

La Méthode de Dilution Ponctuelle avec Volume Fini de Traceur (FVPDM): une nouvelle technique de traçage pour le monitoring des flux de Darcy

S. Brouyère & J. Batlle Aguilar

Université de Liège

ArGEnCo Geo³-Hydrogéologie & Aquapôle



Résumé de la présentation

- Techniques de traçages et injection des traceurs
- Facteurs influençant l'injection
- Modèle mathématique et solution analytique
- Validation expérimentale
- Utilisations du modèle
 - Influence de l'injection sur les résultats de traçage
 - Monitoring des flux de Darcy

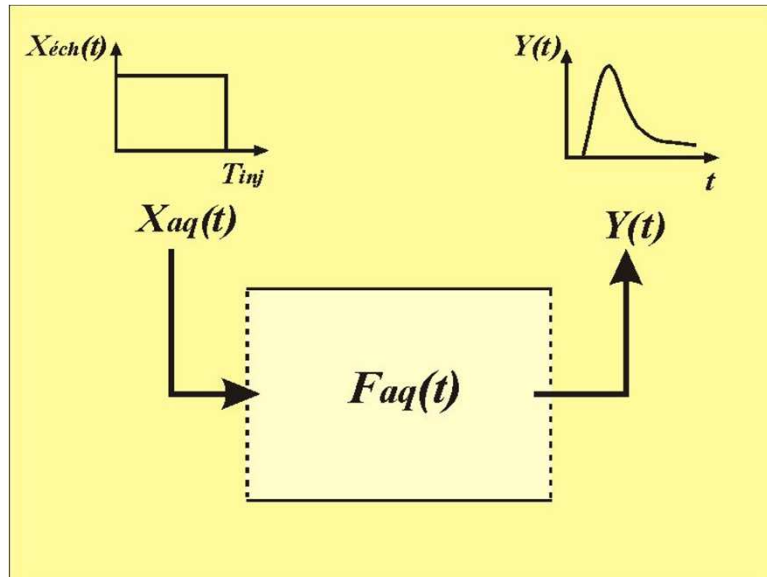
Techniques de traçages et injection des traceurs

		Conditions d'écoulement	
		Écoulement naturel	Écoulement forcé
Nombre de puits	1 seul puits	dilution ponctuelle	injection - pompage
	2 puits ou +	gradient naturel	nombreuses ! surtout radial convergent

Techniques de traçages et injection des traceurs

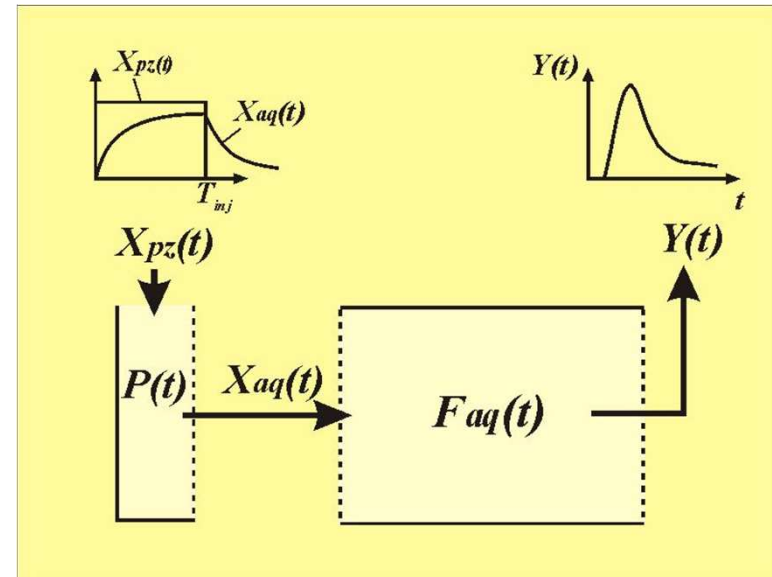
- 1^{ère} étape = l'injection du traceur
 - ➔ Quelle influence sur le résultat du traçage?
 - ➔ Quelles informations locales peut-on en tirer?
 - ➔ Comment représenter précisément l'injection du traceur dans des modèles?

Techniques de traçages et injection des traceurs



Représentation « classique »

$$X_{aq}(t) = X_{pz}(t)$$



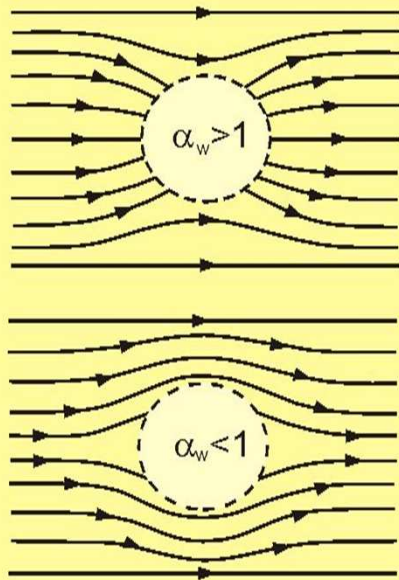
Représentation « correcte »

$$\begin{aligned} Y(t) &= F_{aq}(t) * X_{aq}(t) \\ &= F_{aq}(t) * [P(t) * X_{pz}(t)] \end{aligned}$$

Modèle mathématique et solution analytique

Durées et débits
d'injection, chasse, ...

