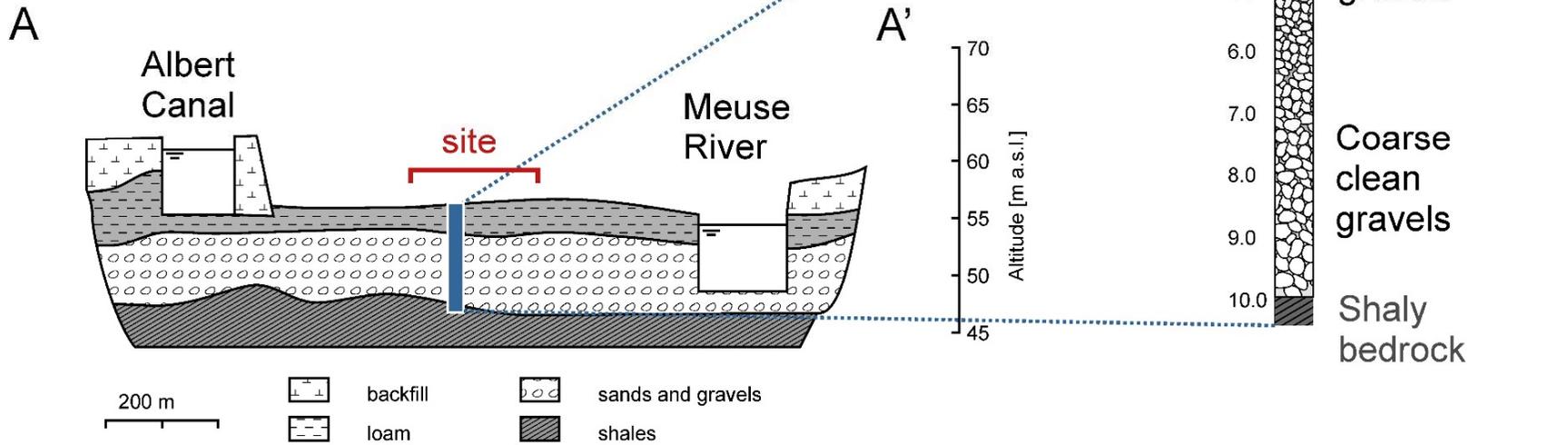
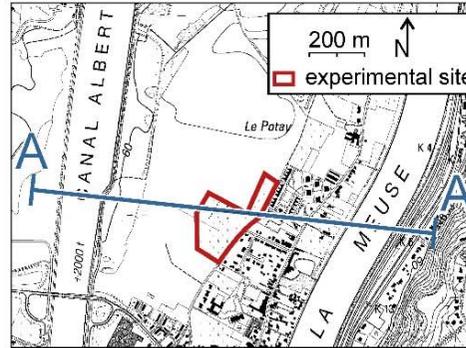
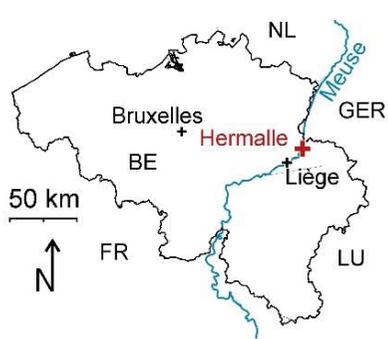


