



Introduction aux techniques de traçage en hydrogéologie



S.Brouyère - serge.brouyere@ulg.ac.be

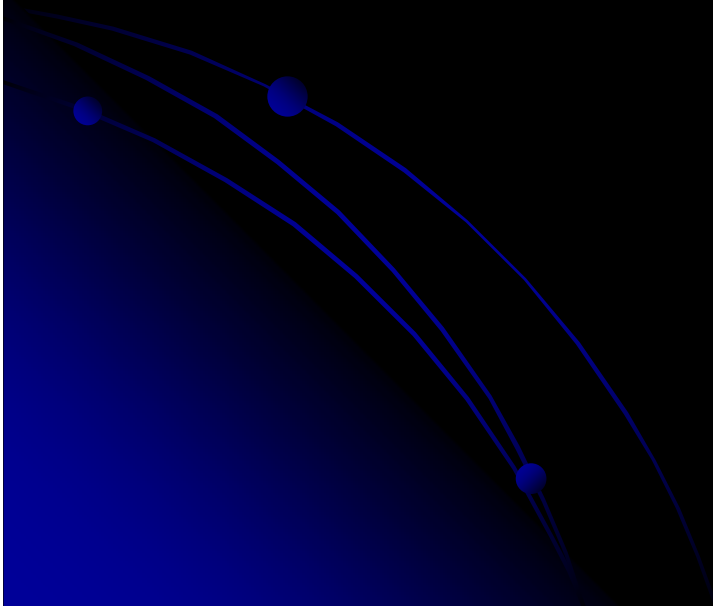
Hydrogéologie



Plan de l'exposé

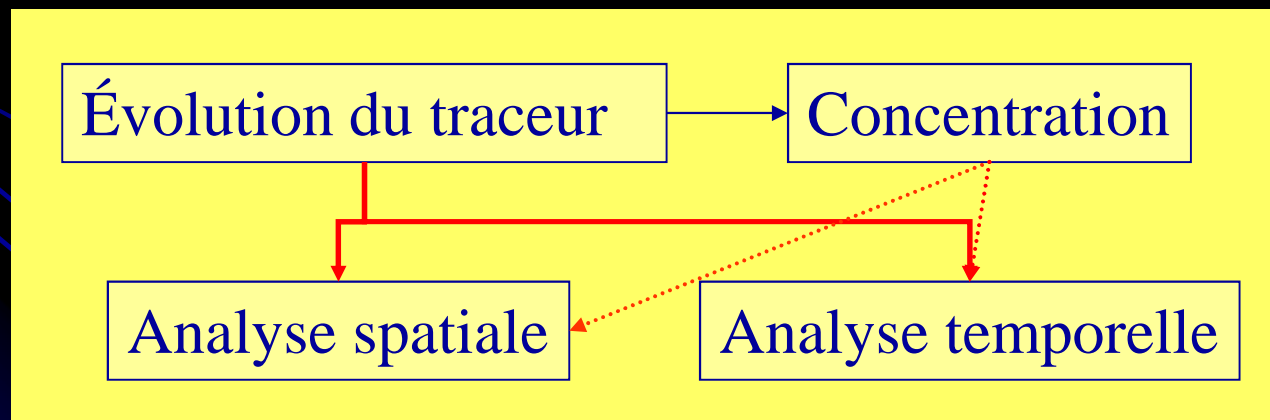
1. Généralités sur les traceurs
2. Traceurs naturels
3. Traceurs artificiels
4. Interprétation des essais de traçage
5. Conditions d'injection des traceurs
6. Cas d'étude: essais de traçage dans des craies variablement saturées en Hesbaye

Généralités sur les traceurs



Généralités sur les traceurs

- Qu'est-ce qu'un traceur ?
 - Toute substance de **composition physico-chimique connue**, dont l'évolution dans l'environnement (ici: le milieu souterrain) peut être **suivie dans l'espace et/ou dans le temps**, à différents **points d'observation** (puits de pompage, source, ...)



Généralités sur les traceurs

- Traceur idéal:
 - Traceur **reflétant au mieux le comportement de l'eau** au sein du milieu souterrain...
 - En réalité, **aucun traceur n'est idéal !** Tous les traceurs ont une certaine spécificité par rapport à l'eau...
 - Exception: **eau tritiée** qui a un comportement physico-chimique très semblable à l'eau mais utilisation très restrictive et restreinte
 - En réalité, **l'eau n'est pas vraiment un produit «conservatif »** au sens vu précédemment (cours transport), vu les **interactions fortes avec la phase solide**...
 - Traceurs anioniques sont conservatifs mais pas « idéaux » (**exclusion anionique**)

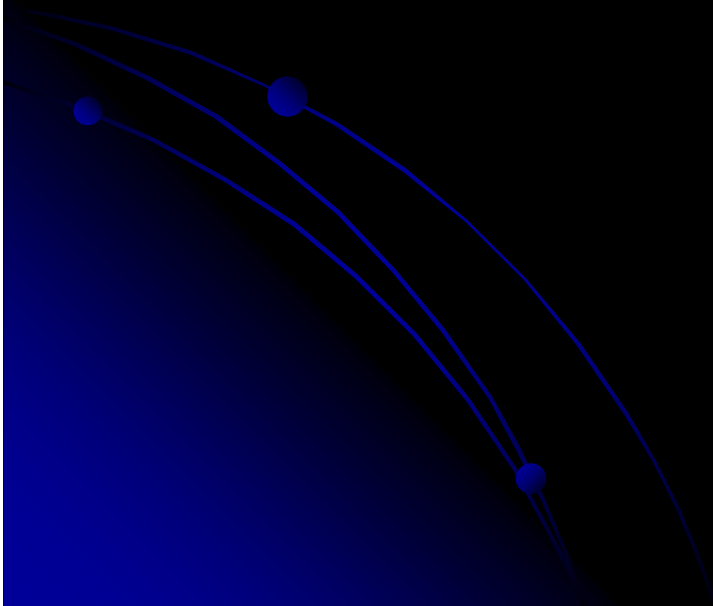
Généralités sur les traceurs

- Principaux champs d'application des traçages
 - **Investigation générale du milieu souterrain**: directions d'écoulements, liens hydrauliques, âge et origine de l'eau, mélanges de types d'eau, ...
 - **Protection des ressources en eau**: évaluation des zones de protection, vulnérabilité des aquifère, ...
 - **Hydrogéologie de l'environnement**: études de sites contaminés, de sites potentiels de stockage de déchets, études de remédiation, ...
 - **Hydrogéologie du génie civil**: évaluation des vitesses d'écoulement, ...

Généralités sur les traceurs

- Principales catégories de traceurs
 - **Traceurs naturels**
 - Isotopes stables ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, ...)
 - Isotopes radioactifs (^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ...)
 - Composants chimiques des eaux souterraines (Ca , Na , ...)
 - Paramètres physico-chimiques (t° , σ_{el} , *turbidité*, *fluorescence*, ...)
 - **Traceurs environnementaux**
 - Retombées radioactives (*tests nucléaires ou accidents*)
 - Polluants spécifiques (*pesticides, nitrates, sels d'épandage, ...*)
 - **Traceurs artificiels**

Traceurs naturels



Traceurs naturels

- Toute substance, tout produit se trouvant « **naturellement** » dans l'environnement avec une **distribution ou une évolution spatiale et temporelle** dont la mise en évidence **permettant d'évaluer certaines propriétés des eaux souterraines** (origine, âge, mélanges, ...)
- ➔ Principales catégories:
 - Isotopes stables: $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$...
 - ➔ Origine météorique des eaux, mélanges ...
 - Isotopes radioactifs: ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl ...
 - ➔ Âge de l'eau, mélanges ...
 - Composants chimiques naturels et paramètres physico-chimiques des eaux (éléments chimiques, température, conductivité, fluorescence naturelle, turbidité ...)
 - ➔ Séparations d'hydrogramme

Traceurs naturels

- Isotopes

- Definition

- Atome = noyau constitué de neutrons (n^0) et protons (p^+) + électrons (e^-) périphériques
- Un élément chimique donné peut se présenter plusieurs types d'atomes se différenciant par leur nombre de neutrons = isotopes
Ex.: Élément Hydrogène

- Atome Hydrogène ^1H : 1 p^+ + 0 n^0
- Atome Deuterium ^2H : 1 p^+ + 1 n^0
- Atome Tritium ^3H : 1 p^+ + 2 n^0

- Catégories

- Isotopes stables ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$...)
→ Origine météorique de l'eau ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$)
- Isotopes instables (^3H , ^{14}C , ^{36}Cl ...)
→ Datation de l'eau (^3H)

Traceurs naturels

- Isotopes stables

- On définit le rapport isotopique par :

$$R = \frac{\text{abondance de l'isotope lourd}}{\text{abondance de l'isotope léger}}$$

- La teneur isotopique est exprimée par :

$$\delta = \left(\frac{R}{R_s} - 1 \right) \cdot 1000$$

(en ppm ou ‰)

R_s = Etalon de référence pour les isotopes stables, provenant du Bureau National des Standards (USA)

Traceurs naturels

- Isotopes stables

- Exemple: Origin d'eaux minérales (Région de Theux, source: Valérie Peters)

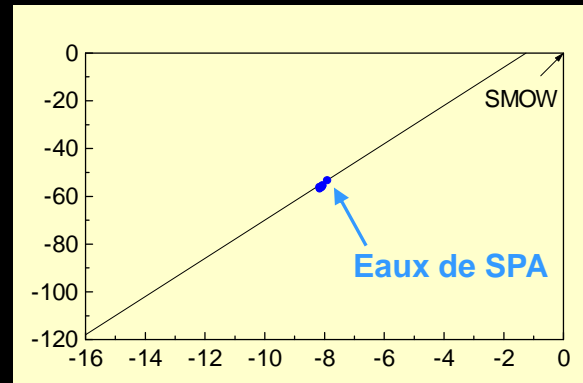
- Eaux météoriques caractérisées par une droite (Craig, 1963):

$$\delta(^2\text{H}) = 8 * \delta(^{18}\text{O}) + 10$$

Eaux juvéniles:

^{18}O : +5 et +9 ‰

^2H : -80 et -40 ‰



- Origine du CO_2 présent dans les eaux carbo-gazeuses avec ^{13}C :

ORIGINE	$\delta^{13}\text{C}$
CO_2 atmosphérique	-7.0
CO_2 du sol (organique)	-25
Calcaires	-2 à +2
CO_2 mantellique ou juvénile	-5 à -7

Traceurs naturels

- Isotopes instables

- Tritium = Isotope radioactif de l'hydrogène (2 neutrons)
- Naturellement produit par la réaction entre l'azote atmosphérique (^{14}N) et des neutrons cosmiques:



- ^3H instable, dégradation radioactive : $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \beta^-$

Demi-vie = 12.3 ans

- Unités: Teneur dans l'eau exprimée en **unités tritium (U.T.)**

$$^3\text{H}/^1\text{H} = 10^{-18} = 1 \text{ U.T.}$$

Traceurs naturels

- Isotopes instables

- Contenu en tritium de l'eau

- Tritium « naturel » (eau de pluie): 5 U.T.

- Tritium « artificiel » (Bombe H, début en 1952)

- 1963: pic majeur de concentration en tritium dans l'eau de pluie (concentrations multipliées par 1000)

- Depuis 1963, diminution exponentielle de la teneur en tritium dans l'eau de pluie

- Dans les années 90 : ~ 15 U.T.

- Permet une distinction des eaux météoriques entre celles qui se sont infiltrées avant et depuis 1952

- Datation des eaux

- Teneur > 25 U.T. : âge moyen = qq dizaines d'années

- $10 < \text{teneur} < 25$ U.T. : eaux infiltrées durant la dernière décennie ou mélange d'eau post-nucléaire et d'eau plus ancienne

- $2 < \text{teneur} < 10$: eau ancienne avec apport +/- important d'eau post-nucléaire

Traceurs naturels

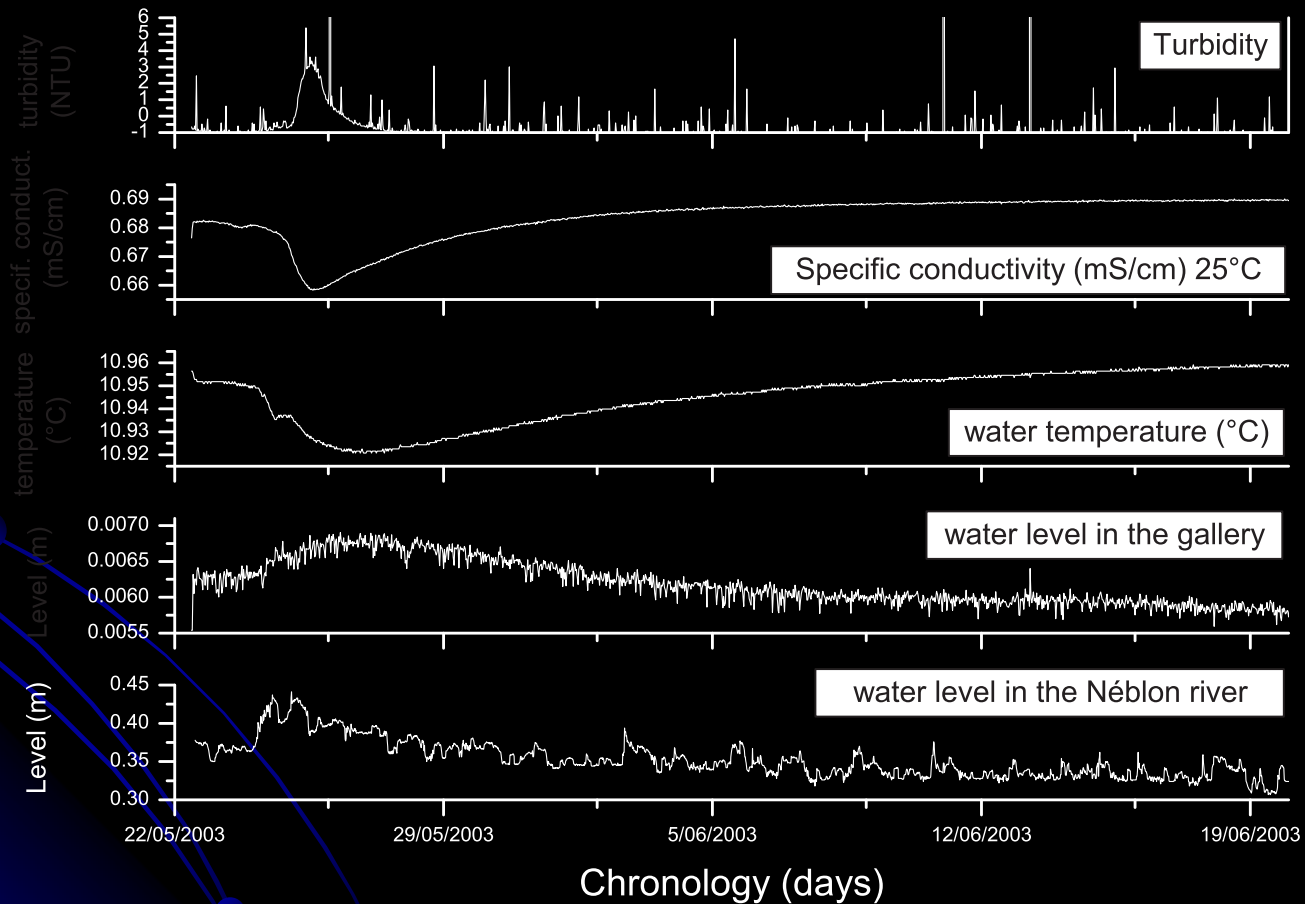
- Composants naturels et paramètres physiques des eaux
 - Des eaux d'origine différentes (surface, souterrain ...) peuvent avoir des compositions et/ou des caractéristiques physico-chimiques différentes en relation avec leur origine et le cheminement emprunté à travers le bassin hydrologique/hydrogéologique
 - Si ces eaux sont mélangées, la « composition » résultante dépend des « compositions » respectives des différentes eaux et des flux qui leurs sont associés

$$\text{Exemple.: } C_{\text{out}} = (C_{\text{in}}^1 \times Q_{\text{in}}^1 + C_{\text{in}}^2 \times Q_{\text{in}}^2) / (Q_{\text{in}}^1 + Q_{\text{in}}^2)$$