Distorsion
du champs d'écoulement
au voisinage
du puits d'injection



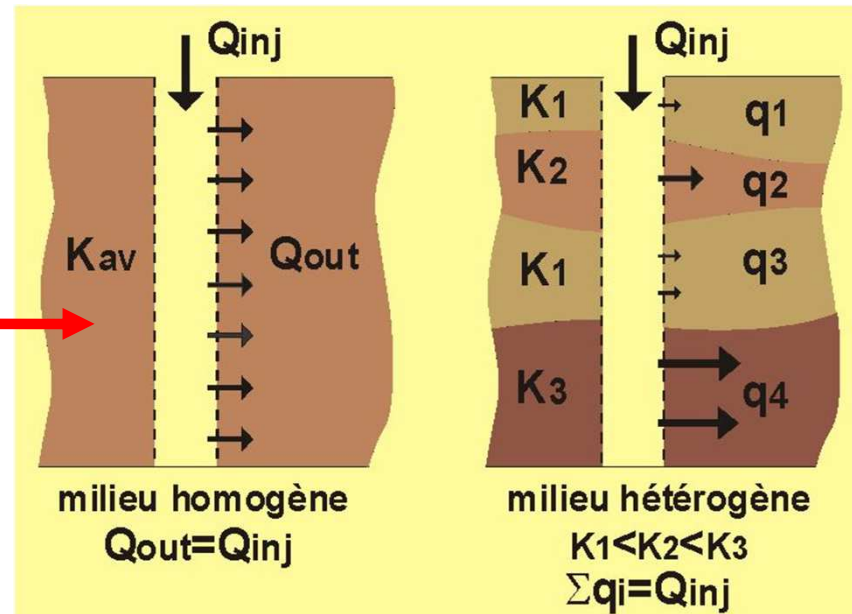
Effet de mélange et de piégeage
dans le puits d'injection

V_{inj} : volume de
fluide traceur

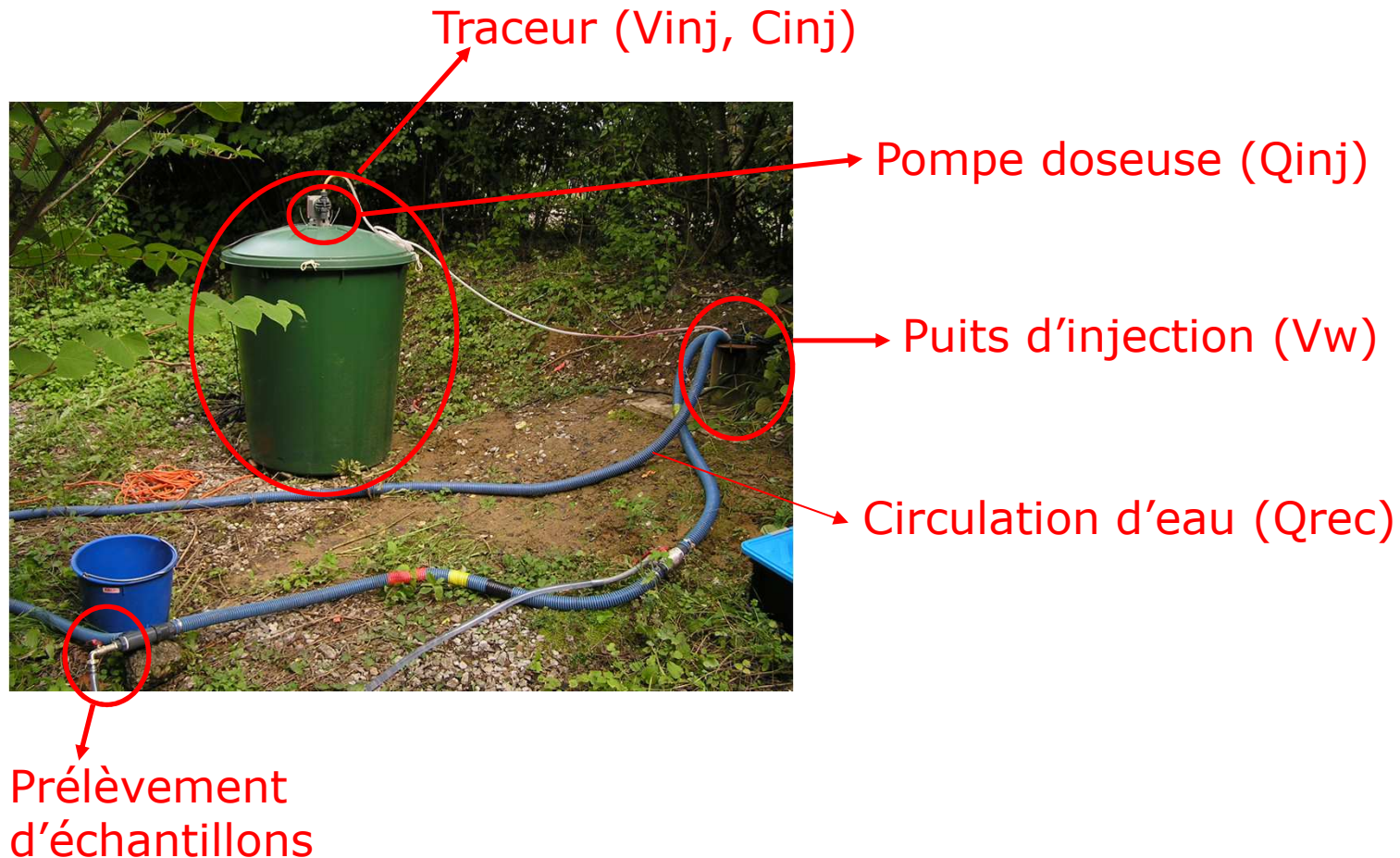
Coefficient de mélange
 $V_{inj}^* = V_{inj} / V_w$

