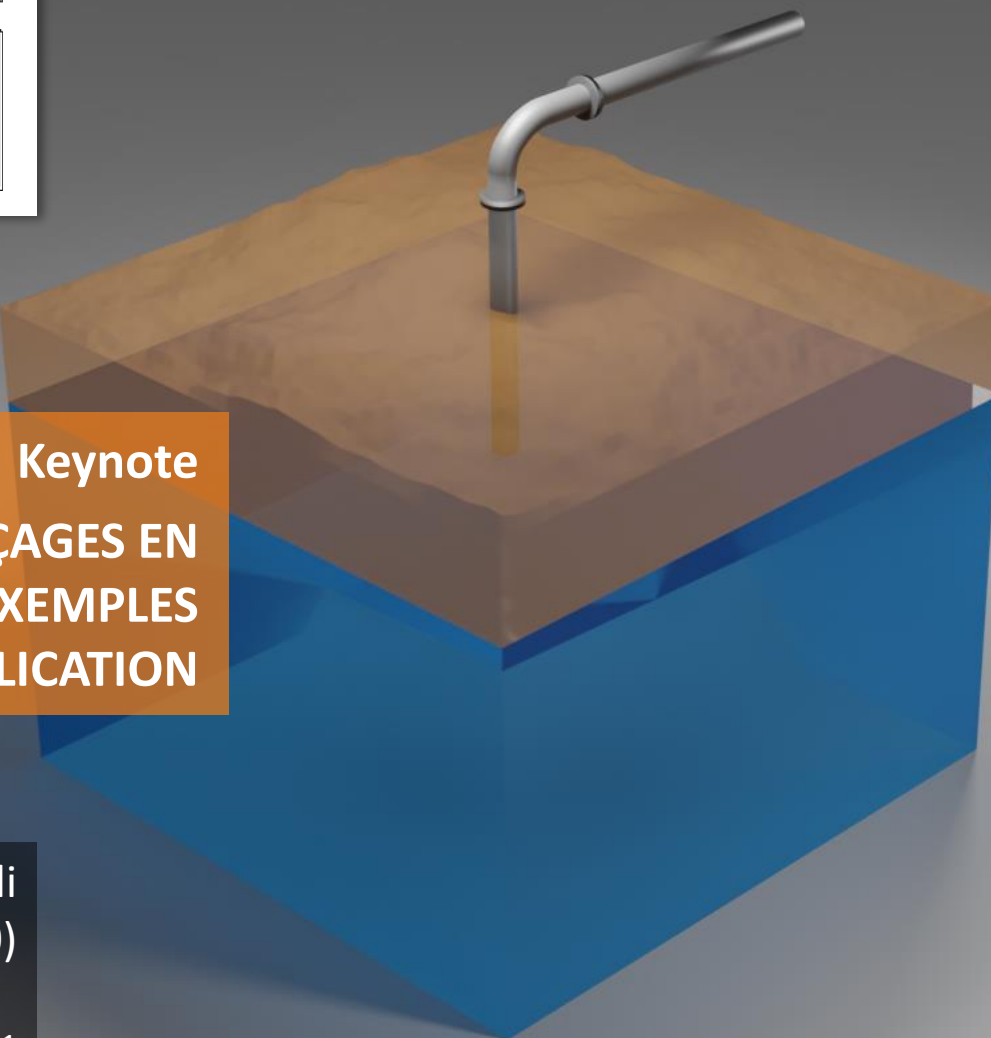
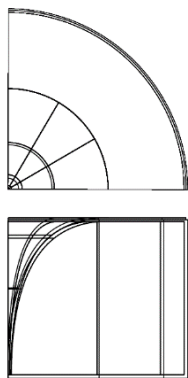
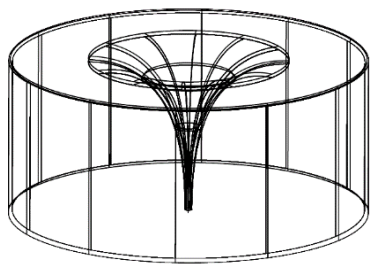




Keynote

TESTS DE TRAÇAGES EN HYDROGÉOLOGIE ET EXEMPLES D'APPLICATION

Présentation orale, Mercredi
15/05/2024 (14h30)