- Si des changements affectent les flux ou la composition de certains types d'eau en présence, la composition du mélange est susceptible de changer également
- Observer des variations au sein de l'eau permet donc de tirer des informations sur les types d'eau et leur proportion dans le mélange lorsqu'un « événement » vient en altérer la composition (crue ...)

Traceurs naturels

- Monitoring physico-chimique d'une galerie de captage dans le bassin du Néblon (Belgique)



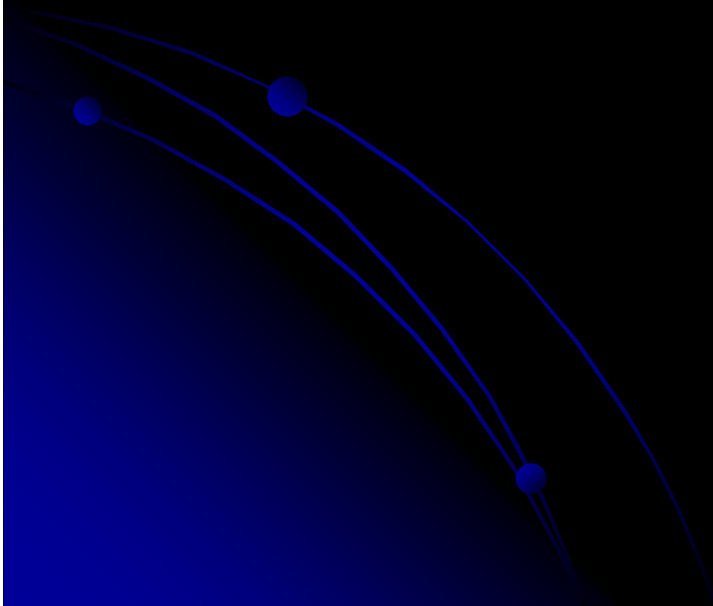
Traceurs environnementaux

- Produits qui sont présents dans l'environnement en relation avec les activités humaines et présentant une **distribution ou une évolution spatiale et temporelle** dont la mise en évidence **permet d'évaluer certaines propriétés des eaux souterraines** (origine, âge, mélanges, ...)

→ Principales catégories:

- Retombées radioactives produites lors de tests et accidents nucléaires (âge des eaux ...)
- Polluants spécifiques: nitrates, pesticides, sels... (interactions surface – souterrain, ...),

Traceurs artificiels



Traceurs artificiels

- Toute substance/ tout produit **de composition chimique ou de propriété physique connue, volontairement introduit** dans l'eau souterraine (généralement en quantité connue et sur une courte durée), en vue de **mettre en évidence certaines caractéristiques/ propriétés** de l'eau souterraine ou du milieu souterrain en général (direction d'écoulement, propriétés hydrodispersives, réactivité du milieu, ...)
- Principe :
 - Traceur injecté en un point (piézomètre, ...).
 - Suivi de son évolution (échantillonnage) en d'autres points (puits, source, ...), au cours du temps

Traceurs artificiels

- Critères de sélection des traceurs artificiels

- **Propriétés physico-chimiques du produit**

- Limite de détection analytique
- Toxicité
- Gustativité
- Coloration

liés
(rapport signal/bruit)

- **Conditions expérimentales**

- Bruit de fond du traceur dans l'eau souterraine à tracer
- Stabilité chimique du traceur dans l'environnement étudié
- Distance de traçage + objectifs des essais

- **Contraintes pratiques**

- Équipements disponibles (analyses, ...)
- Maniabilité, solubilité, ...
- Coût du produit vs quantité nécessaire

Traceurs artificiels

- Principales catégories de traceurs artificiels
 - **Traceurs salins**
 - Anions & Cations
 - **Traceurs fluorescents**
 - **Autres traceurs**
 - Microsphères (fluorescentes ou pas)
 - Bactériophages
 - DNA
 - Traceurs radioactifs

Traceurs artificiels

Traceurs salins

- iodure I^- → 3-10 ppb
- bromure Br^-
- chlorure Cl^-
- nitrate NO_3^-
- lithium Li^+ → 3-10 ppb
- Potassium K^+
- Sodium Na^+
- Strontium Sr^{2+}

Traceurs fluorescents

- fluoresceine → 0.01 ppb
- naphthionate → 0.1 ppb
- rhodamines → 0.01 ppb
- éosine Yellowish
- pyranine
- photine

Traceurs artificiels

- Dosage des traceurs salins

- Chlorure Cl^- : titrage potentiométrique

Les ions chlorures present en solution sont précipités avec une solution titrée de nitrate d'argent 0.01M. Le terme de la réaction est déterminé potentiométriquement par une cellule de mesure faite d'une électrode indicatrice d'argent (Ag^0), couplée à une électrode Hg-HgSO_4

- Iodure (I^-), Bromure (Br^-), Nitrate (NO_3^-): mesure potentiométrique directe

- Potassium (K^+), Sodium (Na^+), Strontium (Sr^{2+}): spectrométrie d'absorption de flamme

- Lithium (Li^+): spectrométrie d'émission de flamme

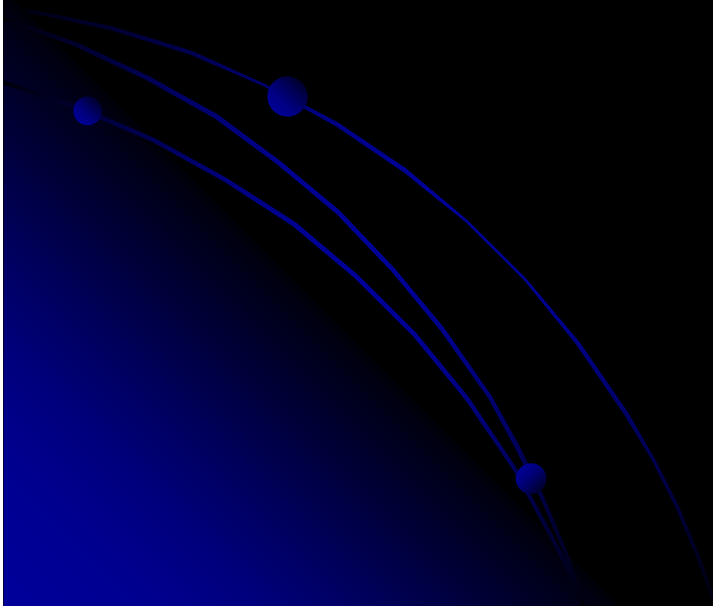
- ...

Traceurs artificiels

- Dosage des traceurs fluorescents
 - **Spectrofluorométrie**: chaque traceur fluorescent est caractérisé par une paire de longueurs d'onde (excitation-émission) spécifiques, rendant le **processus d'identification et de quantification très sélectif et très sensible**

Traceur	Excitation (nm)	Emission (nm)
Fluorescéine	491	512
Naphionate	322	420
Rhodamine WT	554	580
Rhodamine B	554	576
Sulforhodamine B	564	583
Amidorhodamine G	531	552
Eosin Y	516	538
Thinopal	346	435

Techniques de traçage



Techniques de traçage

- Types d'essais

- Essais qualitatifs

- Mise en évidence de **liens hydrauliques** et de **communications** entre deux ou plusieurs points du milieu souterrain (pertes – résurgences, circulations karstiques, ...)
- **Directions d'écoulement** dans la nappe
- **Vitesses et temps de transfert**

- Essais quantitatifs

- **Identification des processus** d'écoulement - transport
- **Quantification des paramètres** associés à ces processus
- Identification de l'**hétérogénéité** du milieu souterrain

Techniques de traçage

- Classification générale

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

Techniques de traçage

- Méthodes de puits unique

- **Injection**

Traceur injecté dans un puits ou piézomètre, en veillant à ne pas perturber les écoulements dans et au voisinage de l'ouvrage

- **Monitoring**

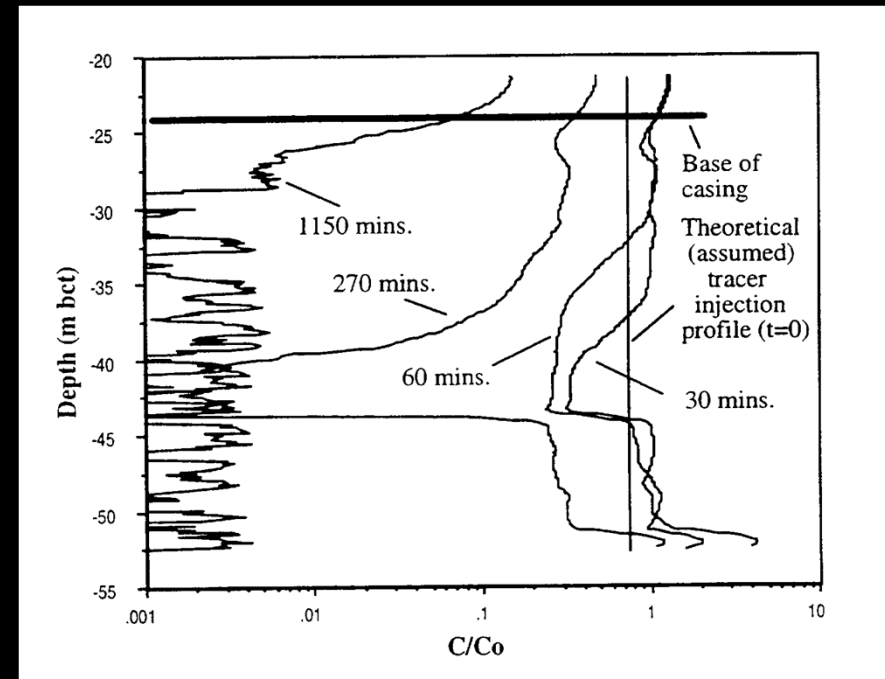
- Dilution ponctuelle: évolution de concentration dans le puits est suivie au cours du temps
 - Injection/repompage: après un certain temps, on pompe dans le puits d'injection et on suit l'évolution de concentration au cours du pompage

- **Interprétation**

Propriétés hydrauliques (flux de Darcy) et hydrodispersives près du point d'injection

- **Avantages/inconvénients**

- Relativement simple à mettre en œuvre et 1 seul puits nécessaire
 - Infos très locales + influence forte de l'équipement du puits



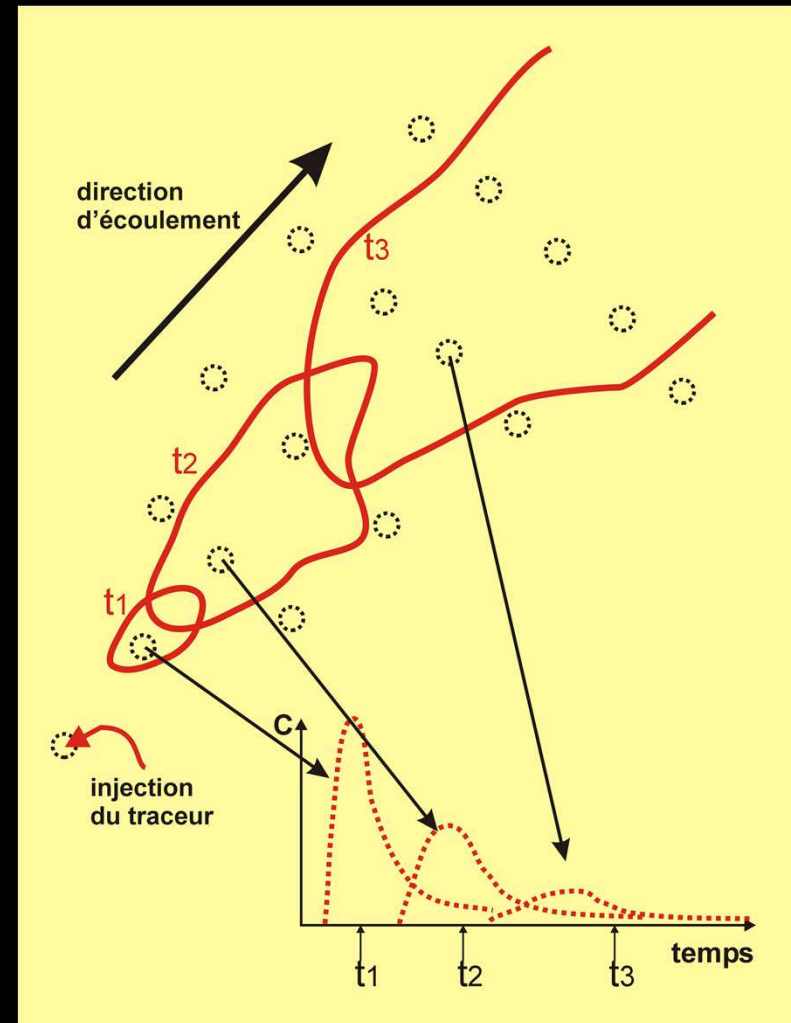
Techniques de traçage

- **Traçage en écoulement naturel**
 - **Injection**

Traceur injecté dans un puits ou piézomètre, à l'amont du site, migre naturellement dans l'aquifère
 - **Monitoring**