V_w : volume d'eau dans
le puits d'injection

**+ piégeage potentiel
du traceur dans le puits !**



Modèle mathématique et solution analytique





Modèle mathématique et solution analytique

Conservation de l'eau

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

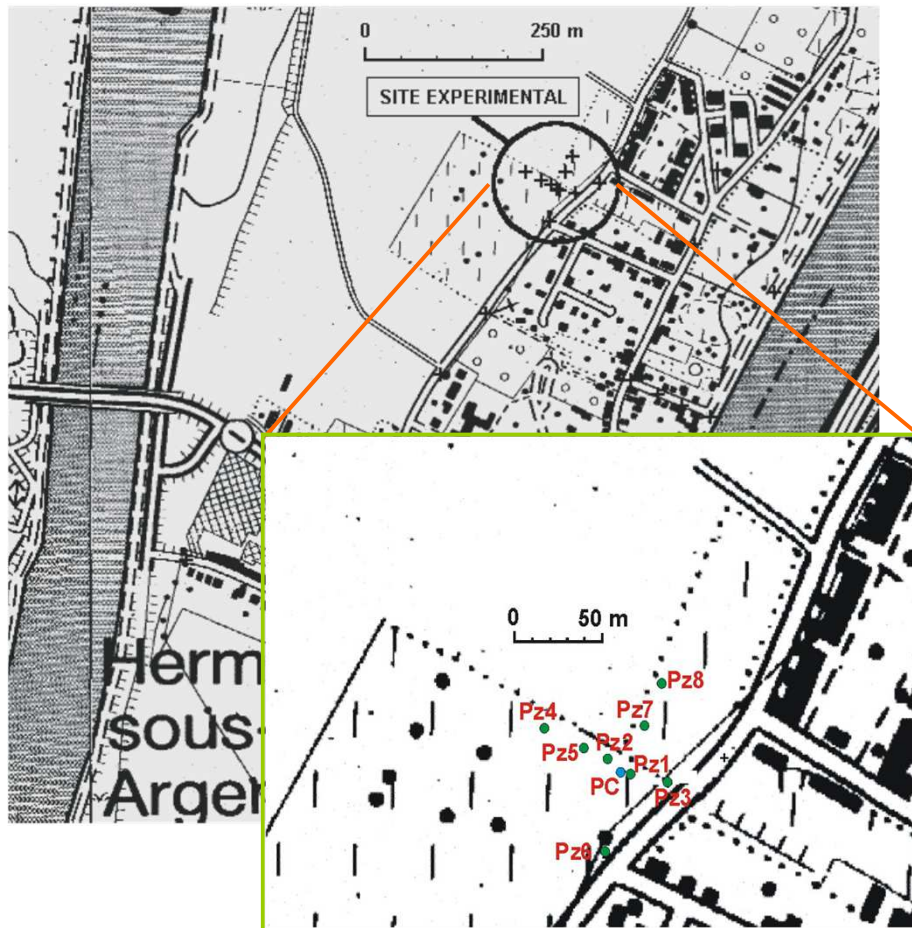
Conservation du traceur

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

Evolution de la concentration dans le puits d'injection

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

Validation expérimentale



- Nappe alluviale de la Meuse
- 1 Puits ($Q = 52.6 \text{ m}^3/\text{h}$)
- 8 piézomètres (4→50m)
- Essais de traçage dans la zone saturée

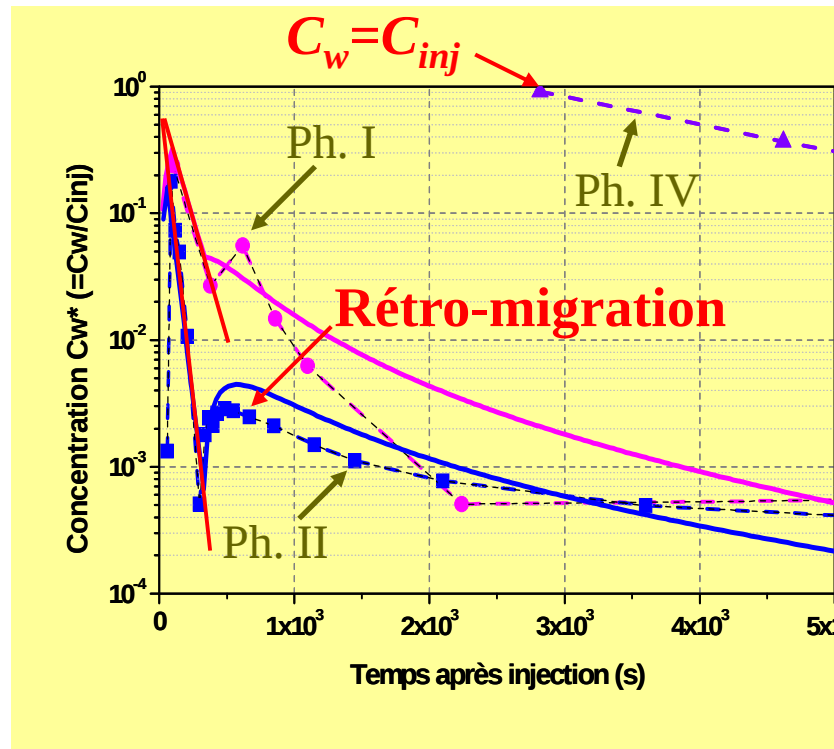
- Influence des conditions d'injection des traceurs
- Comportement physico-chimique des traceurs

Validation expérimentale

Injectons réalisées au Pz5 (25m du puits de reprise)

Phase	Traceur	M_{inj} (kg)	V_{inj} (m ³)	T_{inj} (s)	Q_{inj} (m ³ /s)	V_{ch} (m ³)	T_{ch} (s)	Q_{ch} (m ³ /s)
I	naphtionate	0.2	0.007	100	7.0×10^{-5}	0.01 ₄	240	5.75×10^{-5}
II	naphtionate	0.052	0.003	52	5.77×10^{-5}	0.1	268	3.73×10^{-4}
IV	naphtionate	0.102	0.007	70	1.0×10^{-4}	1.4	1180	1.19×10^{-3}
	Iodide	1.682	1.4	1440	9.72×10^{-4}	--	--	--
V	Naphtionate	0.101	0.048 +	2400 +	2.0×10^{-5} +	--	--	--
	iodide	3.86						
	potassium	1.19	0.152	9900	1.54×10^{-5}			