Application 1 : Hermalle sous Argenteau

Suivi d'un essai de pompage dans un aquifère alluvial



Contexte : Plaine alluviale typique



Setup : Essai de pompage par paliers suivi par FVPDM

1 puits de pompage 6'' + Δh

2 Pz suivi par FVPDM + Δh

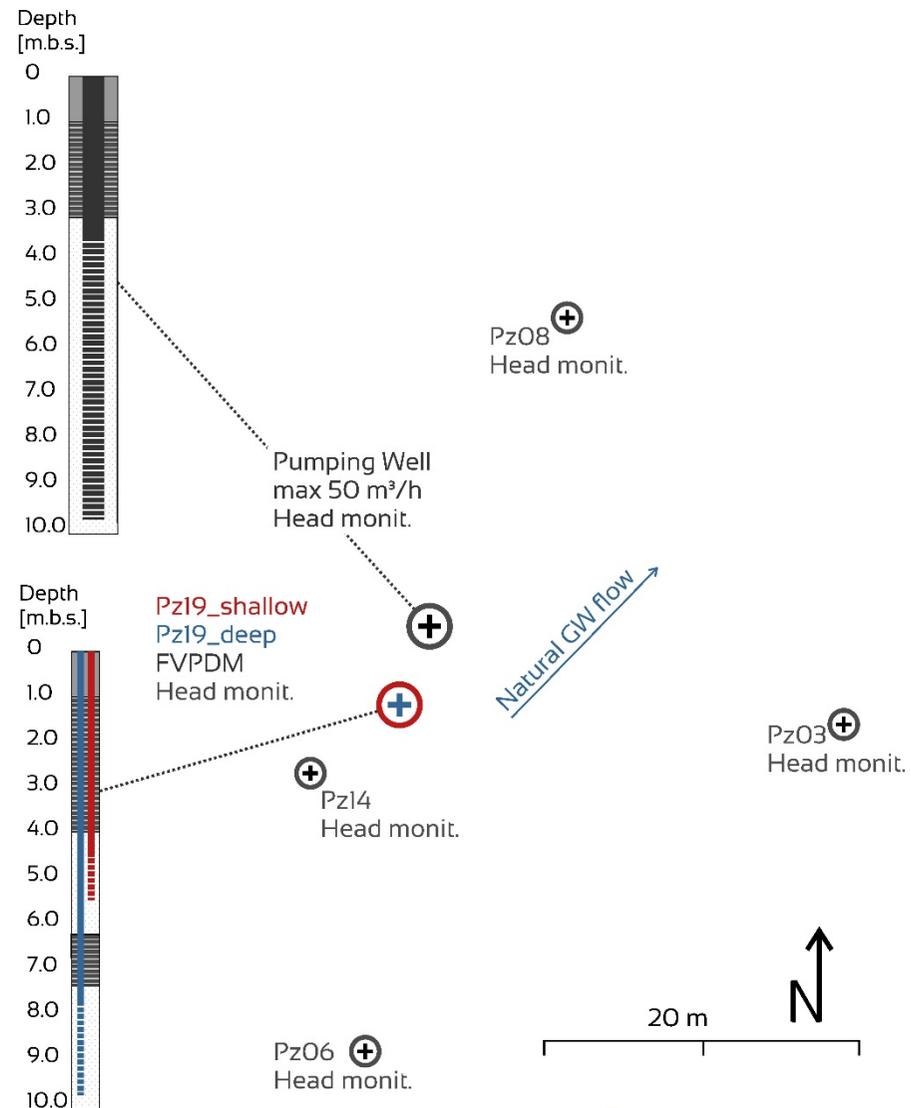
Double tubage

Pz19 surface et profond

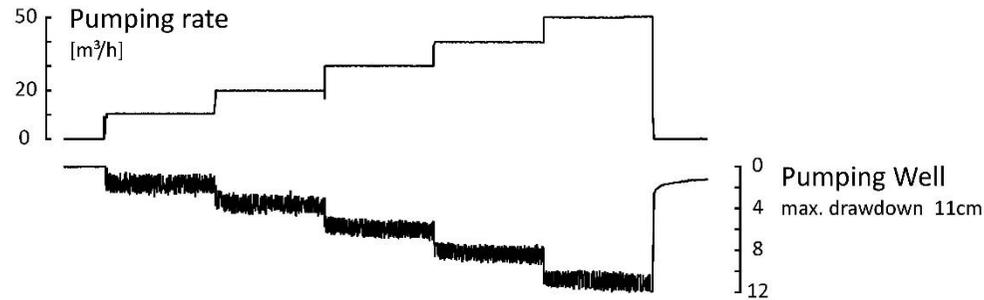
4 Pz Δh

Essai de pompage par paliers de
10 m³/h pendant 2h.

0 à 50 m³/h + remontée

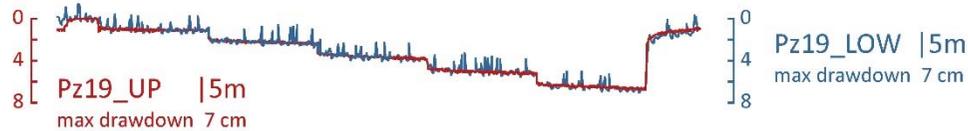


1^{ère} interprétation : Rabattements, conductivité hydraulique

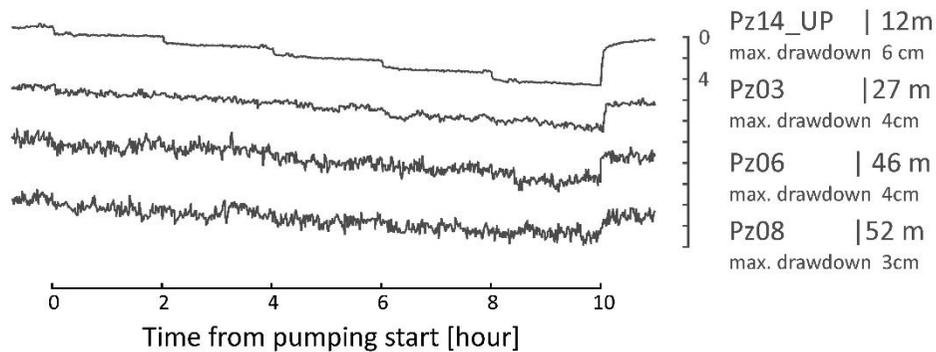


Rabattement
max 11 cm au PP

$$K_{\text{Dupuit}} = 3.26 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

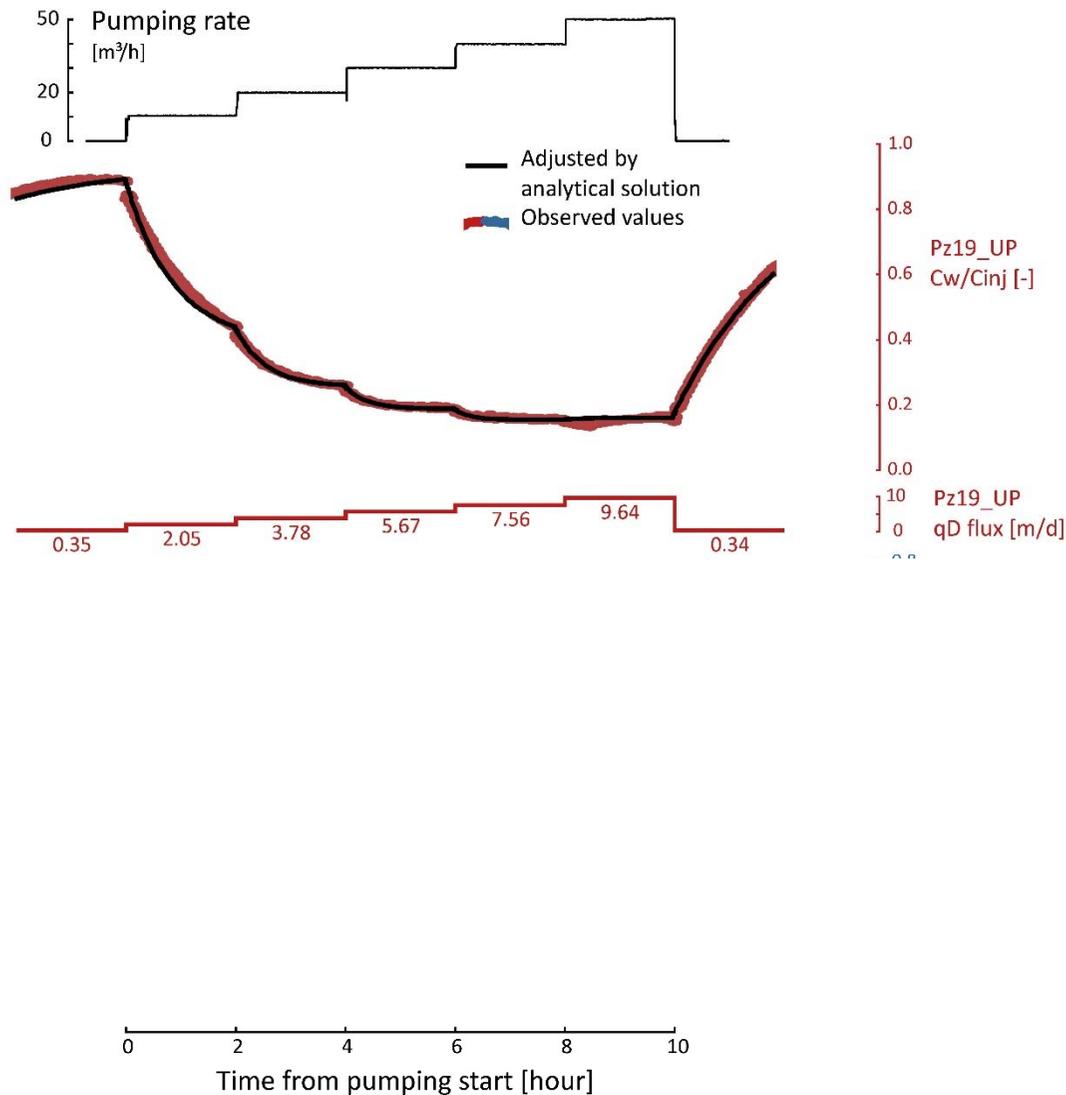


Rabattements Pz19
surface et profond
identiques



-> Aquifère homogène
verticalement ...?