Evolution de la concentration suivie dans d'autres puits situés à l'aval hydraulique du point d'injection
 - **Interprétation**

Analyse des moments spatiaux et temporels du nuage de traceur (~compliqué !)
 - **Avantages/inconvénients**
 - Propriétés hydrodispersives en conditions naturelles d'écoulement, possibilité de résultats 3D
 - Coûteux (puits), influence de l'équipement et de la technique d'échantillonnage



Techniques de traçage

- Traçages en écoulement radial convergent

- **Injection**

- Pompage au puits « central », généralement à débit constant
- Injection d'un ou plusieurs traceur(s) dans des puits situés dans la zone d'appel du pompage

- **Monitoring**

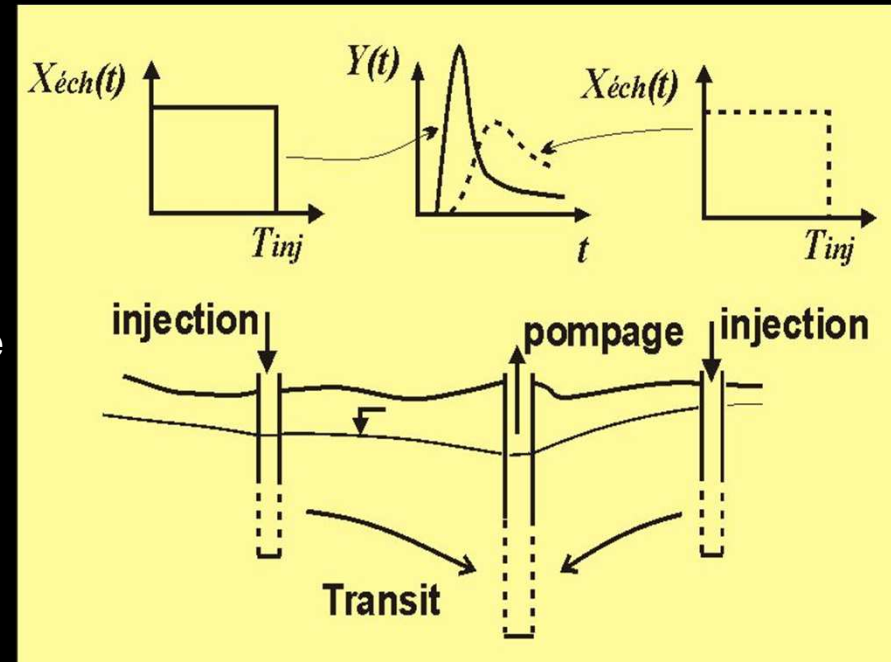
- Echantillonnage au puits de pompage et dosage des concentrations
→ Courbe de restitution

- **Interprétation**

Interprétation de la courbe de restitution (v. suite)

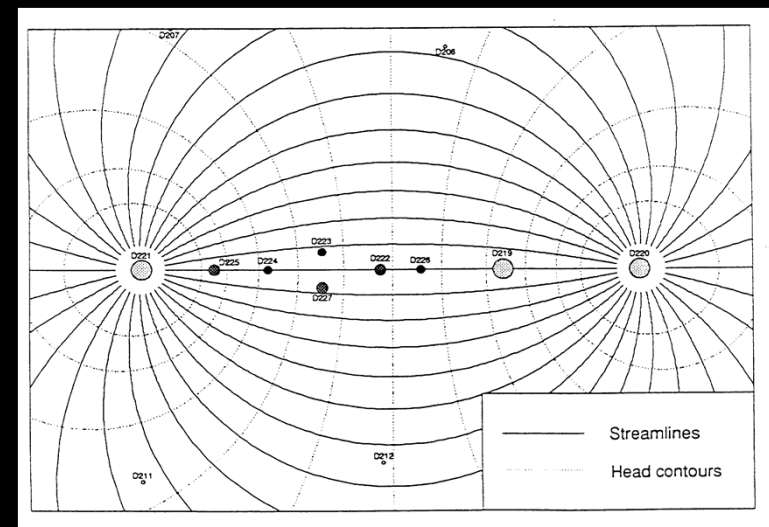
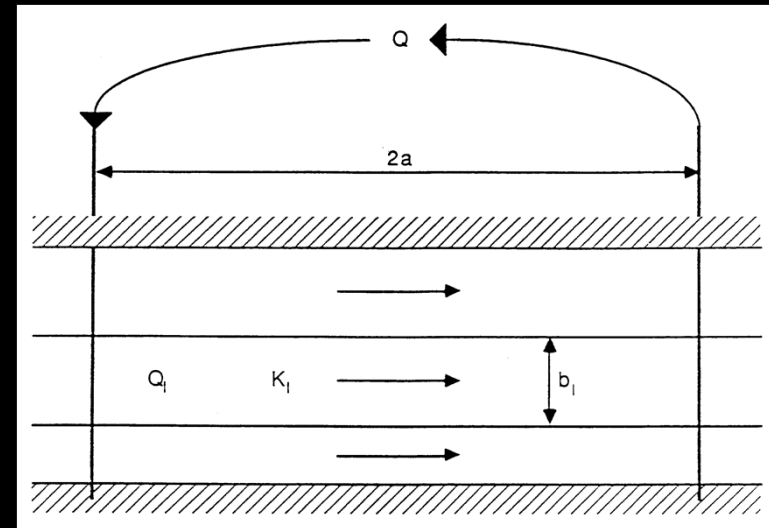
- **Avantages/Inconvénients**

- Analyse quantitative sur base de la comparaison entre masse restituée au puits et masse injectée; conditions hydrodispersives en conditions de pompage
- Mise en œuvre relativement compliquée



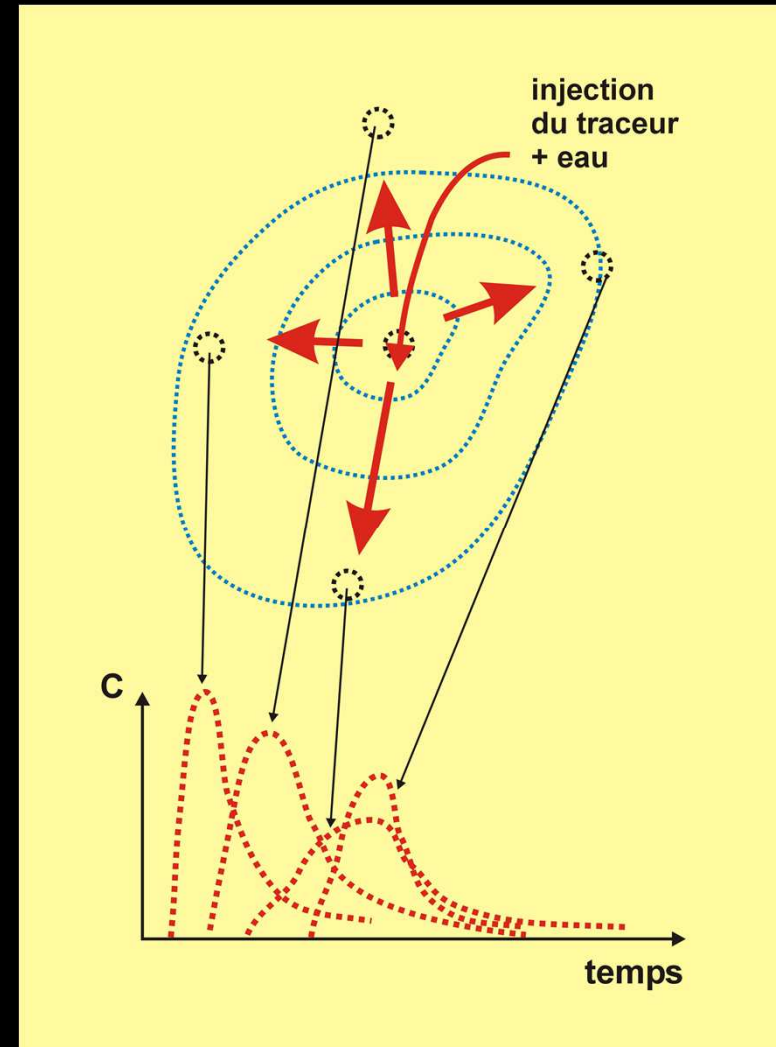
Techniques de traçage

- Traçages en configuration dipôle
 - **Injection**
 - Pompage au puits de reprise et réinjection de l'eau pompée + traceur dans le piézo d'injection
 - **Monitoring**
 - Echantillonnage au puits de pompage et dosage des concentrations
→ Courbe de restitution
 - **Interprétation**
 - Sur base de la courbe de restitution
 - **Avantages/inconvénients**
 - En théorie, on investigate une portion plus grande de milieu souterrain comparé au radial convergent
 - Conditions d'écoulement peu réalistes

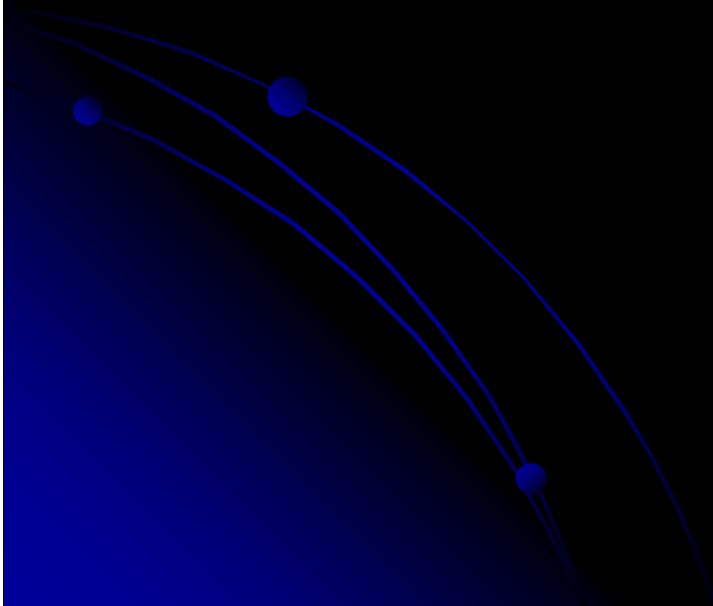


Techniques de traçage

- **Traçage en écoulement radial divergent**
 - **Injection**
 - injection d'eau + traceur dans puits central d'injection (écoulement radial divergent)
 - **Monitoring**
 - Echantillonnage dans des puits situés autour du puits d'injection
 - **Interprétation**
 - Sur base des évolutions de concentrations dans les ouvrages périphériques
 - **Avantages/inconvénients**
 - 1 injection permet de tester plusieurs directions dans la nappe
 - Conditions d'écoulement pas toujours simples à créer → résultats hasardeux !

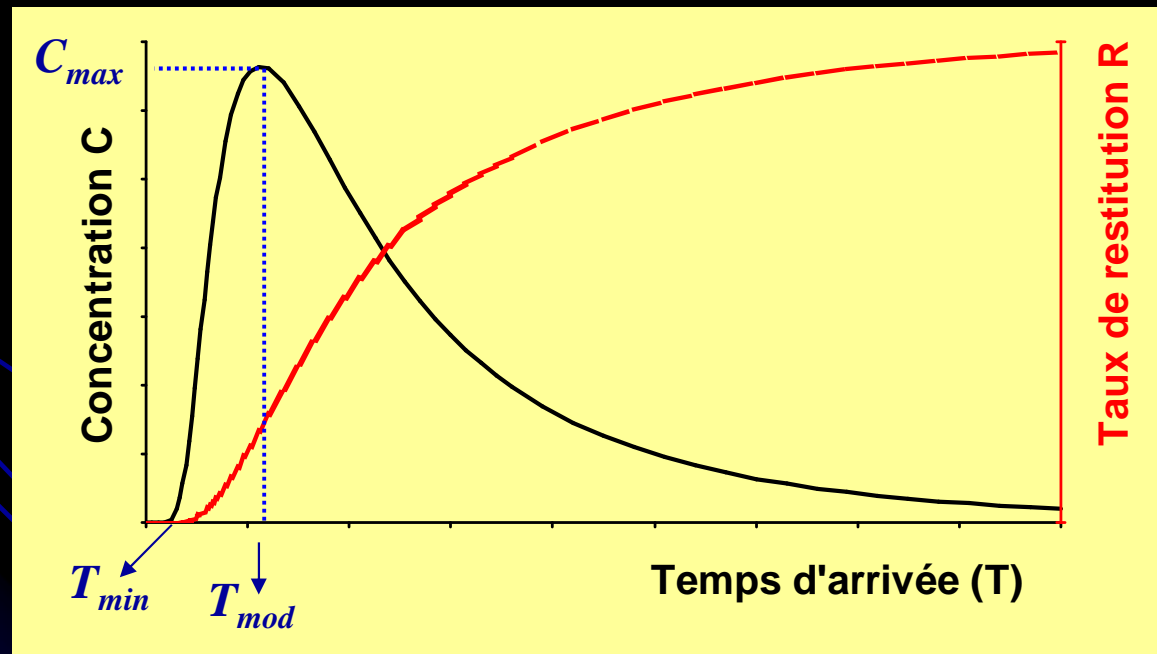


Interprétation des essais de traçage



Interprétation des essais de traçage

- Information de base: la **courbe de restitution**
 - Interprétation générale
 - 1^{ère} arrivée $T_{min} \rightarrow$ Vitesse maximale $V_{max} = d/T_{min}$
 - Temps modal $T_{mod} \rightarrow$ Vitesse modale $V_{mod} = d/T_{mod}$
 - Taux de restitution $R = M_{rest}/M_{inj}$ (**radial convergent !**)



Interprétation des essais de traçage

- Identification des processus hydrodispersifs

Courbe de restitution (CDR) = **distribution des temps de séjour** du traceur dans l'aquifère

- Influencée par tous les **processus affectant la mobilité de l'eau et des solutés** dans le sous-sol
- **Image indirecte du milieu souterrain** entre le point d'injection et le(s) point(s) d'observation/reprise du traceur
- **Information progressivement « enregistrée » dans la CDR** en cours de migration
 - **1ères arrivées: transit le plus rapide → migration**
 - **Arrivées tardives: transit le plus lent → effets de retard**

Comment extraire cette information de manière optimale ?