Validation expérimentale

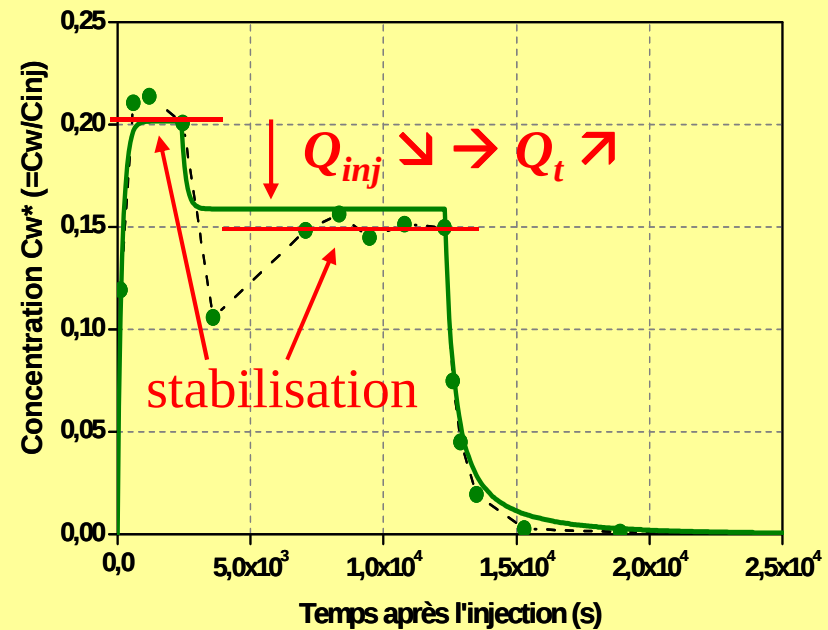


Phases I, II et IV

Phase V

Paramètres du modèle

- $r_w = 2.5$ cm
- $\alpha_w = 11.5$

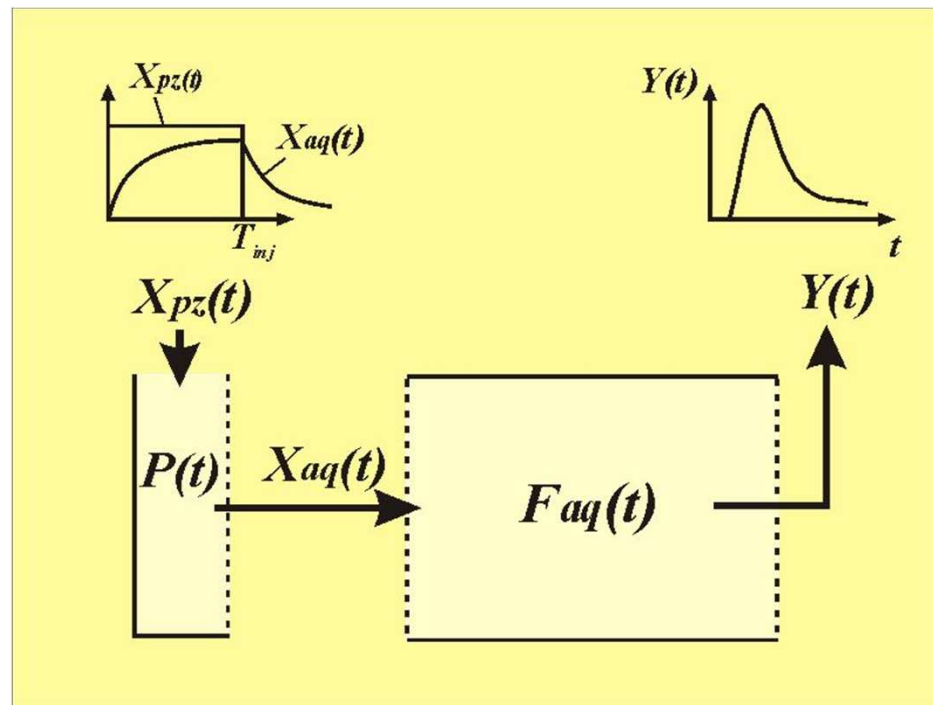


Utilisations du modèle

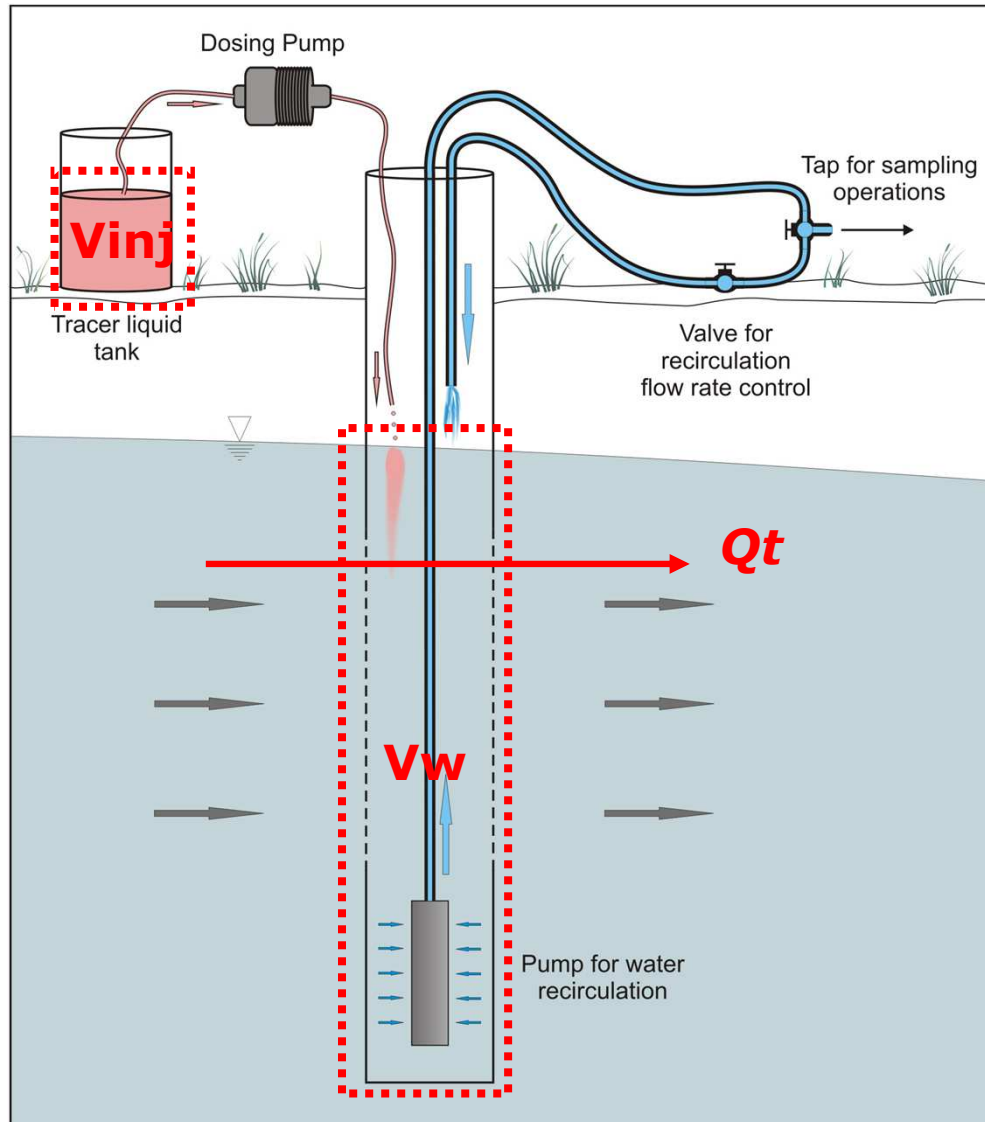
- Influence de l'injection sur les résultats du traçage et leur interprétation
- Quantification et monitoring des flux de Darcy en certains points de l'aquifère