2^{ème} interprétation : apport d'une information de type flux

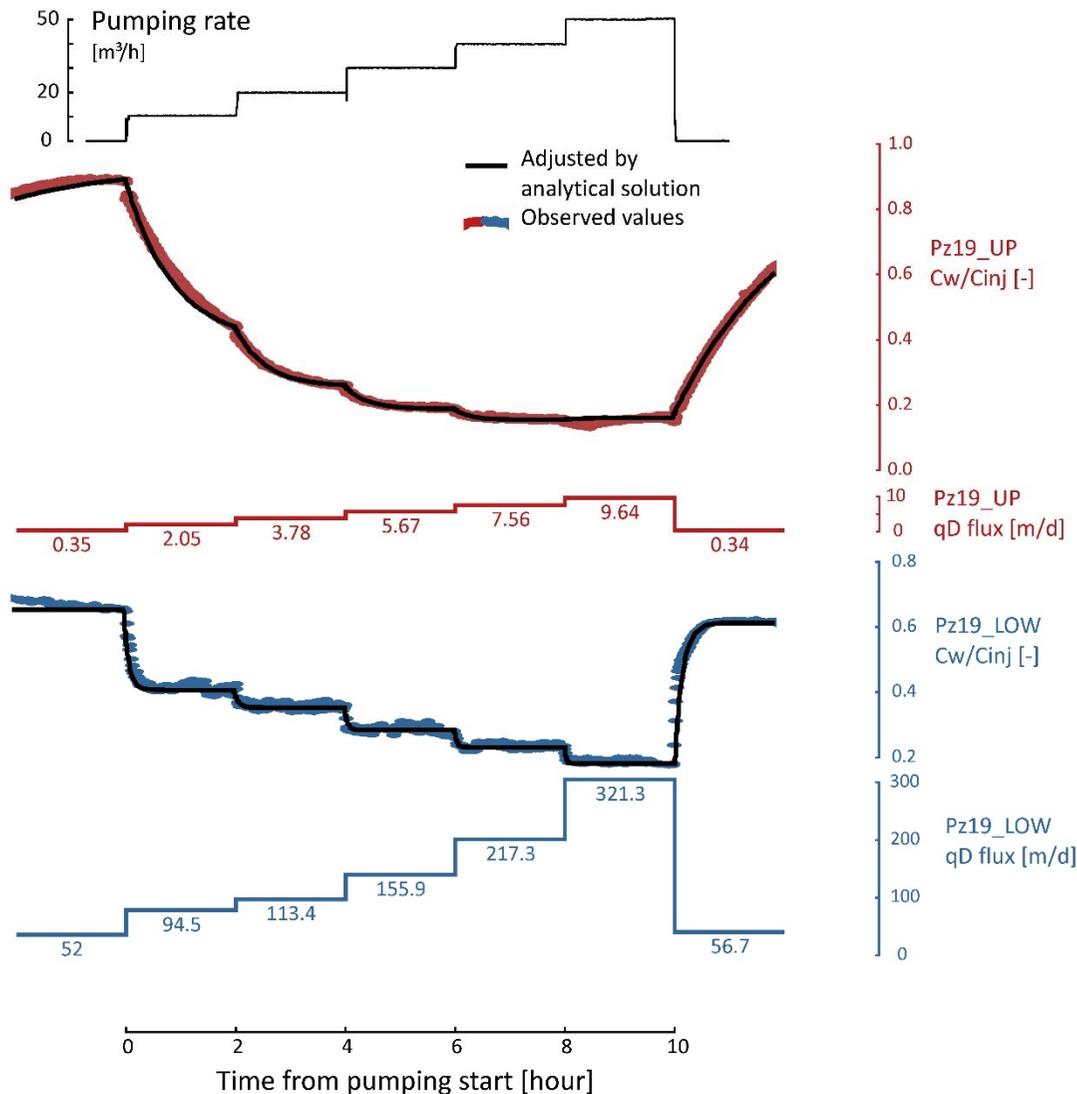


Pz19 surf

0.35 m/d sans pompage

9.64 m/d à pompage max

2^{ème} interprétation : apport d'une information de type flux



FVPDM : evolution des concentrations très différentes entre surf/prof

Pz19 surf

0.35 m/d sans pompage

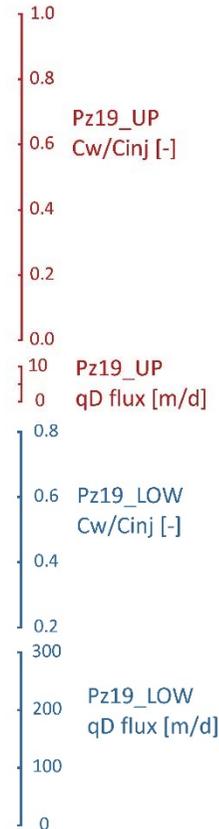
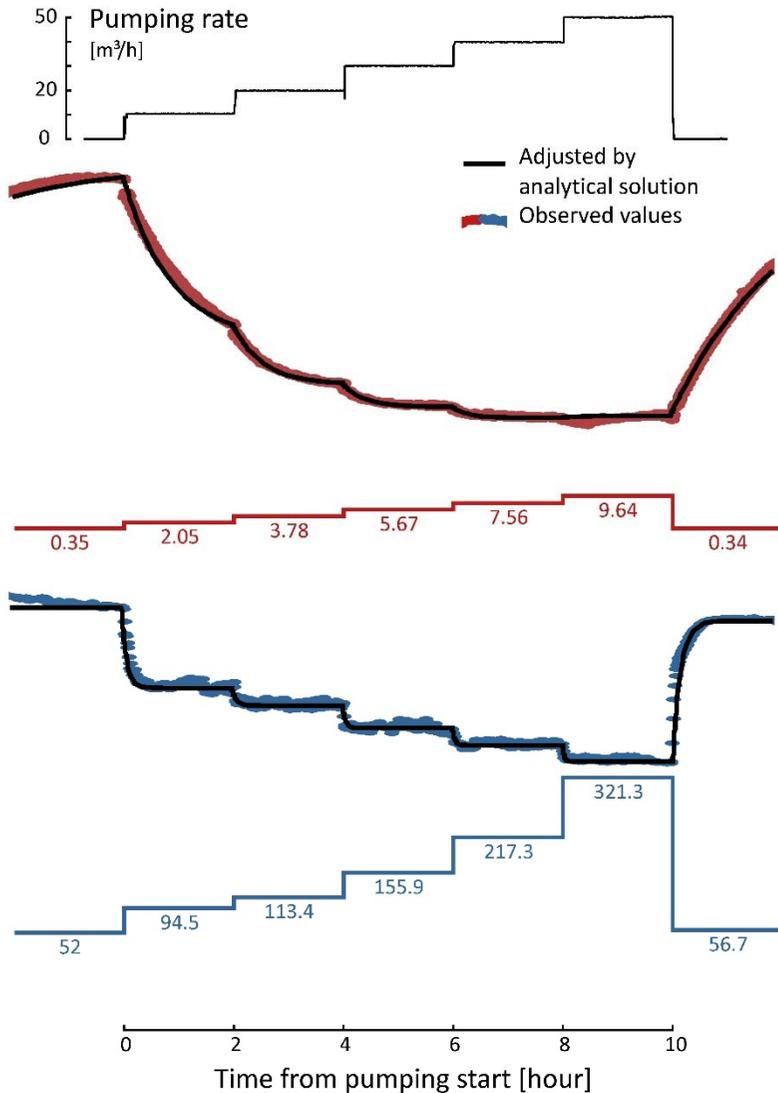
9.64 m/d à pompage max