Premièrement: voir comment les processus hydrodispersifs peuvent influencer la CDR

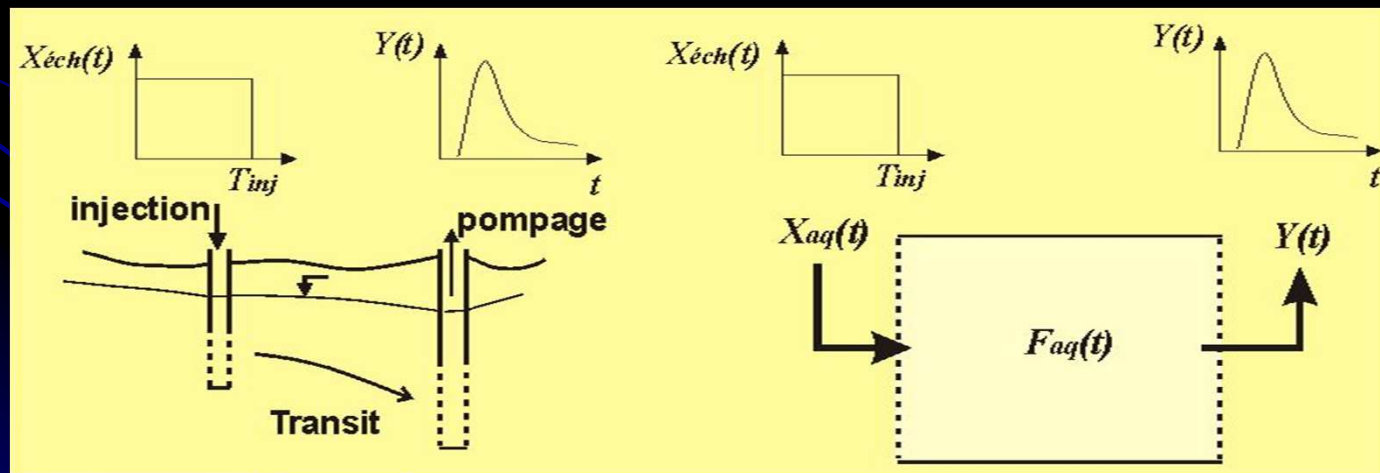
Interprétation des essais de traçage

- Facteurs susceptibles d'influencer la courbe de restitution

$$Y(t) = F_{aq}(t) * X_{aq}(t)$$

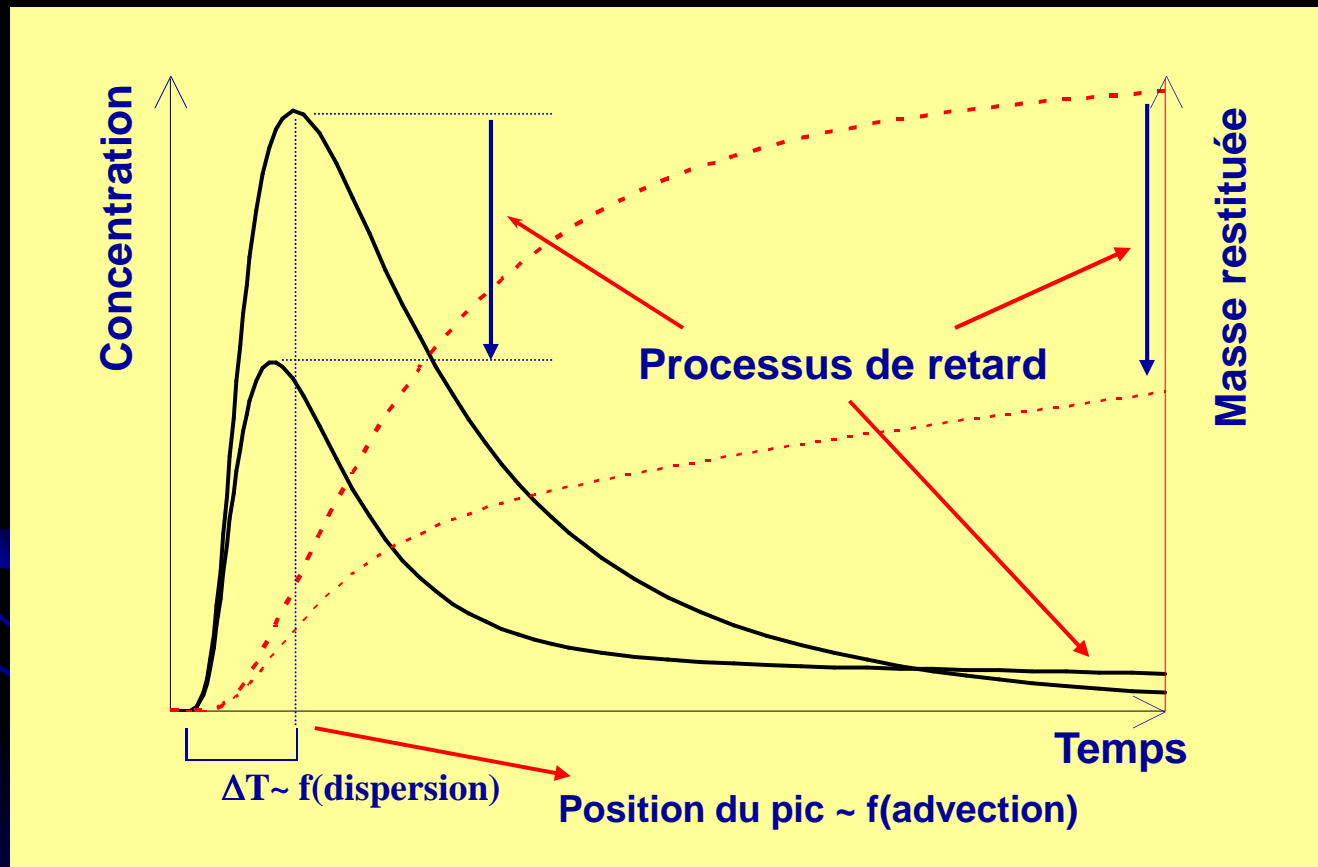
- $Y(t)$ dépend de

- $F_{aq}(t)$:
 - Propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives,
 - Conditions d'écoulement,
 - Echelle de travail,
 - $X_{aq}(t)$
- $X_{aq}(t)$: Conditions d'injection du traceur
- interactions traceur – milieu souterrain (sorption, dégradation ...)



Interprétation des essais de traçage

- Identification des processus hydrodispersifs

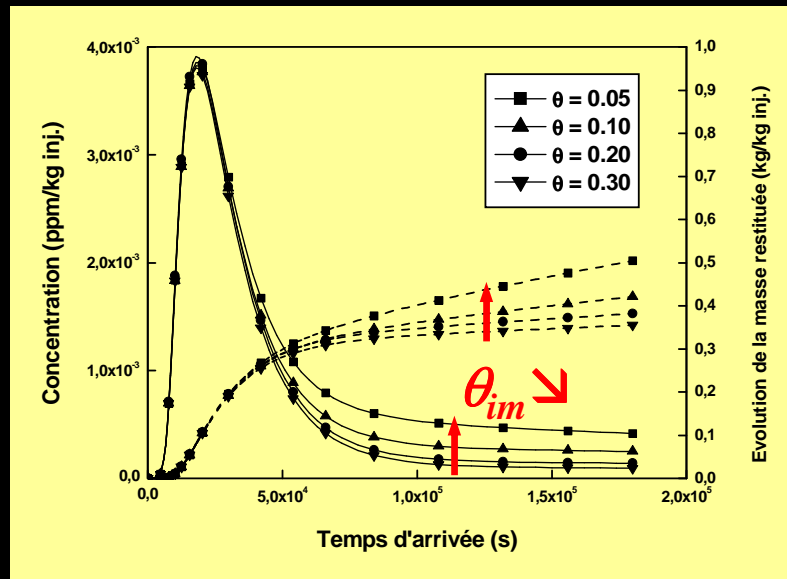
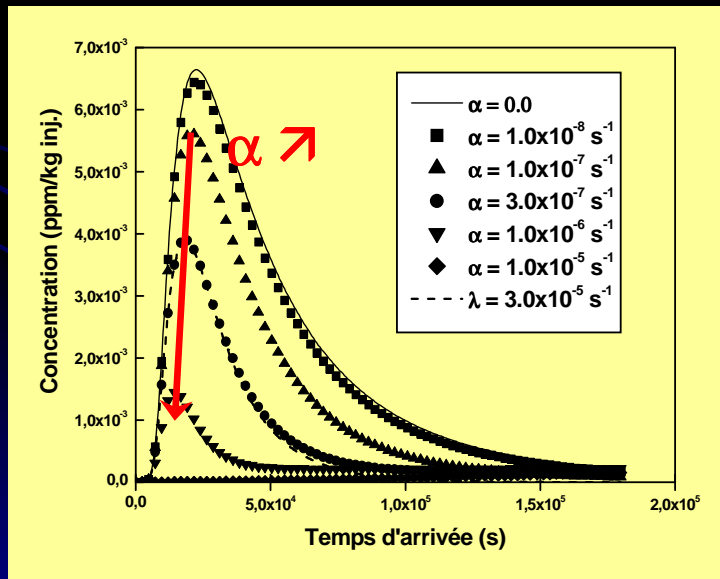


Interprétation des essais de traçage

- Quantification des paramètres hydrodispersifs
 - Généralement, les **processus agissent simultanément** et beaucoup de paramètres doivent être estimés
 - En plus, influence de l'**hétérogénéité spatiale** du milieu souterrain
 - Identification des paramètres:
 - **Quantifier leur amplitude respective**
→ ajustement de la CDR
 - **Evaluer leur distribution spatiale**
→ comparaison/ utilisation de plusieurs résultats de traçage

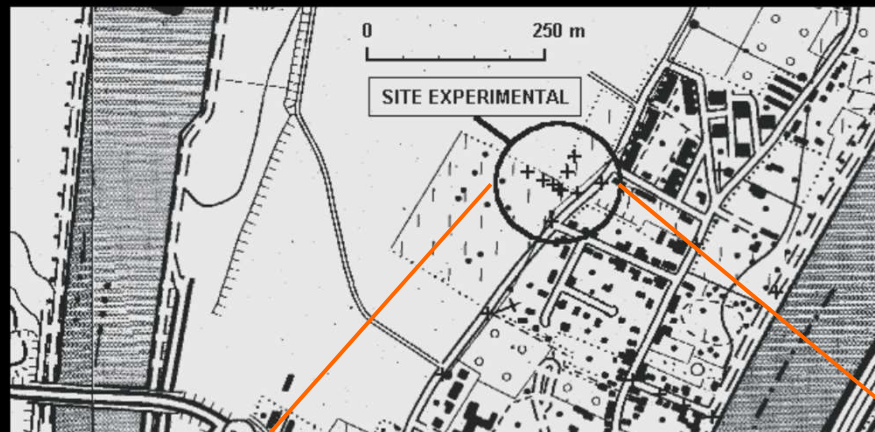
Interprétation des essais de traçage

- Influence des paramètres
 - Porosité efficace et dispersivité longitudinale
 - Position du pic de restitution (concentration modale) et de l'étalement de la courbe autour de ce pic
 - Adsorption à l'équilibre → retard de toute la courbe
 - Coefficient de transfert α et teneur en eau immobile θ_{im}

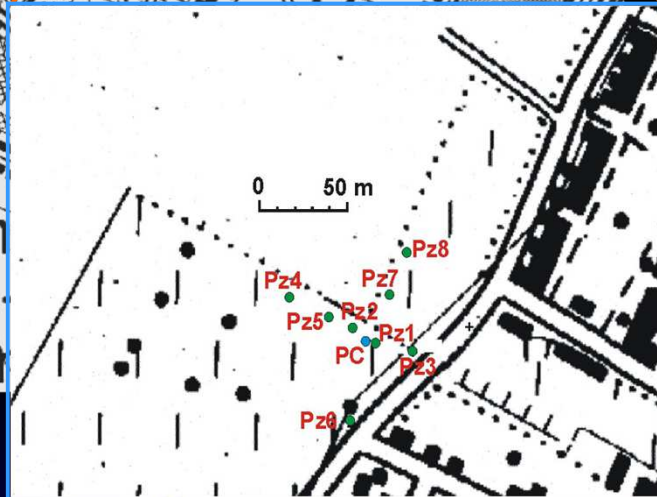


Interprétation des essais de traçage

- Exemple: Essais de traçage à Hermalle\Argenteau



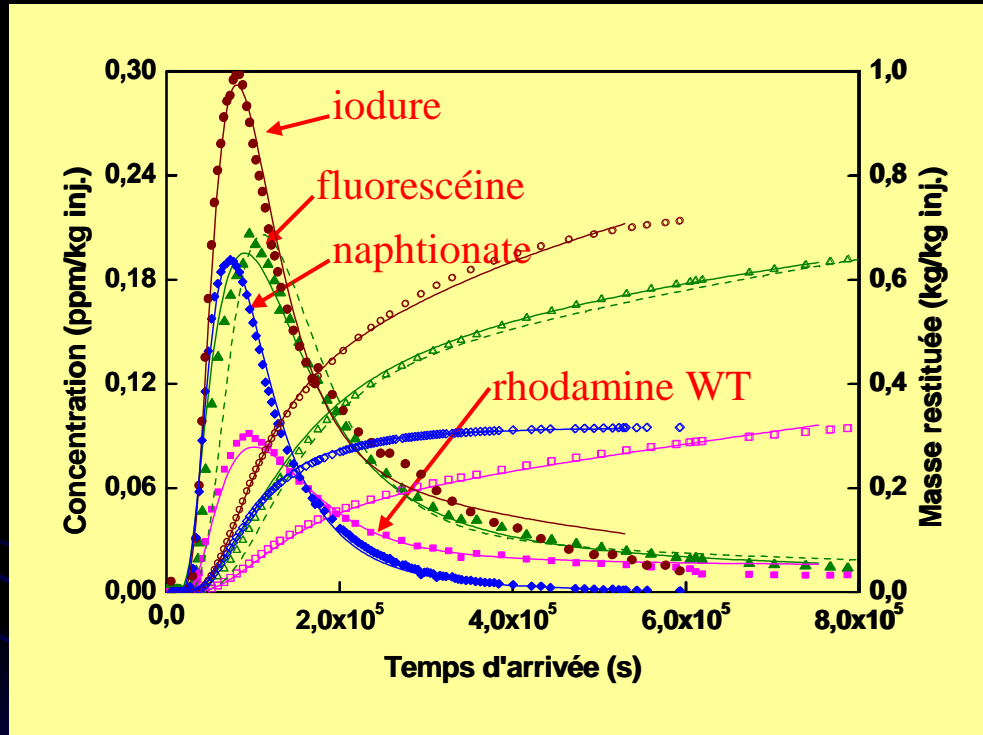
- Nappe alluviale de la Meuse
- 1 Puits ($Q = 52.6 \text{ m}^3/\text{h}$)
- 8 piézomètres (4→50m)
- Essais de traçage dans la zone saturée