Influence des conditions d'injection

- Objectif du traçage → identifier $F_{aq}(t)$
- Résultat du traçage → $Y(t) = F_{aq}(t) * X_{aq}(t)$
 - $F_{aq}(t) \neq Y(t)$ parce que $X_{aq}(t) = [X_{pz}(t) * P(t)] \neq \delta_{aq}(t)$

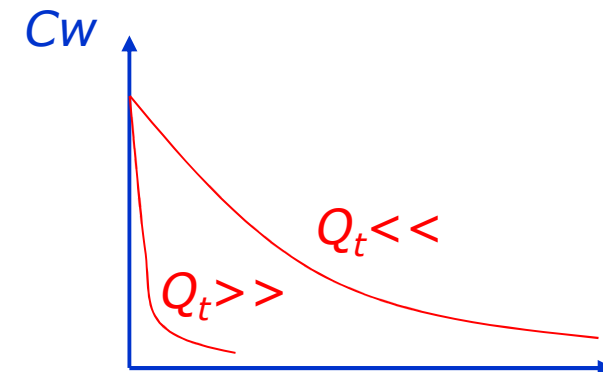


Influence des conditions d'injection

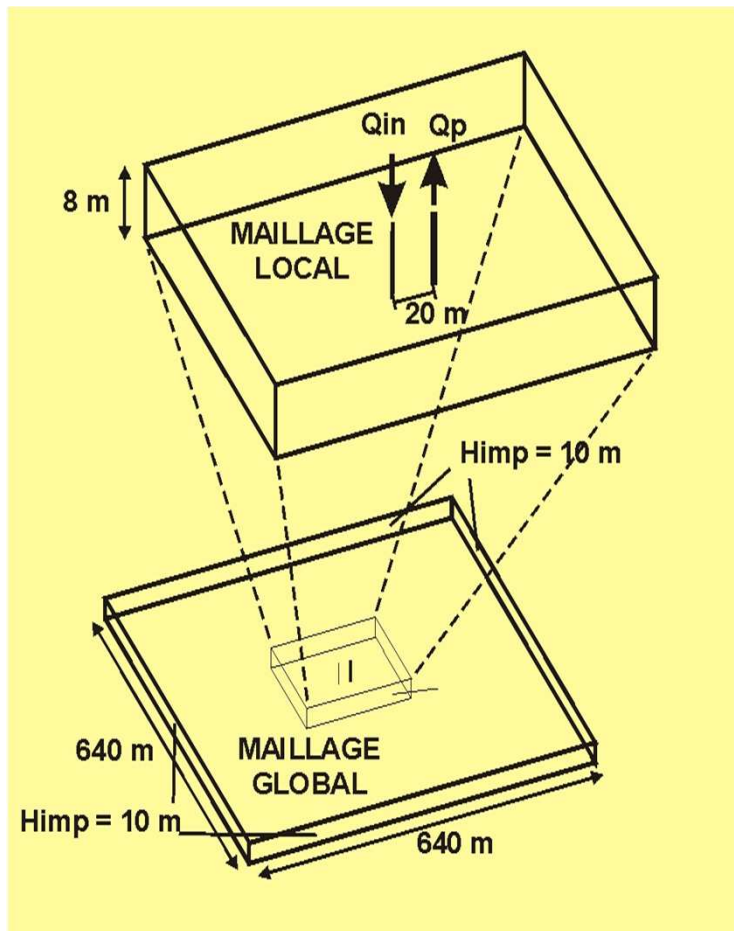


$V_{inj}/V_w \gg$
→ Pas d'influence

$V_{inj}/V_w \ll$
→ dépend de Q_t



Influence des conditions d'injection



□ $Q_p = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

□ Aquifère

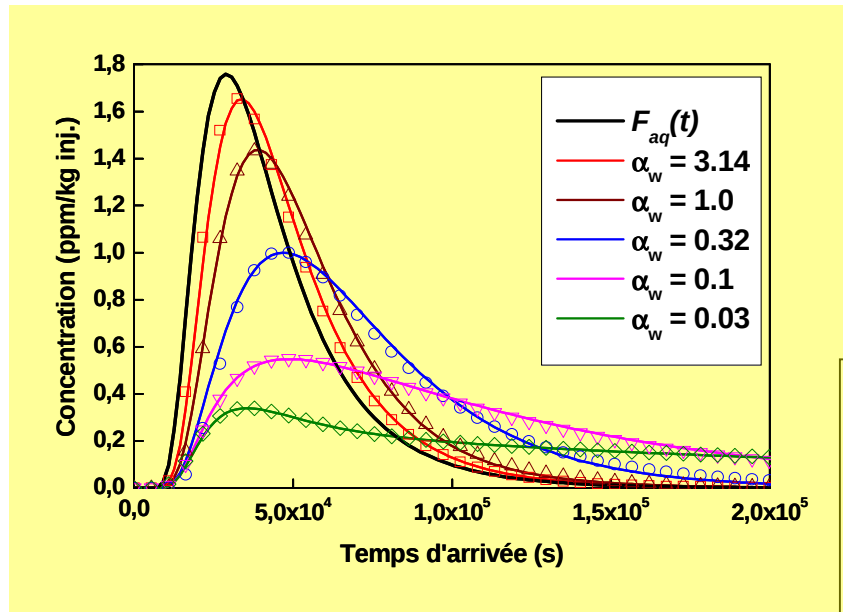
■ $K_s = 5.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$