Pz19 prof

52 m/d sans pompage

321 m/d à pompage max

2^{ème} interprétation : apport d'une information de type flux



FVPDM : evolution des concentrations très différentes entre surf/prof

Pz19 surf

0.35 m/d sans pompage

9.64 m/d à pompage max

Pz19 prof

52 m/d sans pompage

321 m/d à pompage max

-> Aquifère très hétérogène verticalement

iFLUX : Comparaison FVPDM / iFLUX



Setup expérimental identique avec
pompage à $30 \text{ m}^3/\text{h}$

Testé sur les 22 piézomètres du site
HssA

Résultats identiques en termes de
flux d'eau souterraine pour les
piézomètres de surface. $qD < 5 \text{ m/d}$

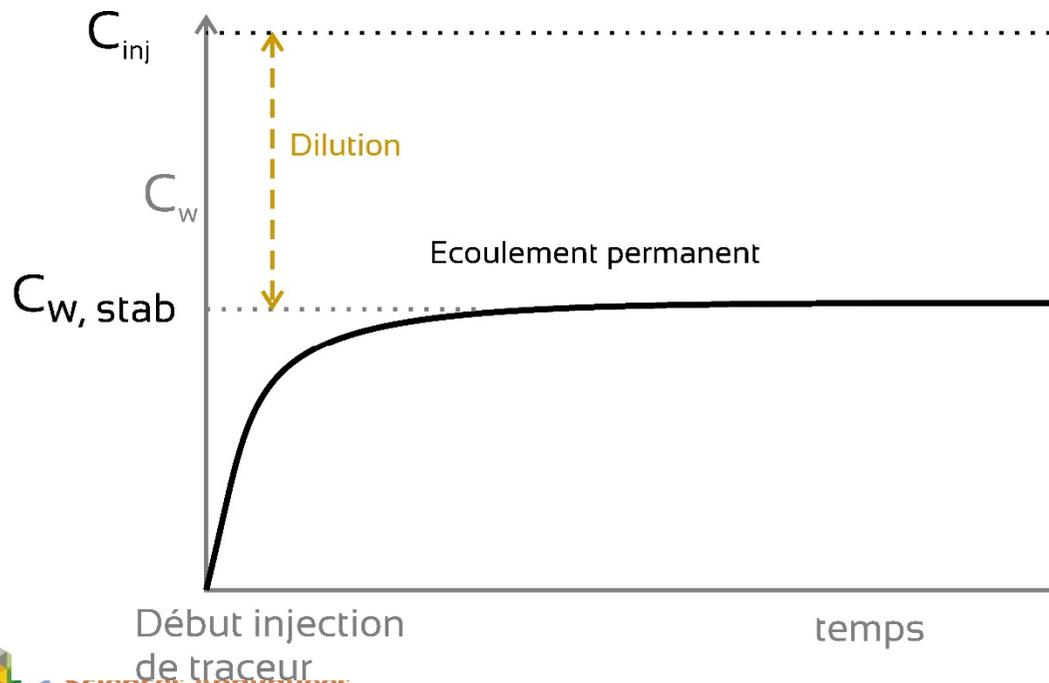
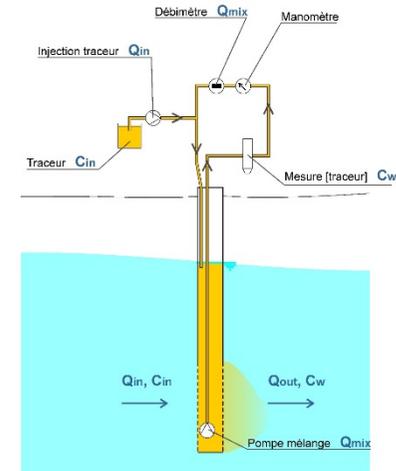
Pas de résultats pour les Pz profonds