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

Interprétation des essais de traçage

- Injections réalisées au Piézomètre Pz6 (46m)



- Iodure: conservatif
- Naphionate: dégradation
- Fluorescéine: sorptive
- Rhodamine WT: sorptive

Modélisation des courbes de restitution avec le code SUFT3D

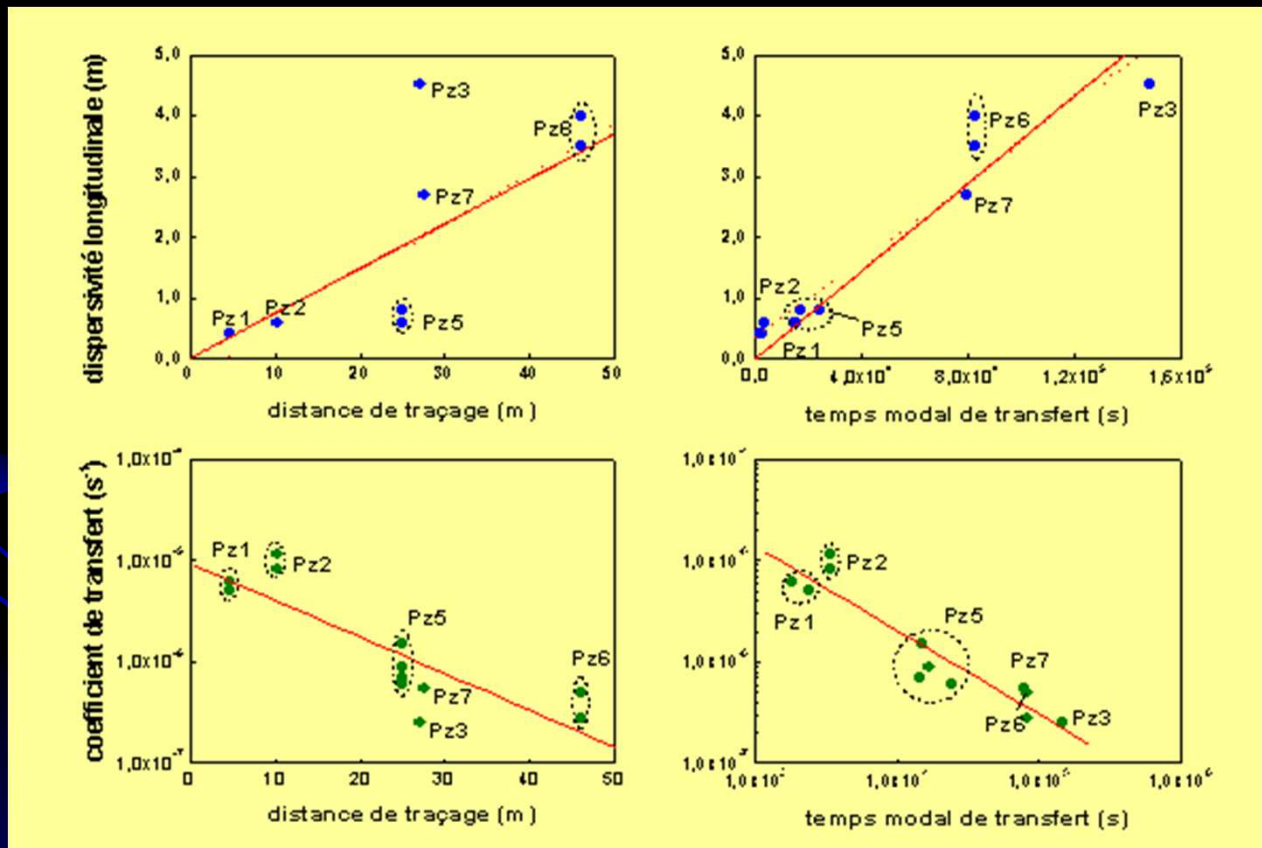
→ **advection-dispersion + effet d'eau immobile**

Iodure: $\theta_m=0.085$, $\alpha_L=3.5m$, $\theta_{im}=0.13$, $\alpha=5.0 \times 10^{-7} s^{-1}$

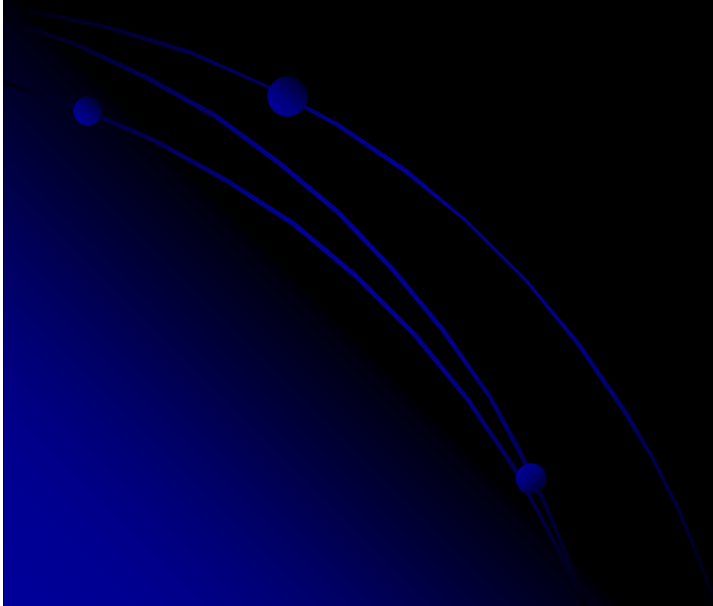
Introduction aux techniques de traçage en hydrogéologie

Interprétation des essais de traçage

- Effets d'échelle affectant les paramètres hydrodispersifs
 - Porosité efficace et porosité d'eau immobile: peu marqué
 - Dispersivité longitudinale et coefficient de transfert: assez net

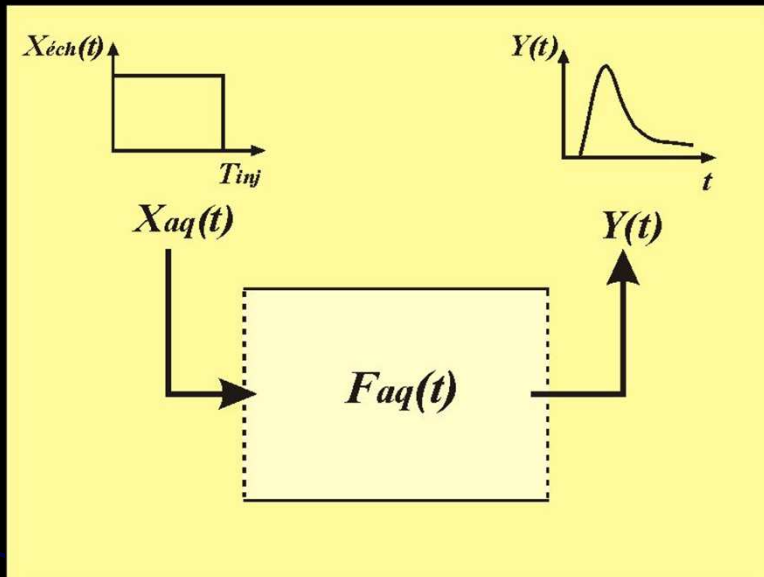


Conditions d'injection des traceurs



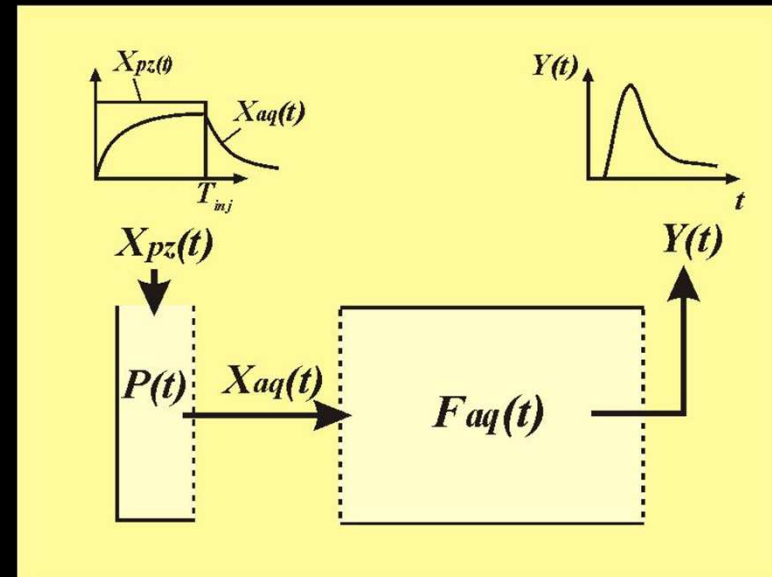
Conditions d'injection des traceurs

- Conceptualisation de l'injection



Représentation « classique »

$X_{aq}(t)$ souvent assimilé au profil d'injection du traceur $X_{pz}(t)$



Représentation « correcte »

$$Y(t) = F_{aq}(t) * X_{aq}(t)$$

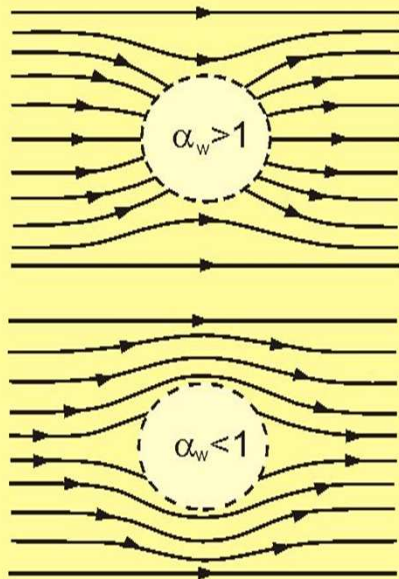
$$= F_{aq}(t) * [P(t) * X_{pz}(t)]$$

Conditions d'injection des traceurs

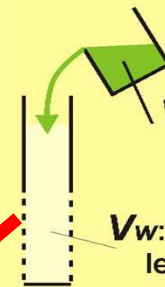
- Facteurs influençant l'injection des traceurs

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

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



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

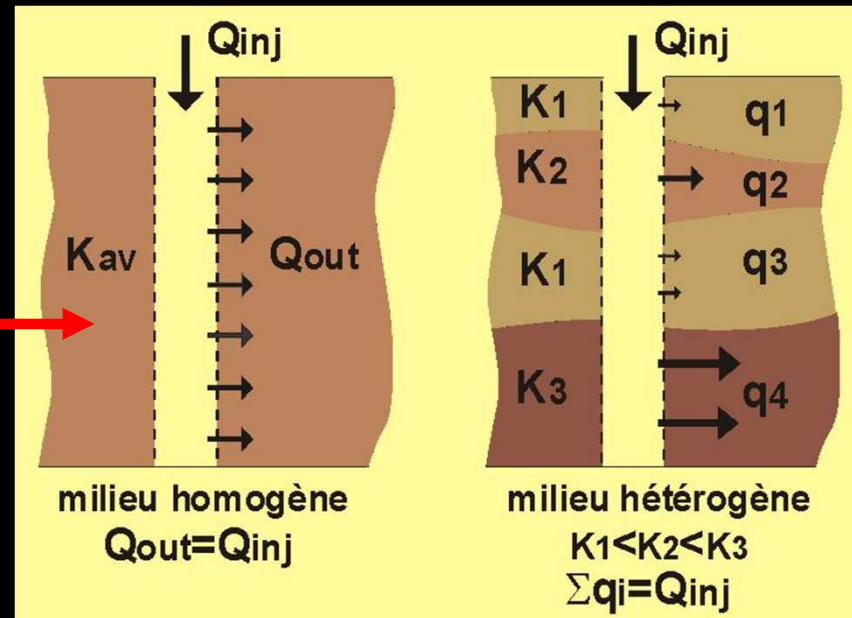


V_{inj} : volume de fluide traceur

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

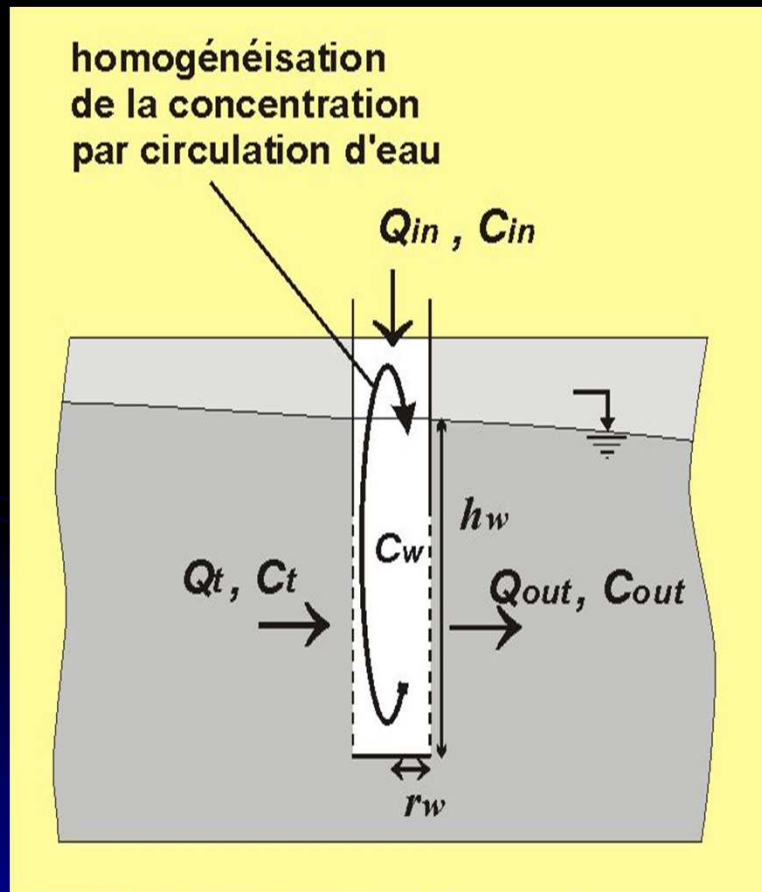
V_w : volume d'eau dans le puits d'injection

+ piégeage potentiel du traceur dans le puits !