■ $\theta_m = 5\%$

■ $\alpha_L = 2 \text{ m}$

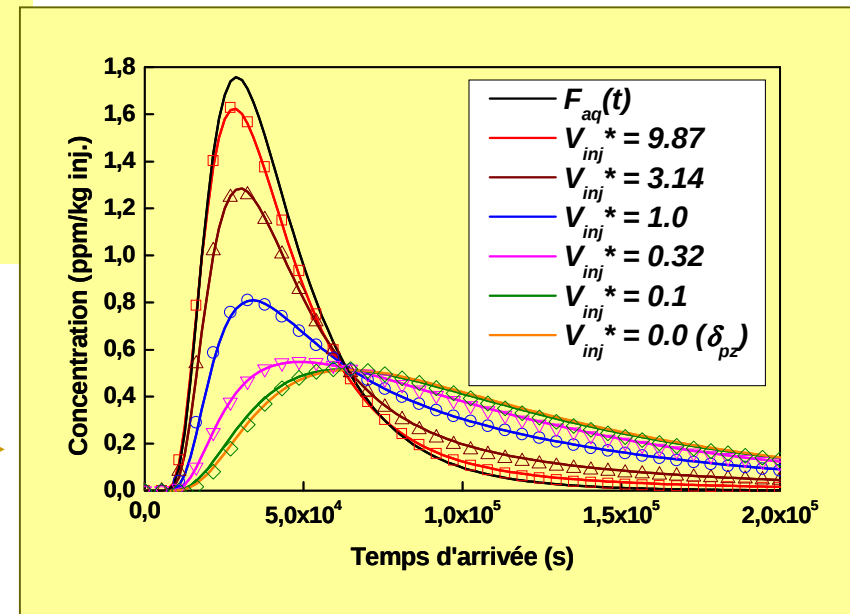
Influence des conditions d'injection

□ Influence des interactions puits-aquifère



$V_{inj}/V_w = 1,$
 Q_t variable

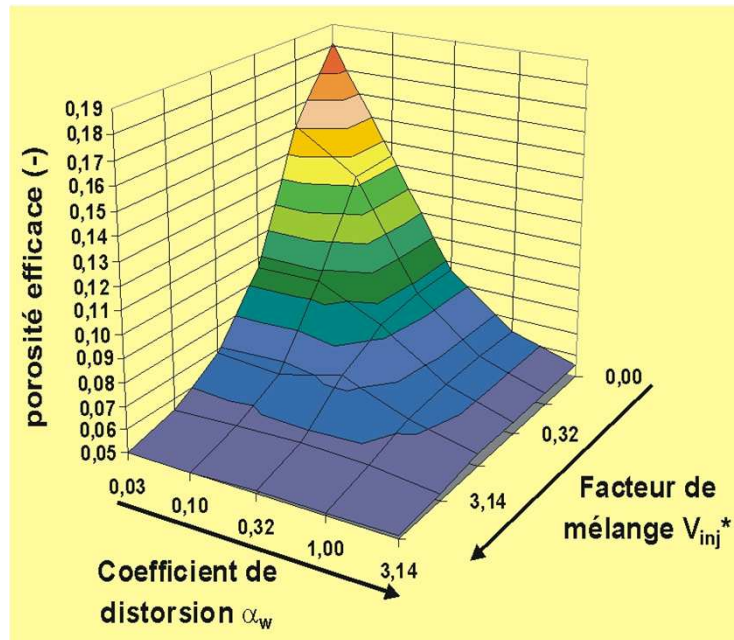
Q_t constant,
 V_{inj}/V_w variable



Influence des conditions d'injection

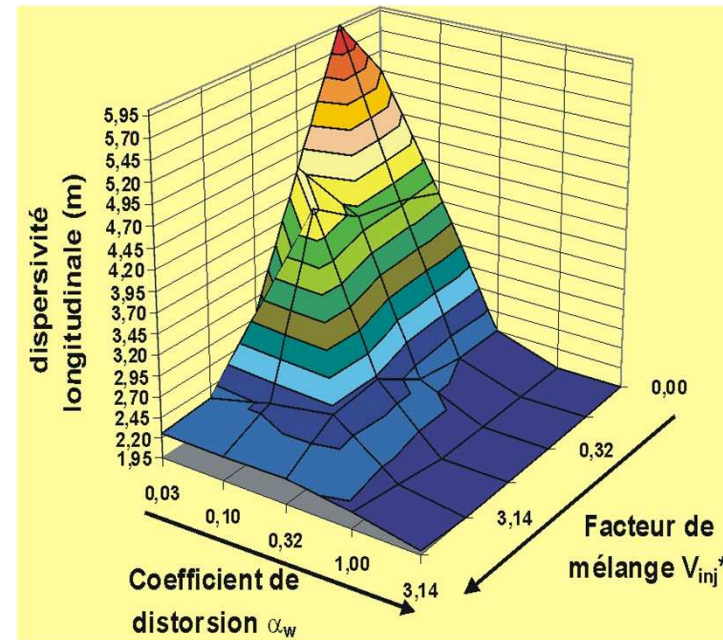
Impact sur les valeurs trouvées pour les paramètres ...