Application 2 : sud de l'Australie

Caractérisation d'une pollution
au métaux lourds
dans un aquifère côtier

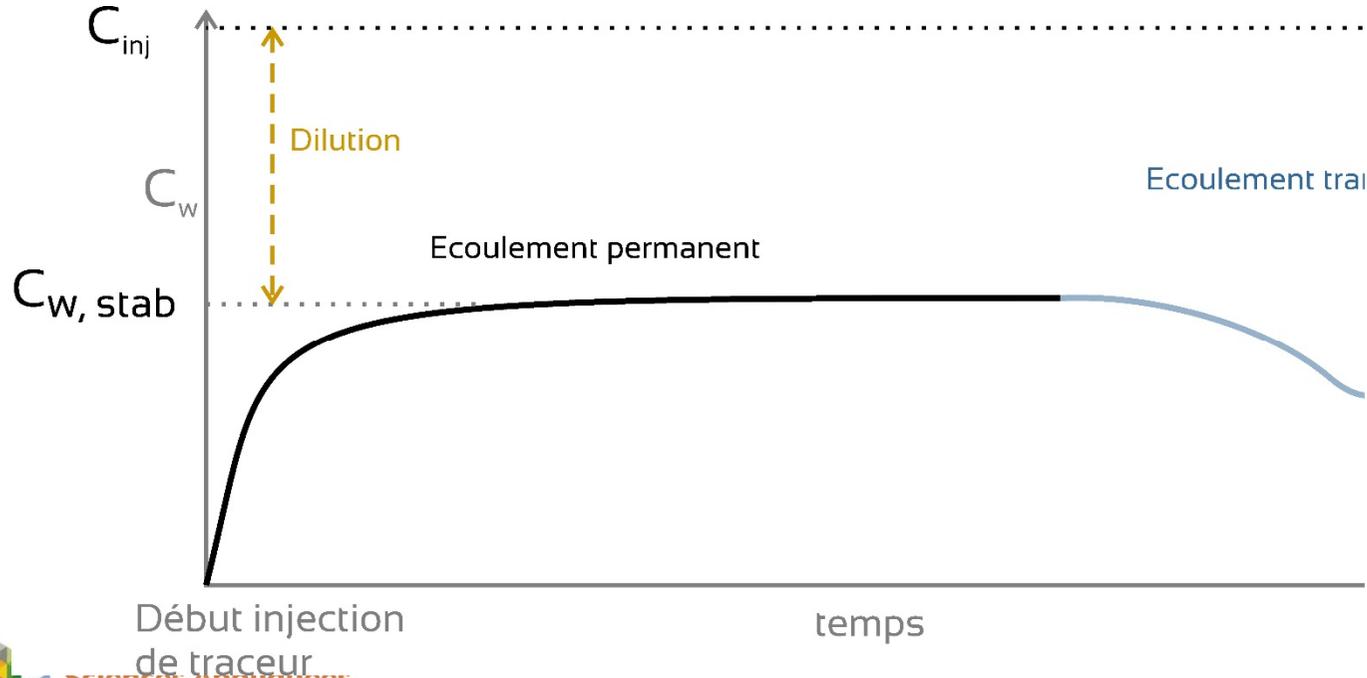
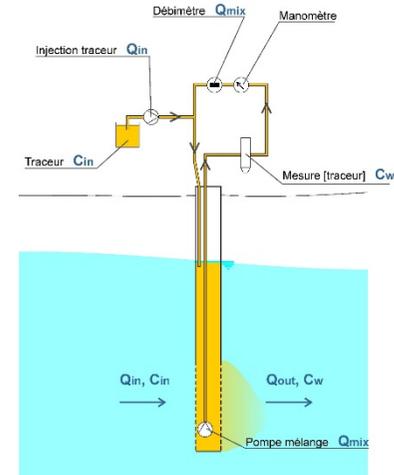
FVPDM : monitoring de la concentration en continu

Mesure en continu d'un flux d'eau souterraine variable.



FVPDM : monitoring de la concentration en continu

Mesure en continu d'un flux d'eau souterraine variable.



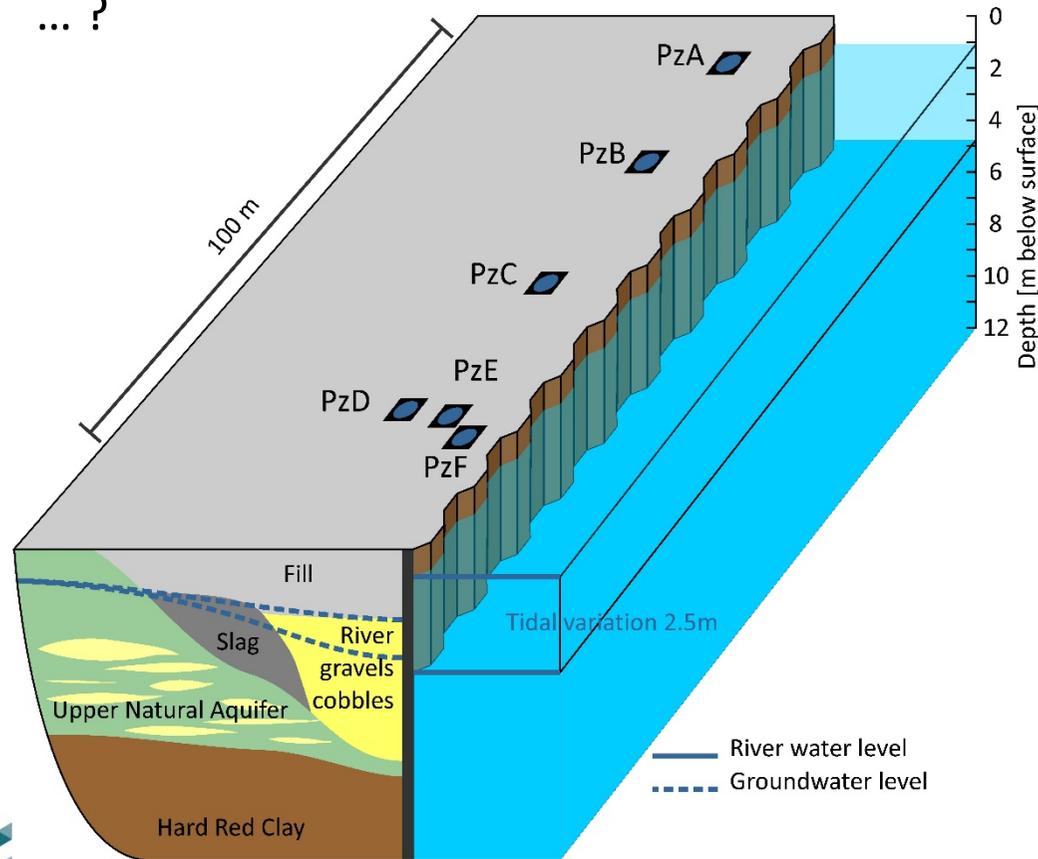
Contexte : Contamination d'un aquifère côtier aux métaux lourds

- Aquifère côtier connecté hydrauliquement à un estuaire soumis aux marées
- Risque de contamination des écosystèmes de l'estuaire (Mn, Zn, Cd, Pb)



Flux d'eau souterraine : Complexité d'un écoulement dynamique et d'un milieu très hétérogène

Ecoulement complexe,
tidal mixing,
influence du mur de palplanche, des drains,
des clapets,
... ?



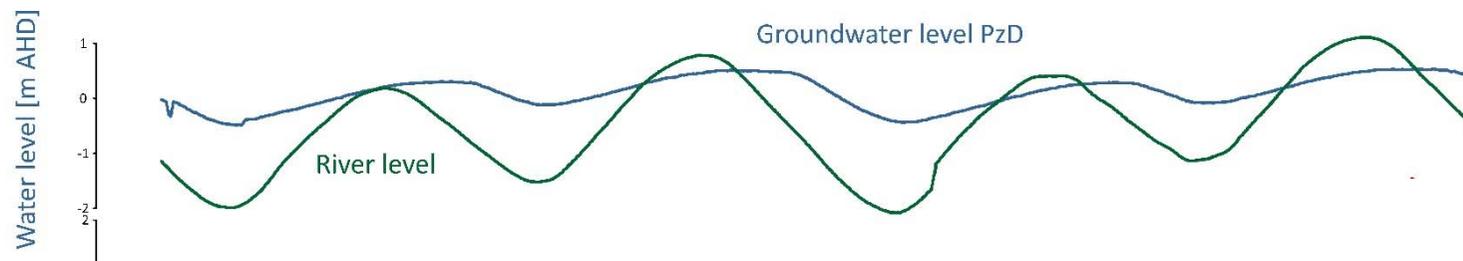
Setup expérimental : Monitoring des flux de polluants