Conditions d'injection des traceurs

• Modélisation de l'injection



Conservation de l'eau

$$\frac{\partial V_w(t)}{\partial t} = \pi r_w^2 \frac{\partial h_w}{\partial t} = Q_{in}(t) + Q_t(t) - Q_{out}(t) \quad (1)$$

Conservation de traceur

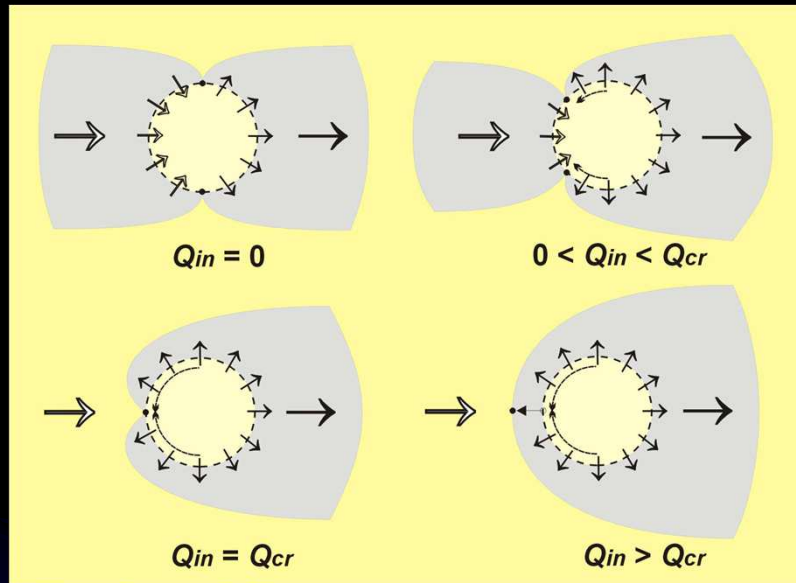
$$\begin{aligned} \frac{\partial M_t}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} (V_w C_w) = r_w^2 \left(C_w \frac{\partial h_w}{\partial t} + h_w \frac{\partial C_w}{\partial t} \right) \\ &= Q_{in} C_{in} + Q_t C_t - Q_{out} C_{out} \end{aligned} \quad (2)$$

Equation générale du modèle :

$$\pi r_w^2 h_w \frac{\partial C_w}{\partial t} = Q_{in} (C_{in} - C_w) + Q_t (C_t - C_w) \quad (3)$$

Conditions d'injection des traceurs

• Modélisation de l'injection



Débit transitant par les crépines calculé à partir de la théorie de Bideaux & Tsang (1991)

If $Q_{in} > Q_{cr}$

$$Q_t = 0$$

If $Q_{in} \leq Q_{cr}$

$$Q_t = 2r_w e V_w \sin(\arccos Q^*) - \frac{Q_{in}}{2\pi} (2 \arccos Q^*)$$

$$Q^* = Q_{in}/Q_{cr} \text{ et } Q_{out} = Q_{in} + Q_t$$

Pendant l'injection d'eau (traceur ou chasse) :

Quantité de traceur quittant le pz **proportionnelle à C_w** ($=Q_t C_w$)

Après l'injection ($Q_{in} = 0$) :

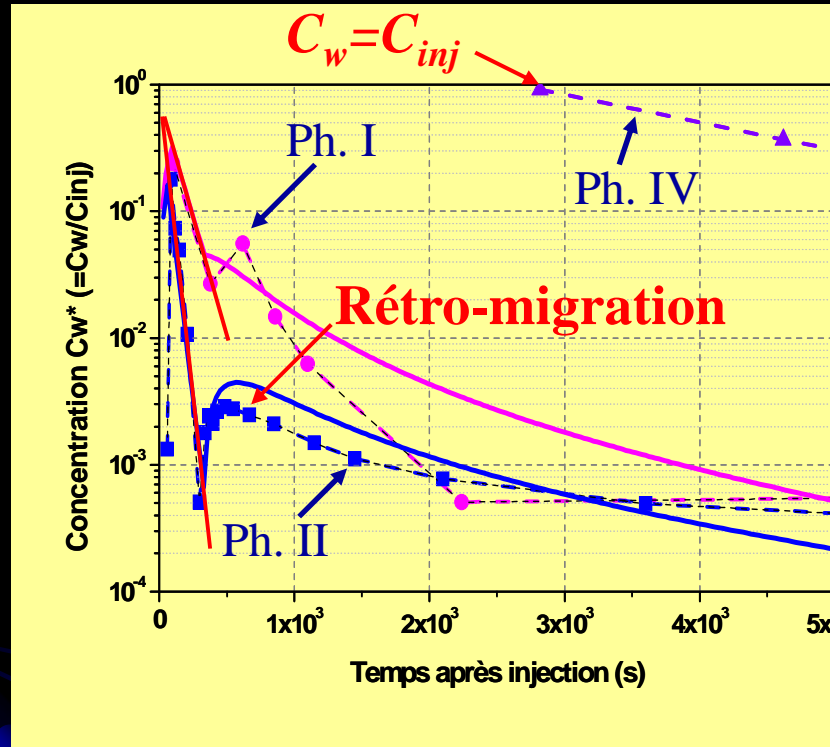
Quantité de traceur quittant le pz **proportionnelle à $(C_w - C_{aq})$** ($=Q_t (C_w - C_{aq})$)

Conditions d'injection des traceurs

Injections 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 ⁻¹)	V_{ch} (m ³)	T_{ch} (s)	Q_{ch} (m ³ s ⁻¹)
I	naphtionate	0.2	0.007	100	7.0×10^{-5}	0.014	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}			

Conditions d'injection des traceurs

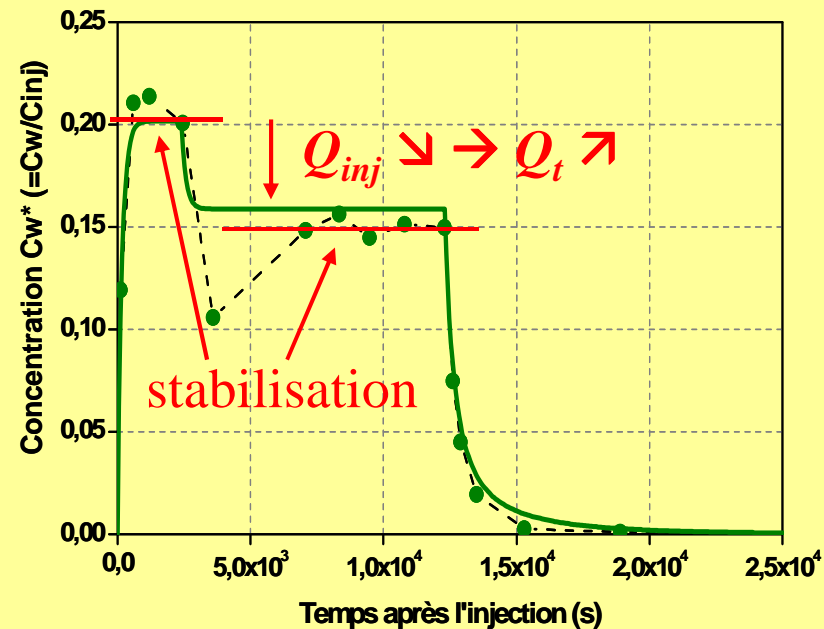


← Phases I, II et IV

↘ Phase V

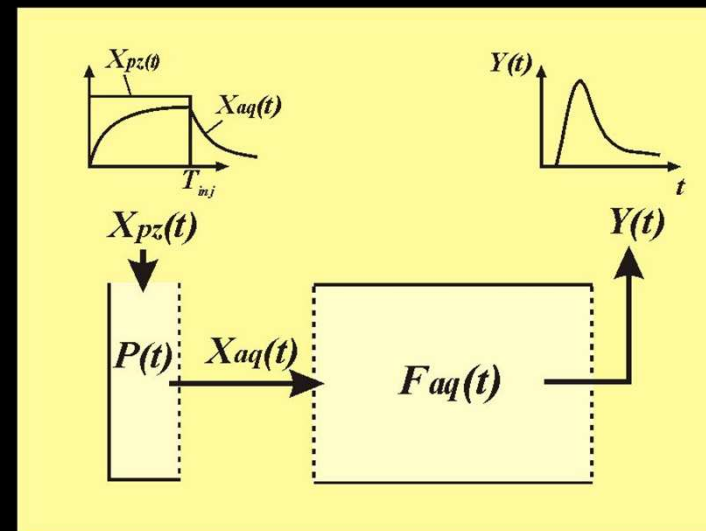
Paramètres du modèle

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



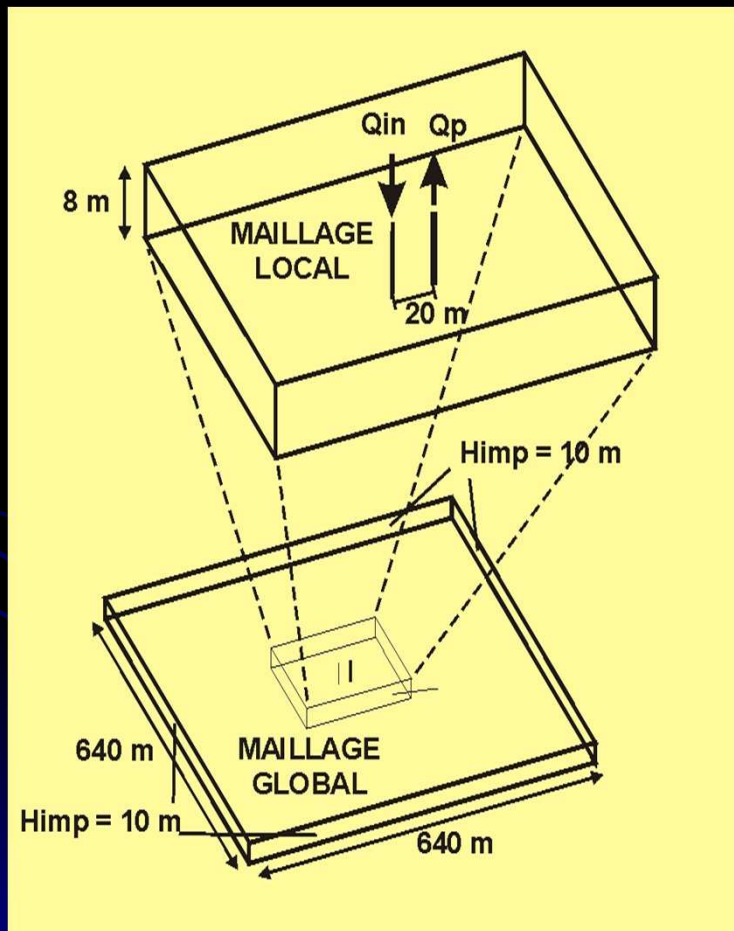
Conditions d'injection des traceurs

- Influence des conditions d'injection
 - Objectif du traçage \rightarrow identifier $F_{aq}(t)$
 - Donnée : $Y(t) = F_{aq}(t) * X_{aq}(t)$
 - $F_{aq}(t) \neq Y(t)$ quand $X_{aq}(t) \neq \delta_{aq}(t) \rightarrow [X_{pz}(t) * P(t)] \neq \delta_{aq}(t)$
 - $X_{pz}(t) \neq \delta(t) \rightarrow$ influence de la durée expérimentale d'injection
 - $P(t) \neq \delta(t) \rightarrow$ influence des interactions piézomètre - aquifère



Conditions d'injection des traceurs

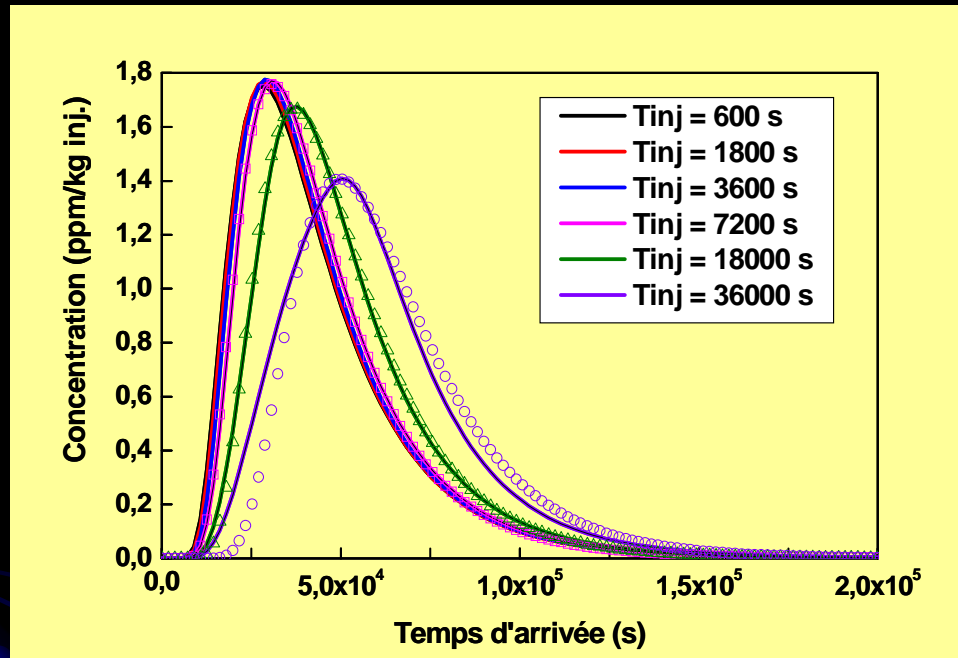
- Test synthétique



- $Q_p = 50\text{ m}^3/\text{h}$
- Aquifère
 - $K_s = 5.0 \times 10^{-2}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
 - $\theta_m = 0.05$
 - $\alpha_L = 2\text{ m}$
 - pas d'adsorption, pas d'effet d'eau immobile