Porosité efficace



Valeur réelle: $\theta_m = 0.05$

Dispersivité longitudinale

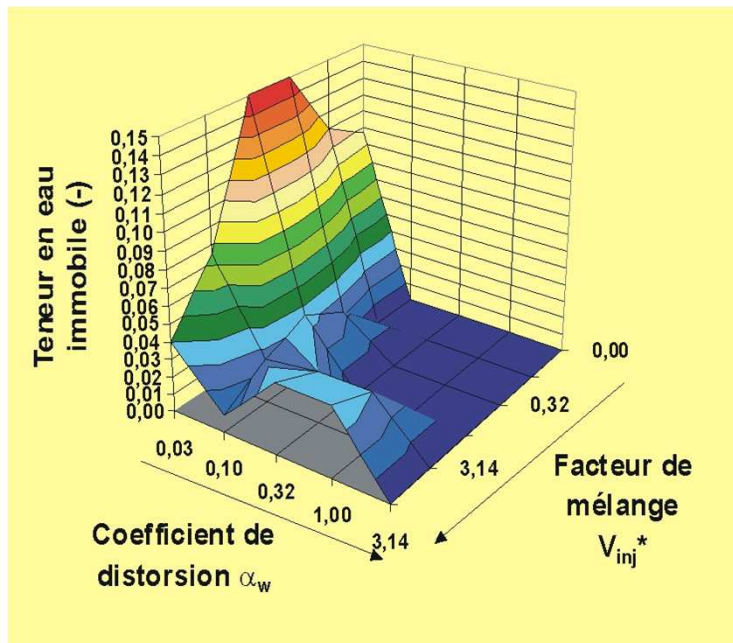


Valeur réelle: $\alpha_L = 2m$

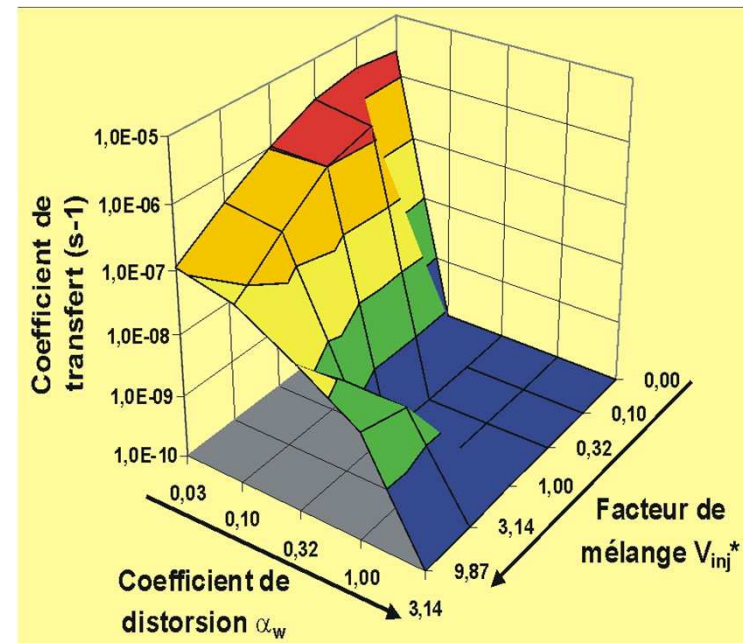
Influence des conditions d'injection

...et identification erronée des processus agissant !

Porosité d'eau immobile



Coefficient de transfert



En réalité, aucun effet d'eau immobile !

Influence des conditions d'injection

- ❑ Grande sensibilité de la courbe de restitution aux conditions d'injection des traceur
 - ! Sensibilité plus grande aux interactions puits-aquifère qu'à la durée d'injection !
 - ❑ Erreurs potentielles
 - Quantification peu précise des paramètres hydrodispersifs
 - ici: généralement une surestimation de la porosité efficace et de la dispersivité longitudinale
 - Identification erronée des processus agissant
 - ici: « pseudo » effet de retard
- Importance de bien maîtriser l'injection (suivi de la concentration) ou de faire en sorte que son influence soit négligeable ($V_{inj}/V_w \sim 10$)

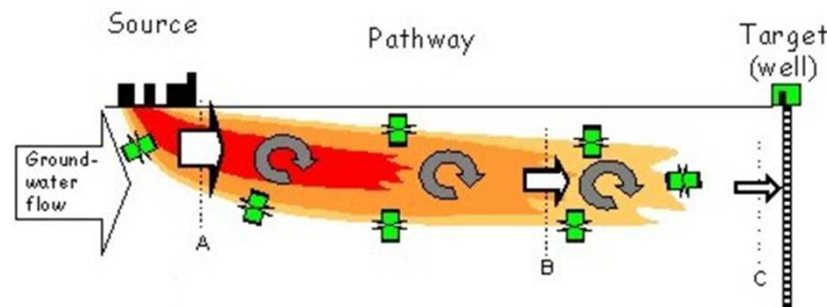
Influence des conditions d'injection

□ La semaine passée sur le terrain...

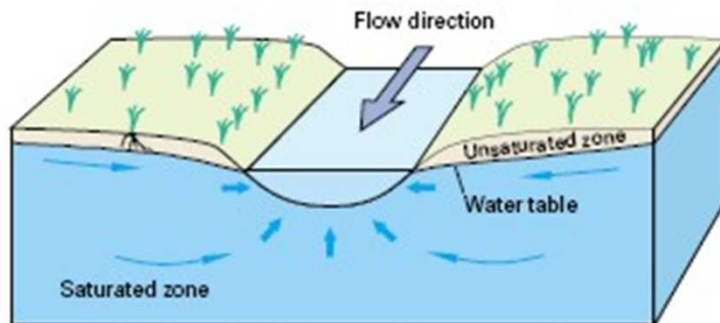


Quantification et monitoring des flux de Darcy

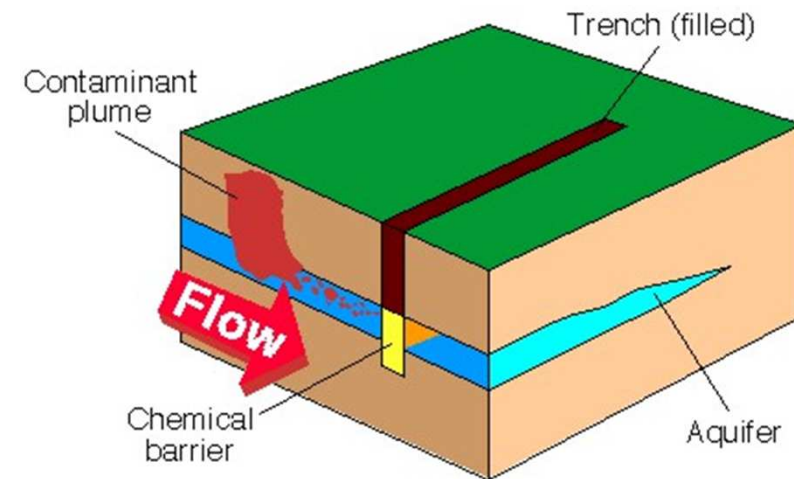
- Atténuation naturelle



- Etude des interactions eau souterraine – eau de surface (zone hyporhéique): quantification des flux échangés