- Monitoring FVPDM en continu durant 48 heures (4 cycles de marées) à 7 Pz
- Echantillonnage régulier pour analyses des métaux lourds



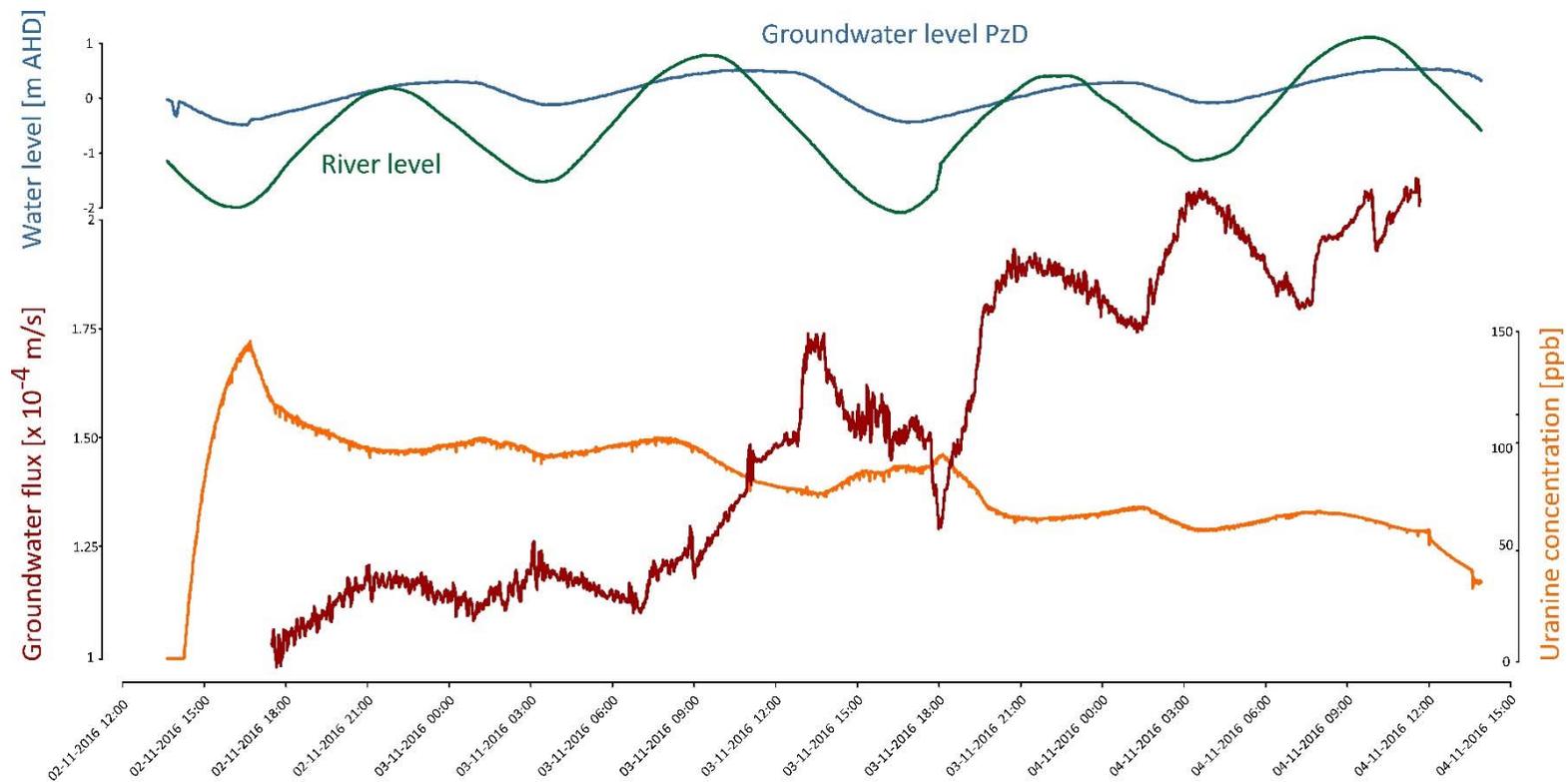
Résultat 1 : Pas d'inversion du sens d'écoulement

Le flux d'eau souterraine venant de l'amont est tellement important que nous n'avons jamais observé d'inversion de direction d'écoulement.



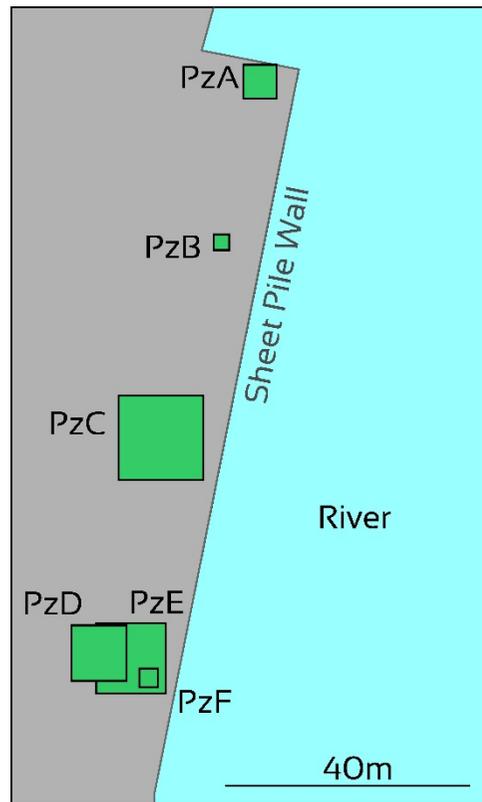
Resultat 1 : Pas d'inversion du sens d'écoulement

Le flux d'eau souterraine venant de l'amont est tellement important que nous n'avons jamais observé d'inversion de direction d'écoulement.