Conditions d'injection des traceurs

- Influence de la durée d'injection



$$T_{adv} = 36191s \sim 10h$$

- Durée critique d'injection de l'ordre de **1h**
- Si T_{inj} augmente:
 - θ_m surévalué
 - α_L sous-évalué

T_{inj} (s)	θ_m (-)	α_L (m)
δ_{aq}	0.050	2.00
7200	0.051	1.83
18000	0.059	1.45
36000	0.077	1.15

Conditions d'injection des traceurs

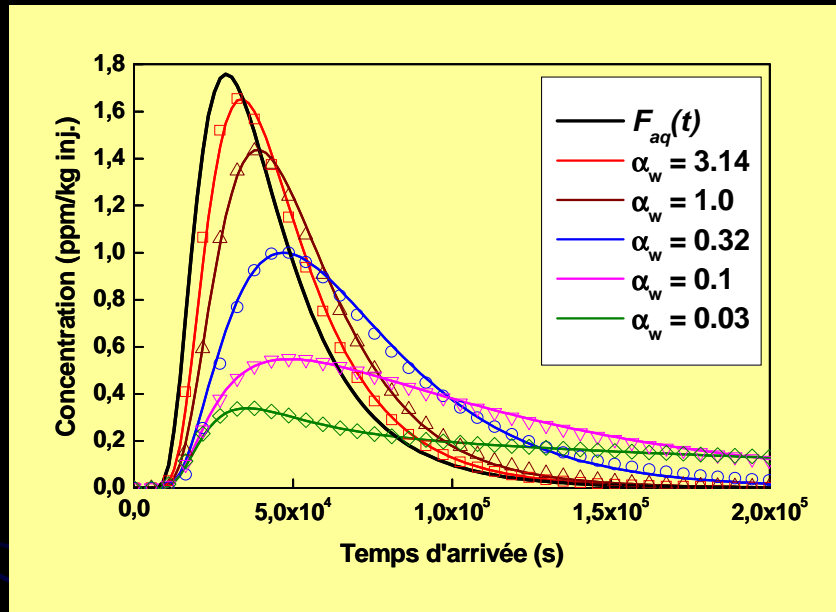
- Influence des interactions puits-aquifère

Si T_{inj} négligeable: $X_{pz}(t) \sim \delta_{pz}(t)$

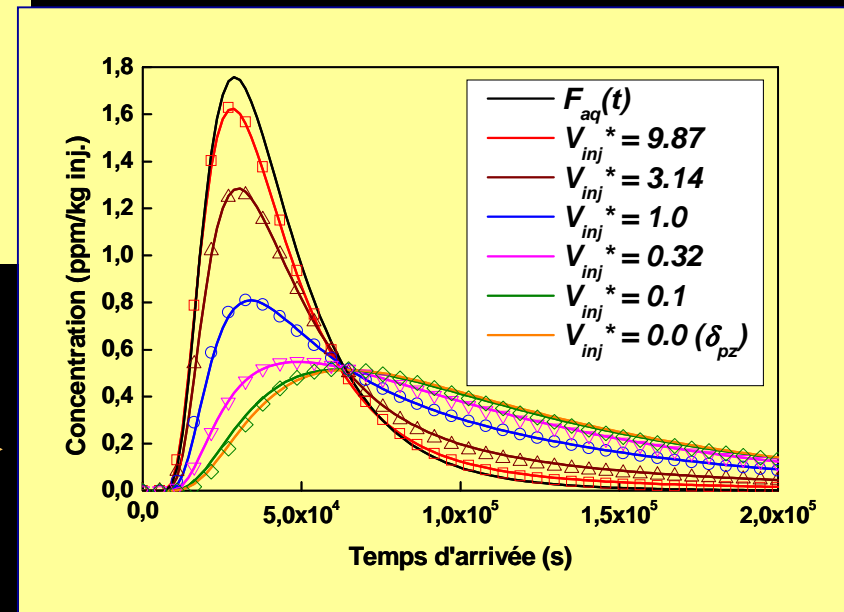
- $V_{inj}^* \gg$ grande quantité de traceur directement dans l'aquifère (effet court-circuit)
 - influence minimale de l'injection
- $V_{inj}^* \ll$ quantité non négligeable de traceur dans l'ouvrage à la fin de l'opération d'injection
 - influence f (vitesse de renouvellement de l'eau dans le Pz) donc du débit de transit Q_t^0
- Tests réalisés en faisant varier
 - le coefficient de mélange V_{inj}^* (volume de fluide traceur V_{inj})
 $0.1 < V_{inj}^* < 10$
 - la vitesse de renouvellement de l'eau (débit de transit $Q_t^0 \rightarrow \alpha_w$)
 $0.03 < \alpha_w < 3.14$

Conditions d'injection des traceurs

- Influence des interactions puits-aquifère



$$V_{inj}^* = 1$$



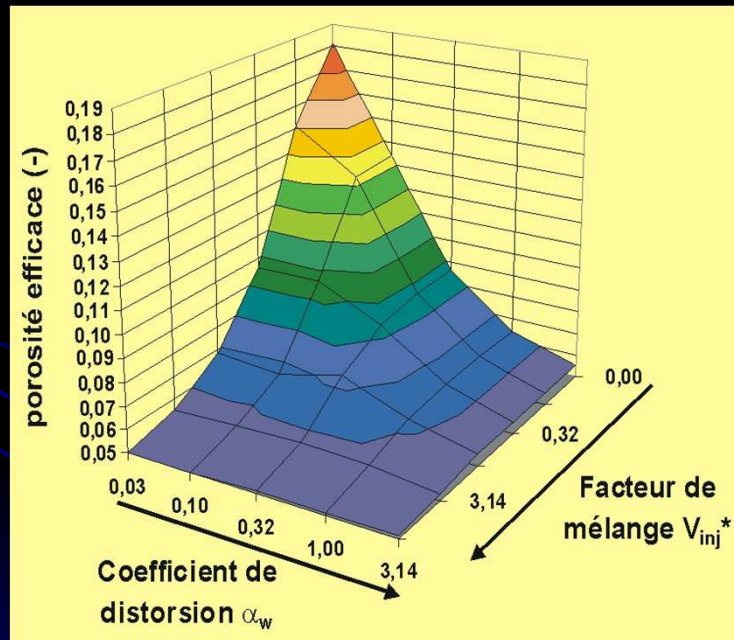
$$\alpha_w = 0.32$$

Conditions d'injection des traceurs

- Influence des interactions puits-aquifère

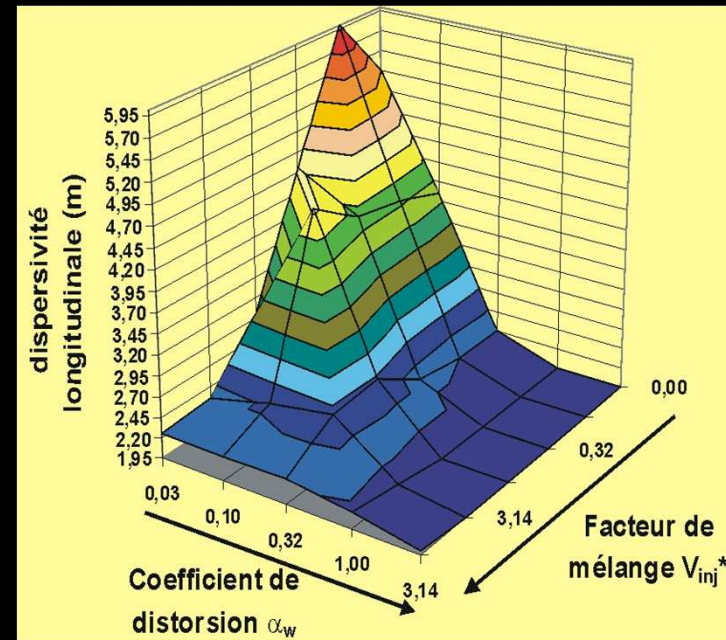
Impact sur les valeurs trouvées pour les paramètres ...

Porosité efficace



Valeur réelle: $\theta_m = 0.05$

Dispersivité longitudinale

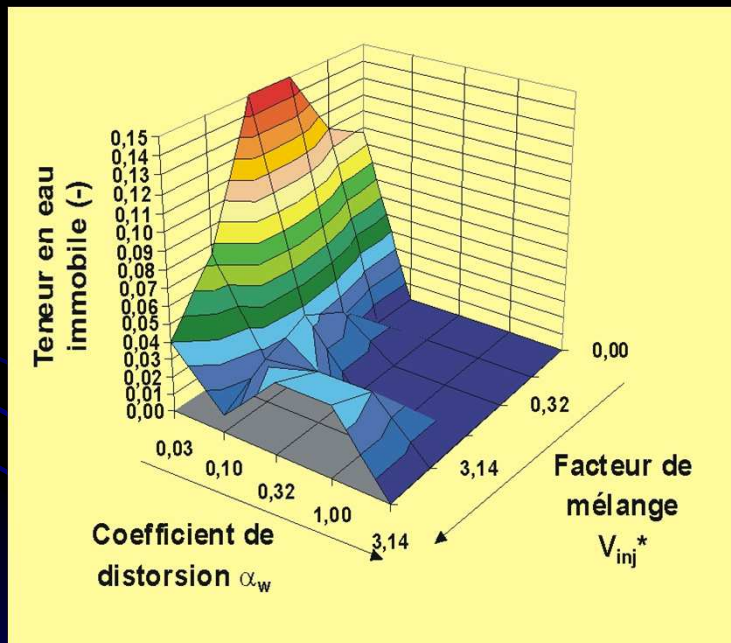


Valeur réelle: $\alpha_L = 2m$

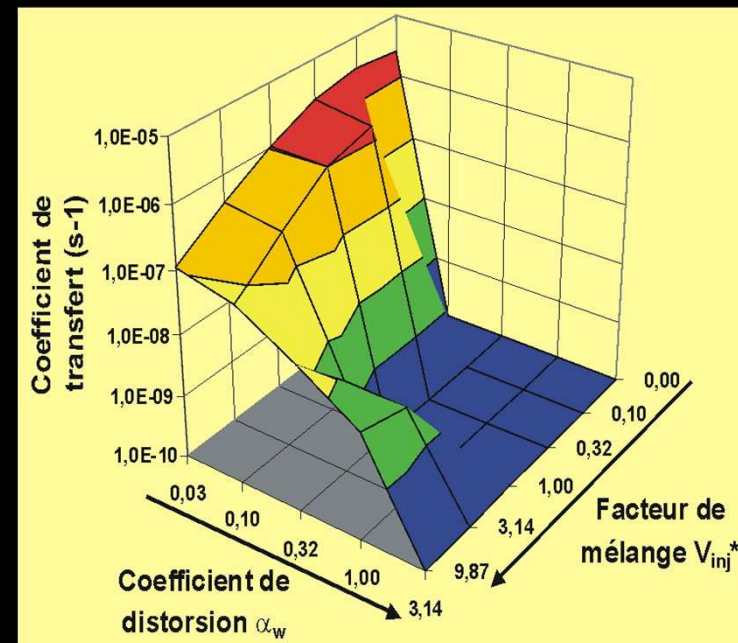
Conditions d'injection des traceurs

- Influence des interactions puits-aquifère
...et identification erronée des processus agissant !

Porosité d'eau immobile



Coefficient de transfert



En réalité, aucun effet d'eau immobile !

Conditions d'injection des traceurs

- Grande sensibilité de la courbe de restitution aux conditions d'injection des traceurs

! Sensibilité plus grande aux interactions puits-aquifère qu'à la durée expérimentale d'injection !

- Erreurs potentielles

- Identification erronée des processus agissant


ici: pseudo-effet d'eau immobile

- Quantification peu précise des paramètres hydrodispersifs

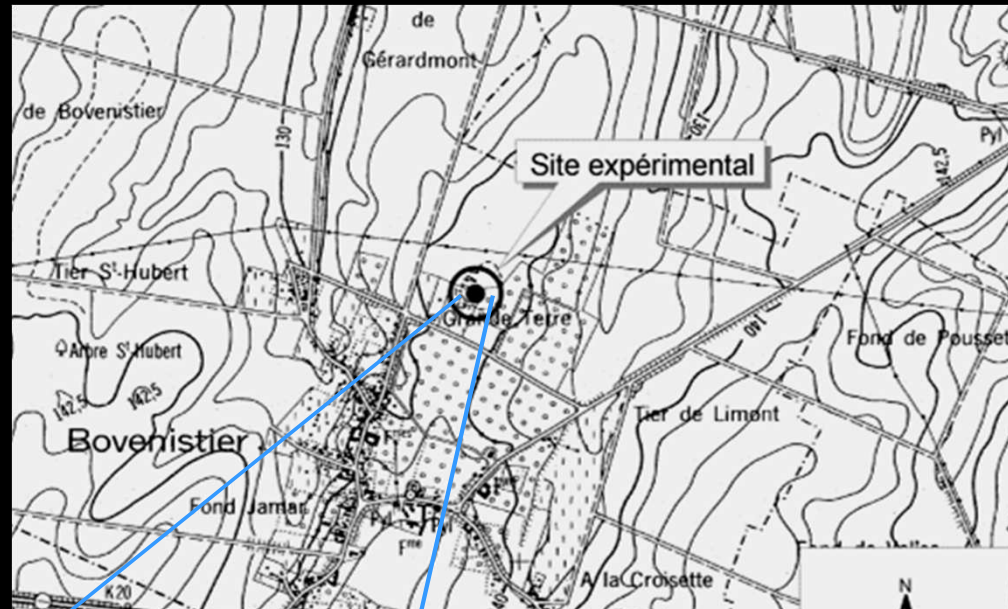
ici: généralement une surestimation de la porosité efficace et de la dispersivité longitudinale

→ Importance de **bien maîtriser l'injection** (suivi de la concentration) ou de faire en sorte que son **influence soit négligeable** ($V_{inj}^* \sim 10$)