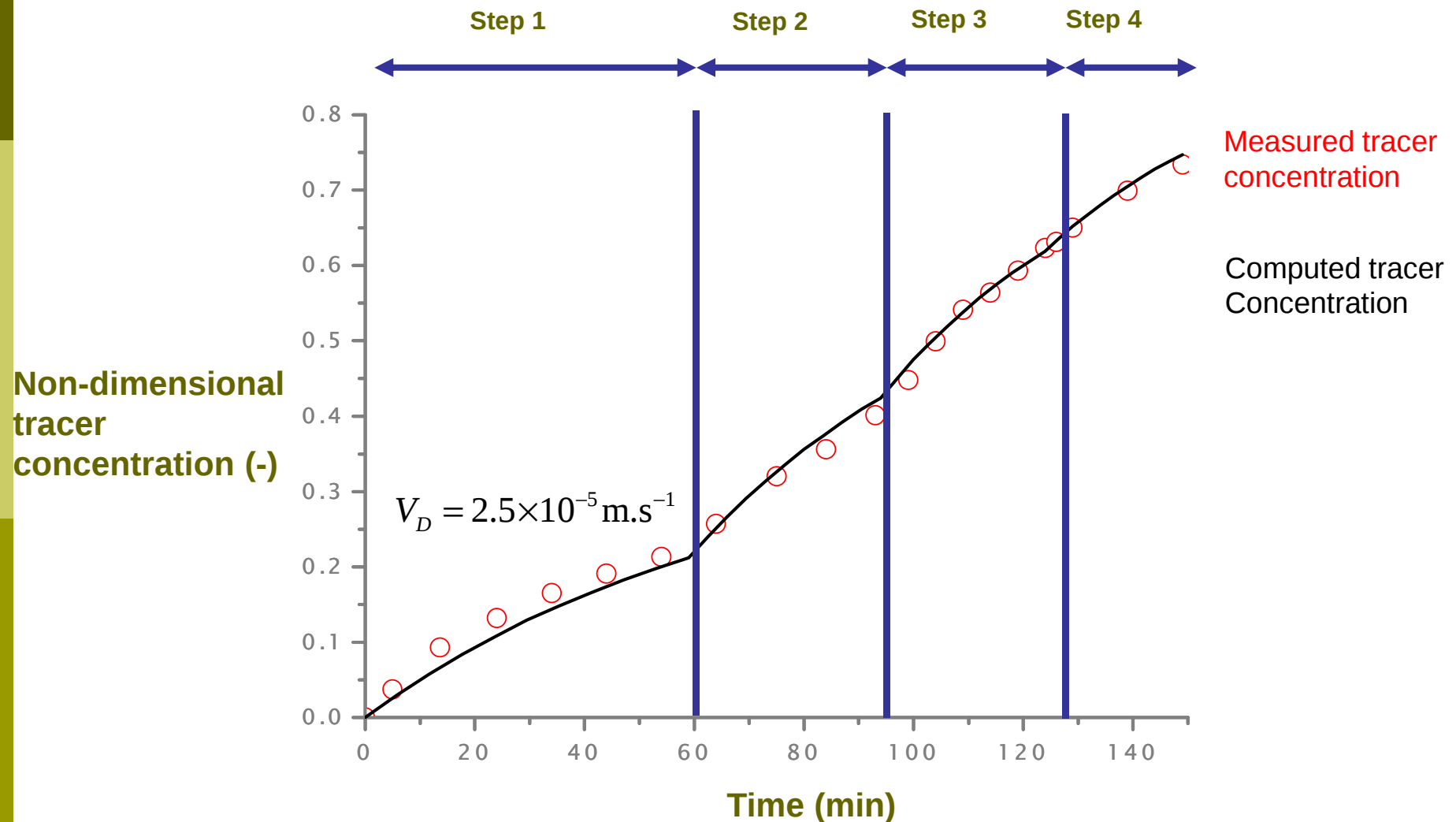
- Dimensionnement de systèmes de remédiation (barrières réactives...)



Quantification et monitoring des flux de Darcy

	Brévilles catchment (France)	Walloon Meuse basin (Belgium)
Geology of the aquifer	Layers of sand overburden by fractured marly limestones	Gravelly alluvial
Field conditions	❑ No power supply ❑ Limited water available ❑ No security (vandalism)	❑ Power supply ❑ Water available ❑ Field security
Objectives	Highlight vertical variations in groundwater fluxes	Evaluate GW fluxes discharging to the adjacent Meuse river

Quantification et monitoring des flux de Darcy



Références

- Brouyère, S. (2001). Etude et modélisation du transport et du piégeage des solutés en milieu souterrain variablement saturé (study and modelling of transport and retardation of solutes in variably saturated media) (In French). *PhD thesis*. Faculté des Sciences Appliquées. Laboratoire de géologie de l'ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection géophysique. Université de Liège. Liège (Belgium). 640 pp.
- Brouyère, S. (2003). Modelling tracer injection and well-aquifer interactions: a new mathematical and numerical approach. ***Water Resour. Res.***, 39(3). 1070,doi: 10.1029/2002WR001813.
- Brouyère, S.; J. Batlle Aguilar; P. Goderniaux; A. Dassargues (2007). A new tracer technique for monitoring groundwater fluxes. The Finite Volume Point Dilution Method (FVPDM). ***J. Cont. Hydrol.***, submitted.



Merci beaucoup!
Mulțumesc mult!