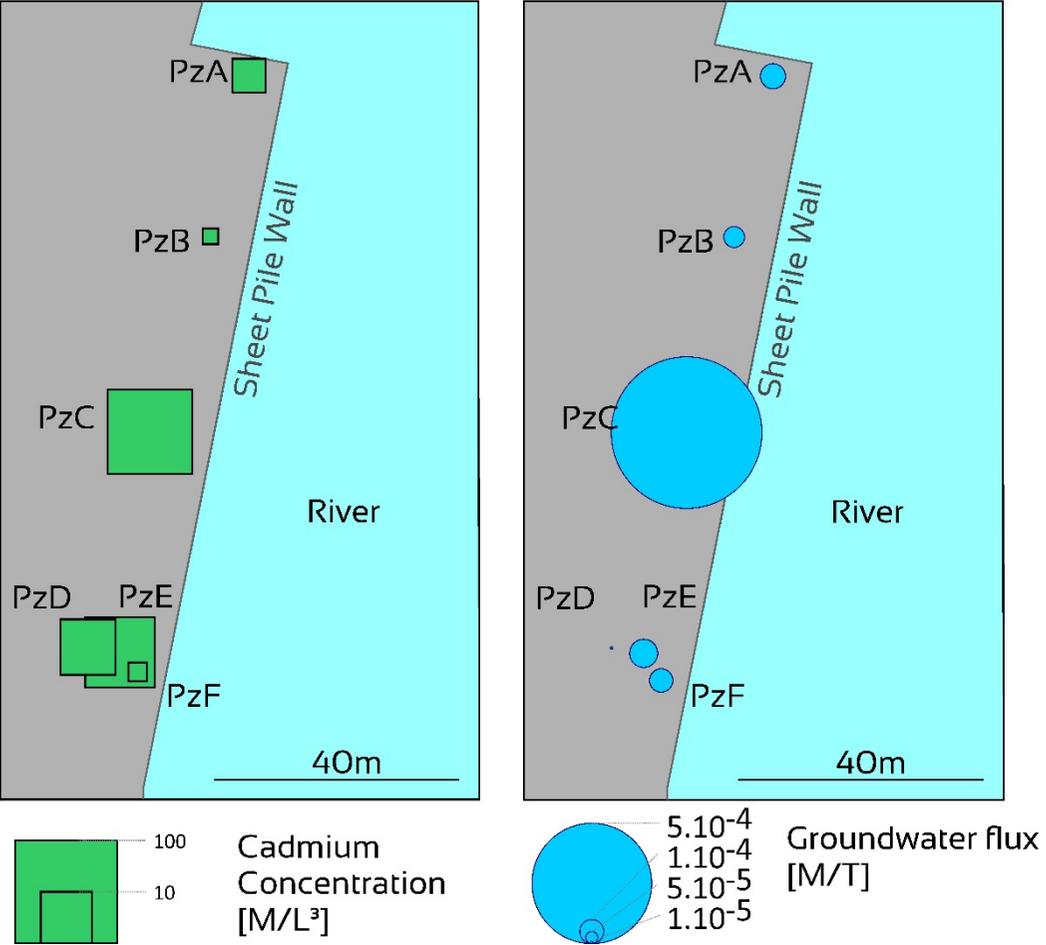
Résultat 2 : L'avantage des mesures de flux massiques

La concentration en Cd dans l'eau souterraine varie de 5 à 80 mg/L.

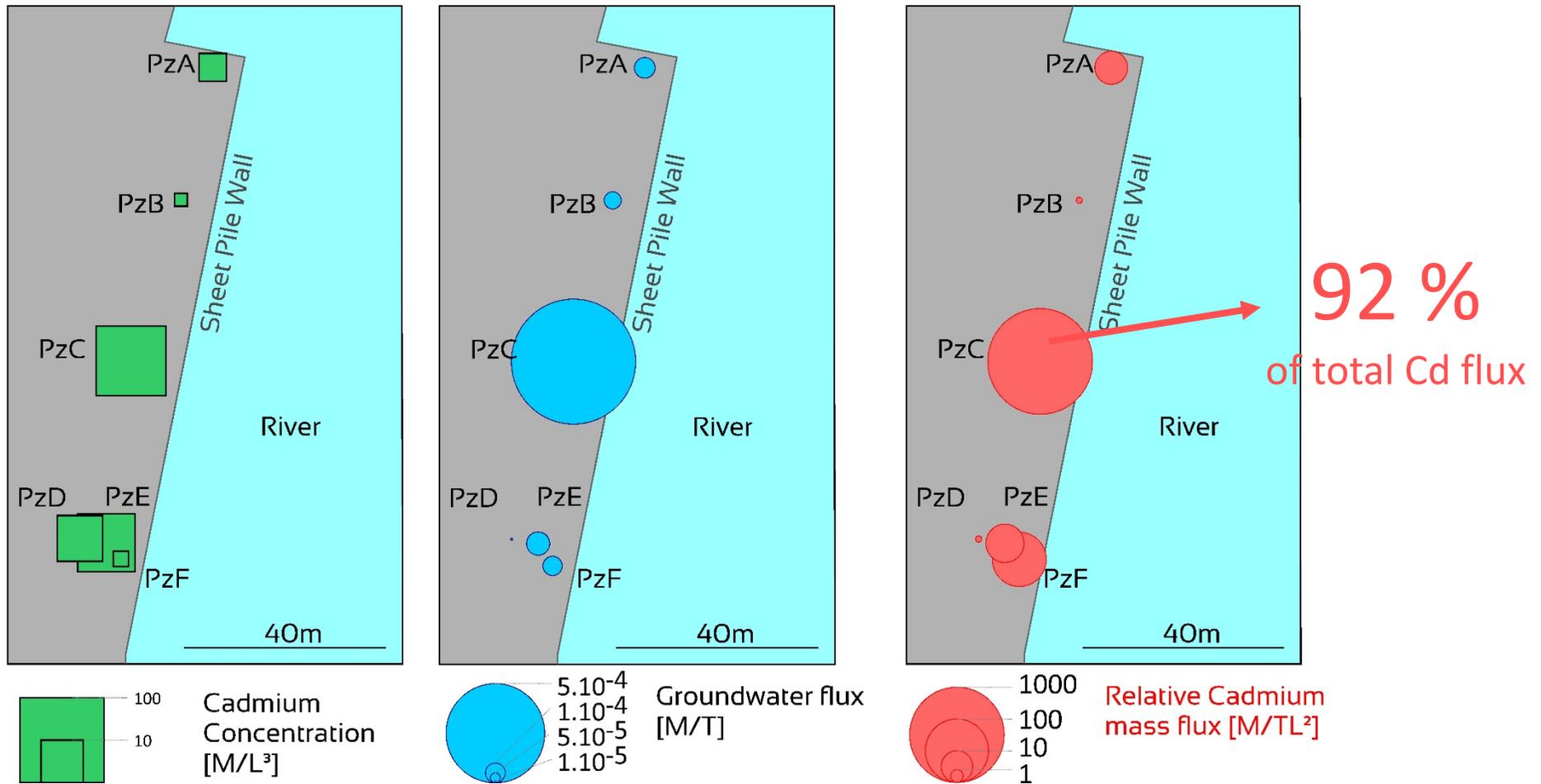


Résultat 2 : L'avantage des mesures de flux massiques

Flux d'eau souterraine important au piézomètre C.