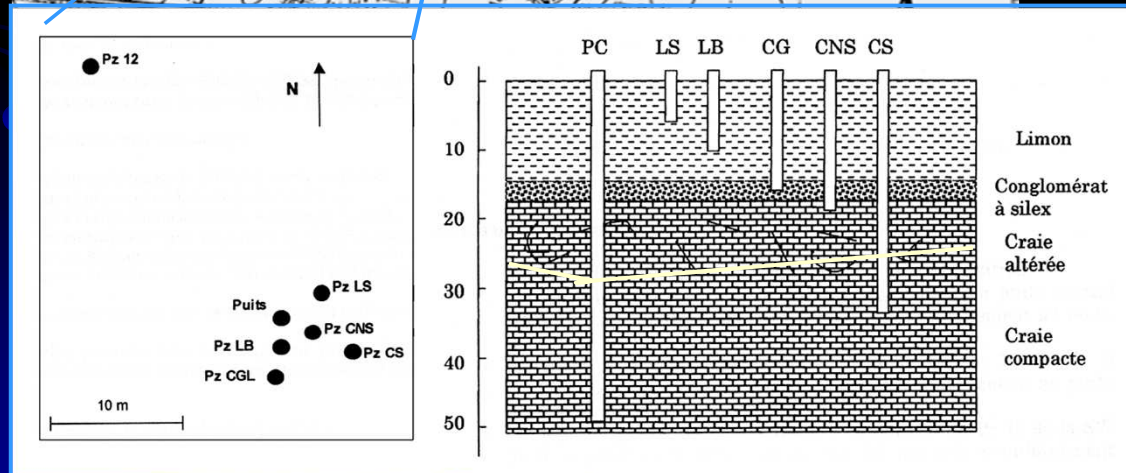
Cas d'étude
Essais de traçage dans des
craies fissurées, variablement
saturées en Hesbaye



Traçages dans les craies non saturées



- Hesbaye liégeoise
- 1 puits de reprise
- 5 piézomètres à différentes profondeurs de la zone saturée et non saturée



Site pilote en vue de préciser et quantifier les mécanismes et temps de transfert à travers les formations non saturées surmontant la nappe aquifère des craies

Traçages dans les craies non saturées

- Comportement hydrodispersif des craies
 - Essais de terrain à Bovenistier (Hesbaye liégeoise)
 - Forages carottés → ≠ profondeurs de la zone non saturée et de la zone saturée
 - Echantillons → essais et mesures en laboratoire
 - Tests d'infiltration dans la zone non saturée (Lefranc)
 - Essais de pompage dans la zone saturée
 - Essais de traçage dans la zone saturée
 - Essais de traçage dans la zone non saturée
- Ici: discussion des résultats de traçages au niveau des craies non saturées, sous différentes conditions de recharge



Traçages dans les craies non saturées

- Essais de traçage avec mise sous charge du Pz CNS

Traceur: KCl

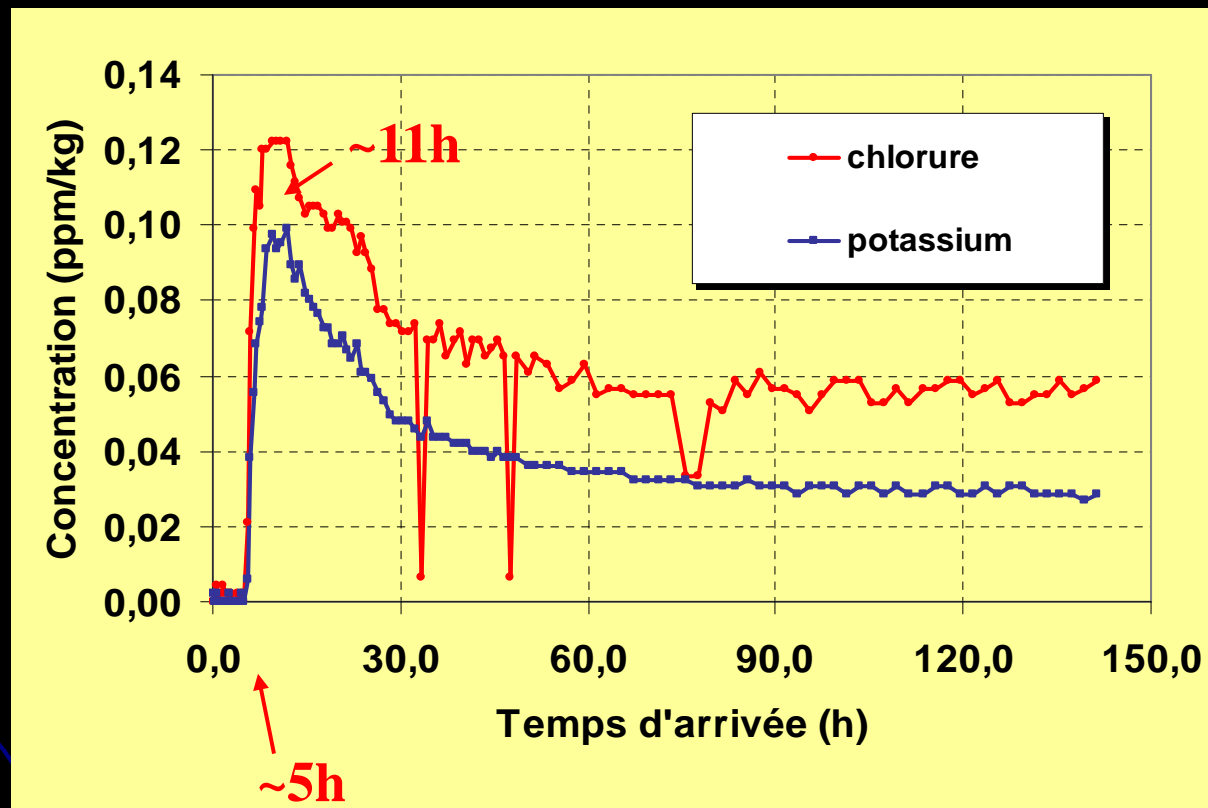
M_{inj} : 100 kg

V_{inj} : 300 litres

T_{inj} : ~1 h

Q_{ch} : ~300 l/h

Distance ~10m



Traçages dans les craies non saturées

- Essais de traçage sans mise sous charge du Pz CNS

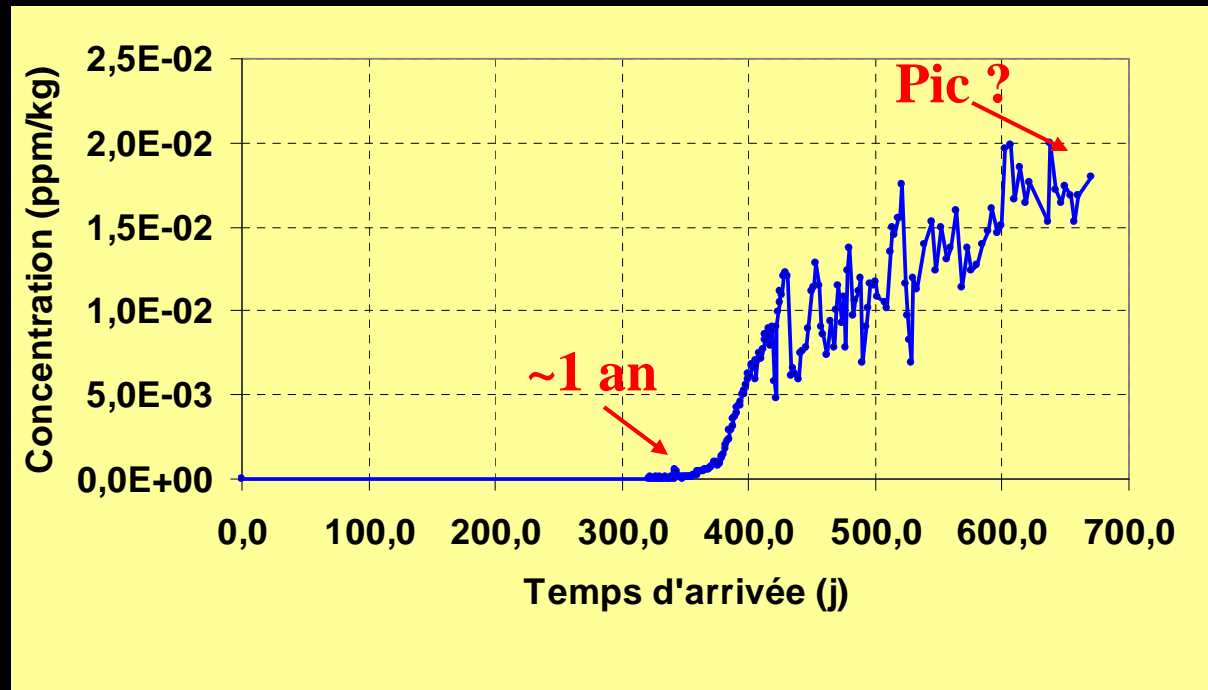
Traceur: I⁻

M_{inj} : 10 kg

V_{inj} : 30 litres

T_{inj} : ~ 6 min

Q_{ch} : ---



Traçages dans les craies non saturées

- Temps de transfert: **facteur 1000** entre les deux résultats (~quelques heures → ~ 1 an)
- Explication

→ **Caractère dual de la porosité/perméabilité des craies**

- **Matrice crayeuse**

- Porosité élevée ($n_M \sim 30 - 40\%$)
- Microporosité ($\approx 1\mu\text{m}$) → tensions capillaires élevées
- $K_{s,M} \ll \sim 10^{-9}$ à 10^{-8} m/s

- **Fissures**

- Porosité associée faible ($n_F \leq 1\%$)
- Ouvertures ~importantes → tensions capillaires faibles
- $K_{s,F} \gg 10^{-3}$ m/s, voire beaucoup plus

Traçages dans les craies non saturées

- **Conséquences → écoulements**

- Conditions saturées

$K_{s,M} \ll K_{s,F}$: drainage par les fissures de l'eau stockée dans la matrice

- Conditions non saturées

Désaturation rapide des fissures et cantonnement des écoulements dans la matrice

- **Conséquences → transport des solutés**

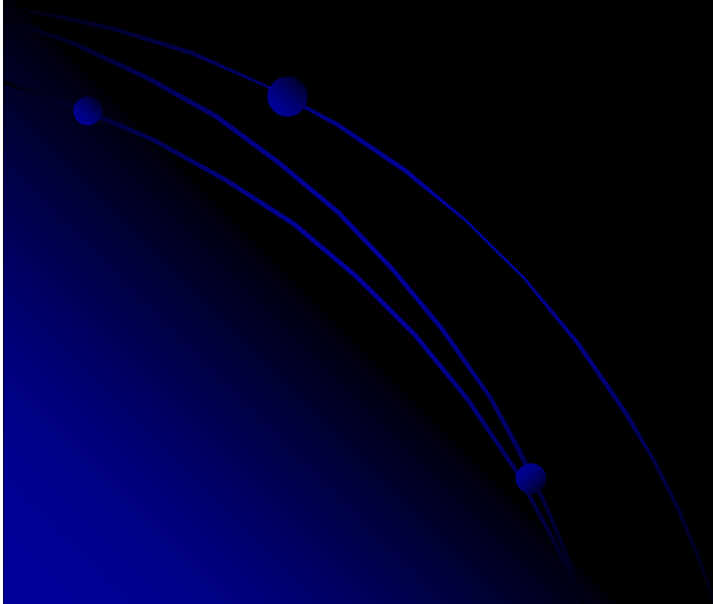
- Conditions saturées

Migration ~ rapide des solutés par les fissures ($K_{s,F} \gg$ et $n_F \ll$)
+ effet d'eau immobile au sein de la matrice

- Conditions non saturées

Migration ~ lente des solutés via la matrice ($K_{s,M} \ll$ et $n_M \gg$)

Mise en oeuvre des essais de traçage



Mise en œuvre des essais de traçage

- Lors de la mise en œuvre de tout essai de traçage
 - Objectif(s) des essais ?
 - Conditions expérimentales ?
- En répondant précisément à ces 2 questions
 - Etablissement de la méthodologie « idéale »
- Objectif(s) des essais
 - Essais qualitatifs
 - Essais quantitatifs
 - Identification des processus d'écoulement – transport
 - Identification de l'hétérogénéité du milieu
 - Analyse spatiale et/ou temporelle

Mise en œuvre des essais de traçage

- **Conditions expérimentales**

- Faisabilité des essais et qualité des résultats fortement tributaires des conditions expérimentales

- Contexte géologique et hydrogéologique

- Conditions géologiques

- Nature des formations géologiques, composition de l'eau

- *bruit de fond, interactions avec les traceurs*

- Degré d'hétérogénéité

- *facteurs physiques de retard*

- Conditions hydrogéologiques

- Piézométrie, directions d'écoulement

- *directions de migration des traceurs*

- Transmissivités, vitesses d'écoulement

- *vitesse des traceurs*

- Profondeur de l'eau, captivité de la nappe

- *méthodologie d'injection*

Mise en œuvre des essais de traçage

- Conditions expérimentales (suite)
 - Dispositif expérimental existant
 - Localisation du site, accessibilité, infrastructures
→ *Complexité des essais*
 - Nombre et disposition spatiale des ouvrages (puits, pz, ...)
→ *Technique de traçage envisageable*
 - Équipement et caractéristiques hydrauliques de ouvrages
→ *Méthodologie d'injection (débit, volumes, ...)*
 - Potentialités de développement du site expérimental
→ *Budget disponible, délais de réalisation, espace disponible, autorisations*

Mise en œuvre des essais de traçage

- Conditions expérimentales (suite)
 - Matériel expérimental disponible
 - Matériel de pompage
 - *Reprise et échantillonnage des traceurs*
 - Dispositif de stockage temporaire de l'eau
 - *Dilution des traceurs, chasse, ...*
 - Matériel d'analyse et de dosage des traceurs
 - *Choix des traceurs, limite de détection, ...*
 - Moyens informatiques
 - *mesures, interprétations*

Mise en œuvre des essais de traçage

- Méthodologie expérimentale

Quand les **objectifs sont fixés** et les **conditions expérimentales établies**
→ **choix de la méthodologie**

- **Méthode de traçage**

- **Schéma d'injection**

- Nature du/traceur(s)
 - Objectifs et localisation des essais
 - Nombre d'injections → nombre de traceurs
 - Interactions entre traceurs
- Quantité de traceur (facteur + versus facteurs -)
- Profil d'injection
 - Volume d'eau pour l'injection
 - Durée et débit d'injection
- Mode d'injection

Mise en œuvre des essais de traçage

- Méthodologie d'interprétation
 - Objectifs des essais
 - Méthode de traçage
 - Schéma d'injection
- Outils d'interprétation
 - Abaques
 - Solutions semi-analytiques
 - Modèles numériques