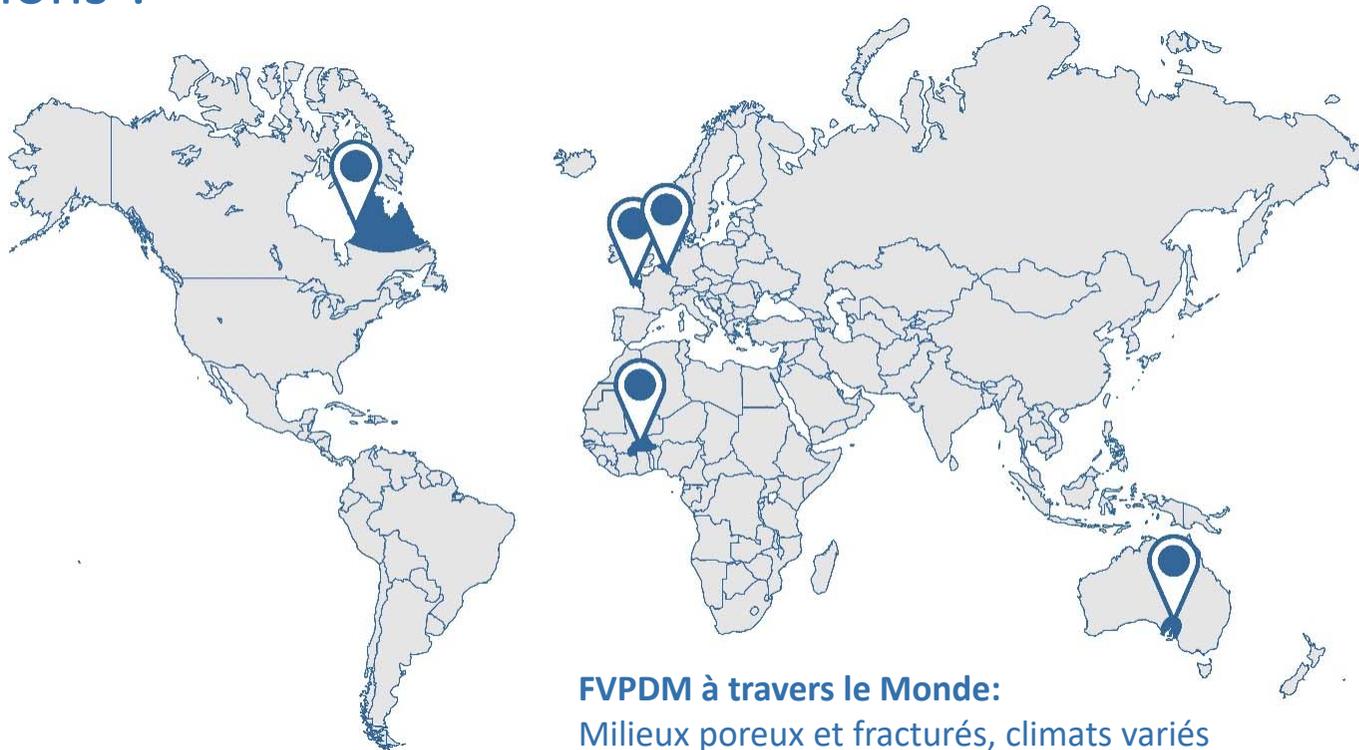
Résultat 2 : L'avantage des mesures de flux massiques



Conclusions & Perspectives

- Les mesures de flux d'eau et de polluants dans les eaux souterraines ont une valeur ajoutée réelle dans les études de sols pollués, mais attention à l'échelle à laquelle on les mesure!
- Mais plus encore, le développement de modèles conceptuels de site et l'intégration de la notion de flux massique dans les procédures décisionnelles (ex: études de risques) sont susceptibles d'apporter des clarifications et de lever certains paradoxes
- Concernant la méthode FVPDM, elle offre déjà de multiples domaines d'applications, allant de la caractérisation des écoulements souterrains à l'identification de zones préférentielles de circulation des polluants
- La prochaine étape est de développer une approche complètement intégrée de mesure/ monitoring du flux d'eau et de polluants en forage

Questions ?



FVPDM à travers le Monde:

Milieux poreux et fracturés, climats variés

Diamètres de tubages de 1.5'' à 4''

Profondeurs de 0.5m à 80m



Groundwater Quality 2019

Groundwater Quality 2019

The next IAHS conference on Groundwater Quality (**GQ 2019**) will be held in Liège (Belgium) on 9-12 September 2019 !

With the support of IAHS, UK CL:AIRE and EU H2020 ITN iINSPIRATION

More information : aimontefiore.org/GQ2019

Contact: c.dizier@aim-association.org – serge.brouyere@uliege.be

Références bibliographiques FVPDM

- Brouyère, S. (2003). Modeling tracer injection and well-aquifer interactions: A new mathematical and numerical approach. *Water Resources Research*, 39(3). <http://hdl.handle.net/2268/2321>
- Brouyère, S., Carabin, G., & Dassargues, A. (2005). Influence of injection conditions on field tracer experiments. *Ground Water*, 43(3), 389-400. <http://hdl.handle.net/2268/3306>
- Brouyère S., Batlle-Aguilar J., Goderniaux P. and Dassargues A, 2008. *A new tracer technique for monitoring groundwater fluxes: The finite volume point dilution method*. *Journal of Contaminant Hydrology* 95 (2008) 121 – 140. <http://hdl.handle.net/2268/1308>
- Batlle-Aguilar J., Brouyère S., Dassargues A., Morasch B., Hunkleler D., Hohener P., Diels L., Vanbroekhoven K, Seuntjens P and Halen H, 2009. Benzene dispersion and natural attenuation in an alluvial aquifer with strong interactions with surface water. *Journal of Hydrology*, 369, 305-317. <http://hdl.handle.net/2268/9140>
- Goderniaux, P., Brouyère, S., Gutierrez, A., & Baran, N. (2010). Multi-tracer tests to evaluate the hydraulic setting of a complex aquifer system (Brévilles spring catchment, France). *Hydrogeology Journal*. <http://hdl.handle.net/2268/69365>
- Jamin, P., Goderniaux, P., Bour, O., Le Brogne, T., Englert, A., Longuevergne, L., & Brouyère, S. (2015). Contribution of the Finite Volume Point Dilution Method for measurement of groundwater fluxes in a fractured aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*, 244–255. <http://hdl.handle.net/2268/185541>
- Jamin, P., Brouyère, S. (2018) Monitoring transient groundwater fluxes using the finite volume point dilution method, *Journal of Contaminant Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2018.07.005>.

Remerciements : documents externes utilisés pour préparer cet exposé:

- Présentation de G.Verreydt workshop ITN INSPIRATION au VITO à Mol
- Présentation ITRC Use and Measurement of Mass Flux and Mass Discharge