Thomas KLINKA¹
t.klinka@brgm.fr



TRACER 9
TRACERS AND TRACING METHODS
..... Spain 2024

Tracer 9

Du 14 au 16 mai 2024

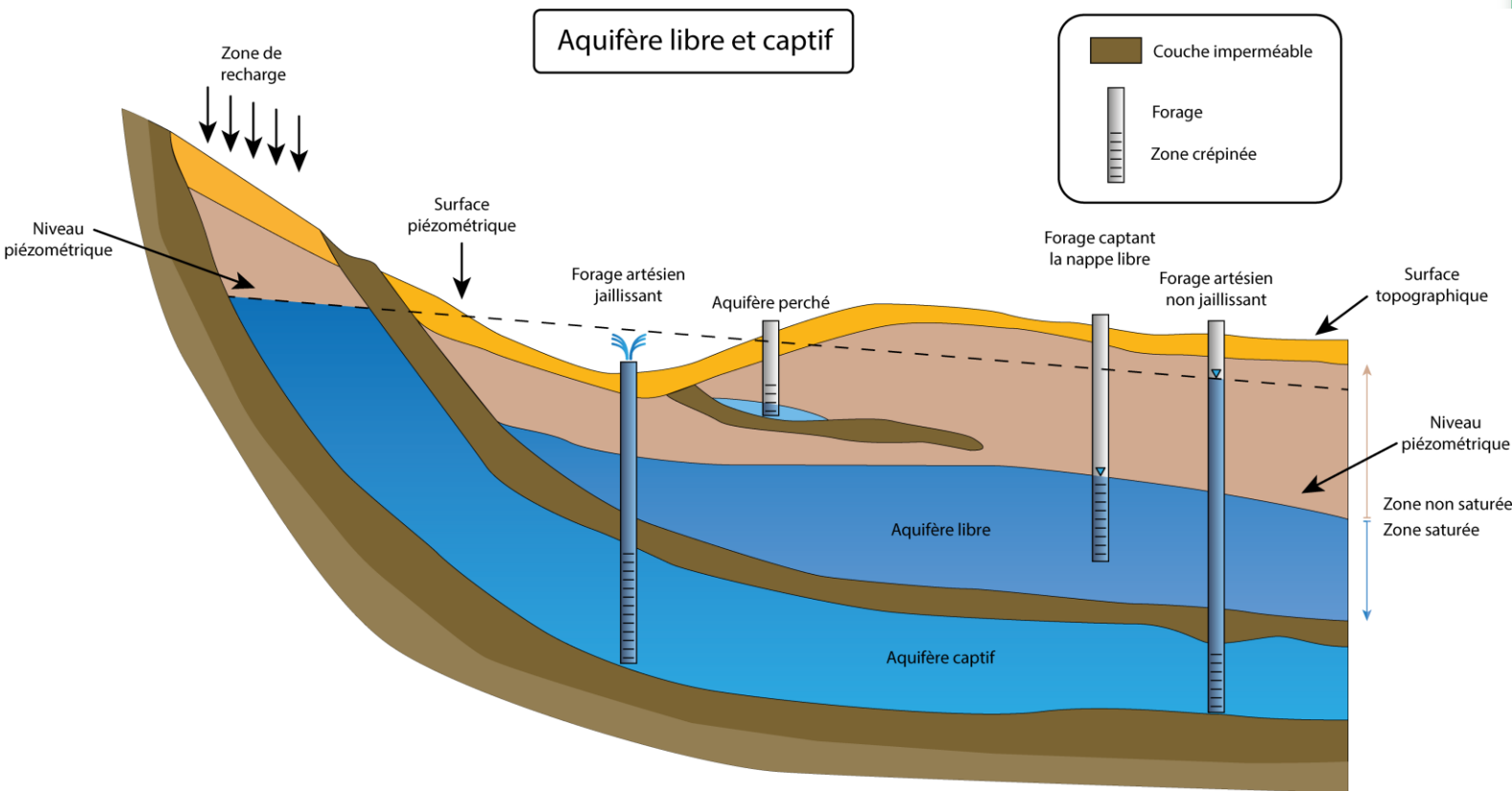
Benicassim (Espagne)

TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

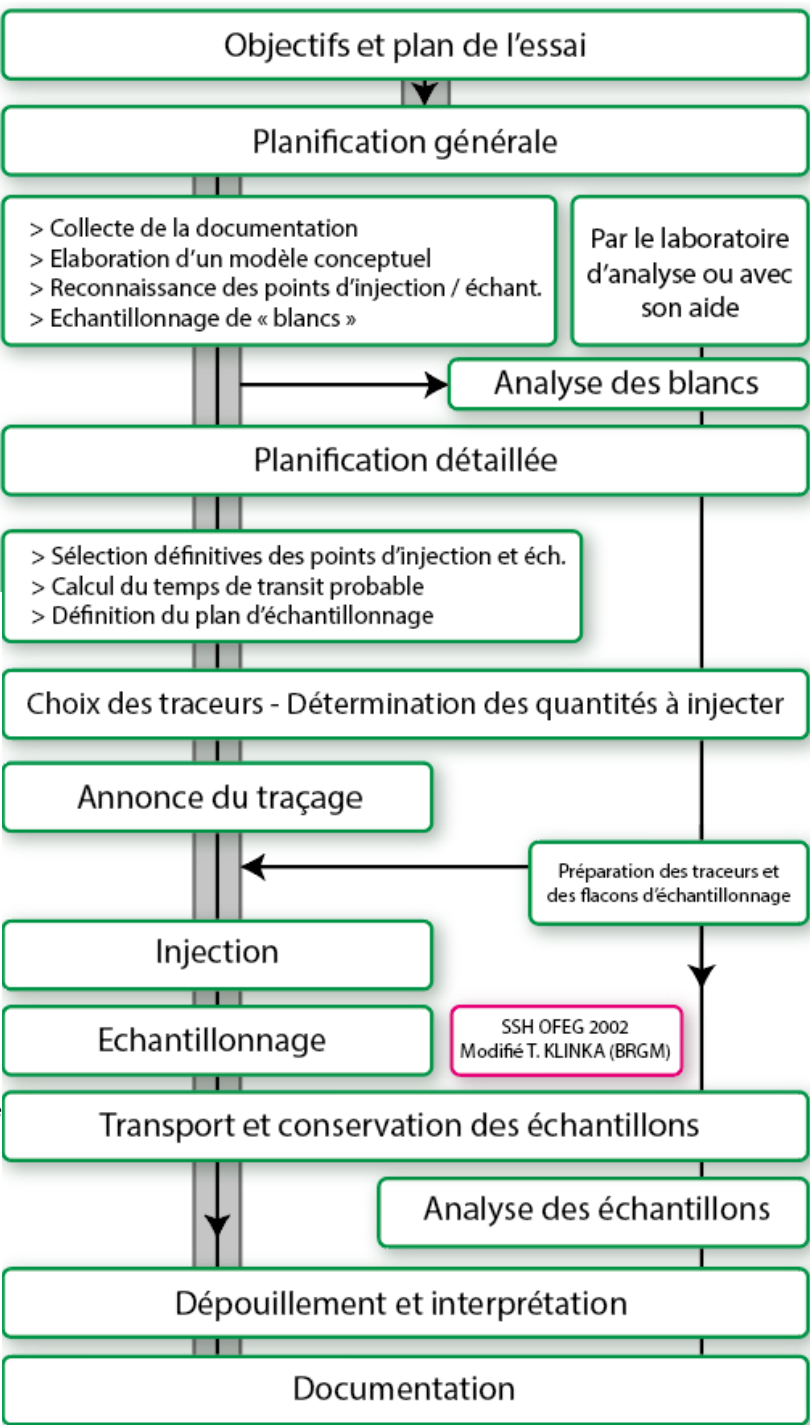
Généralités

❑ Déroulement d'un essai de traçage

❑ De nos jours, des réponses précises sont attendues dans le domaine du transport de substances ce qui génère une nette croissance des exigences pour la **planification** des essais de traçage, leur **exécution** et leur **interprétation**



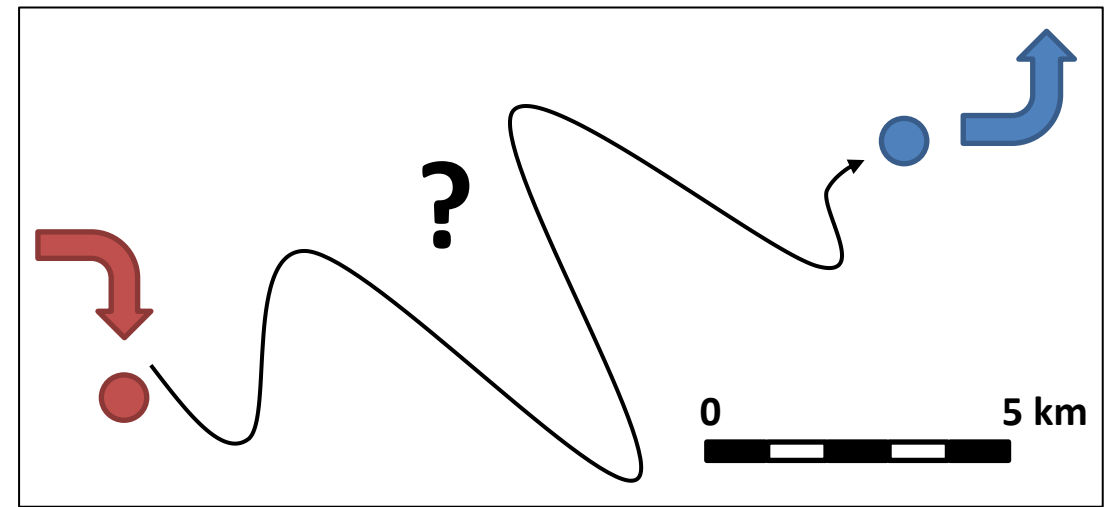
T. Klinka (BRGM) d'après National Ground Water Association 2007



TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

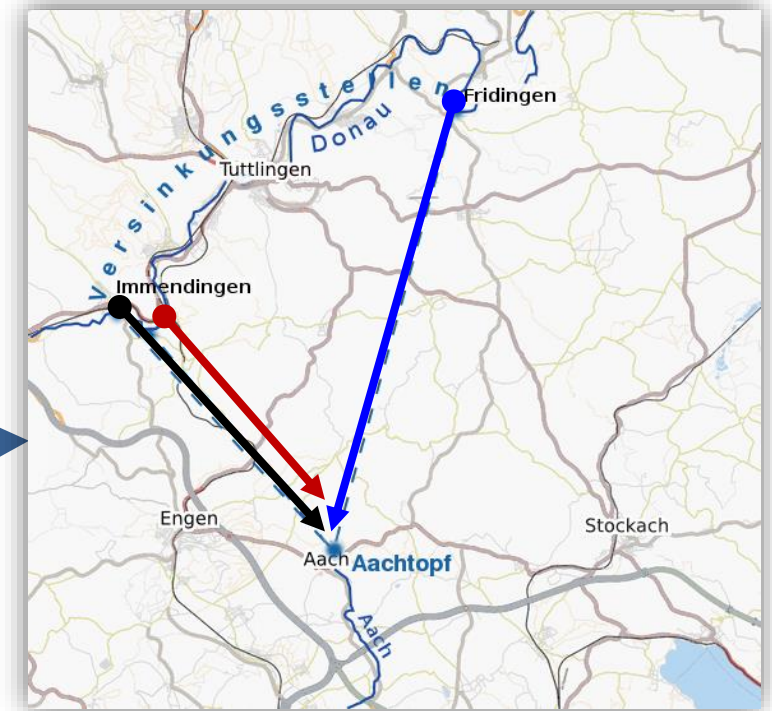
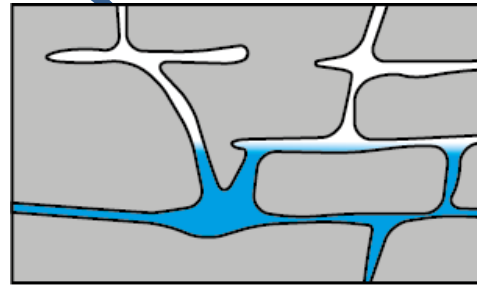
Aux origines du traçage ...

- ❑ Les techniques de traçage trouvent leur origine en hydrogéologie karstique
- ❑ Le premier essai de traçage scientifique connu s'est déroulé en 1887 à la perte du Danube près d'**Immendingen**.



Le fleuve à sec à Immendingen

Milieu karstifié



Lieux des pertes [●] et de la réapparition [►] : l'Aachtopf

TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Pour quoi faire des traçages ?

❑ Le marquage de l'eau à l'aide de traceurs artificiels est une des techniques les plus importantes en hydrologie et hydrogéologie appliquées

❑ Traçage qualitatif

- Existe t'il un lien hydraulique entre deux points ?

❑ Traçage quantitatif

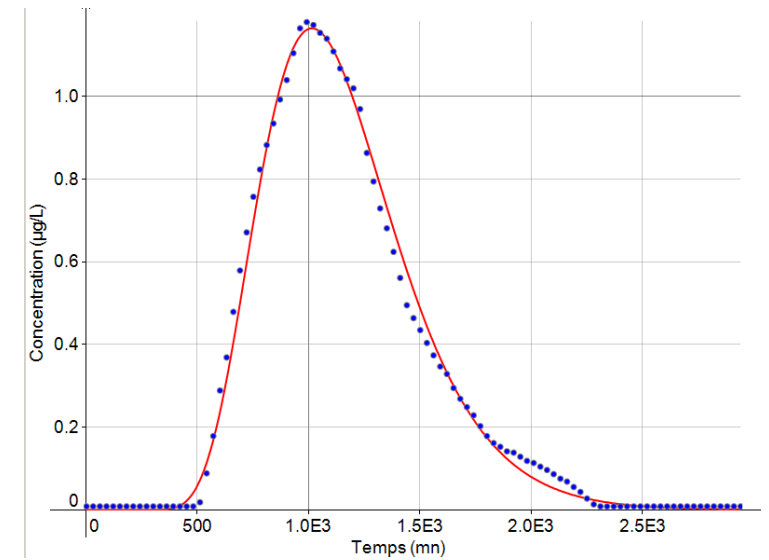
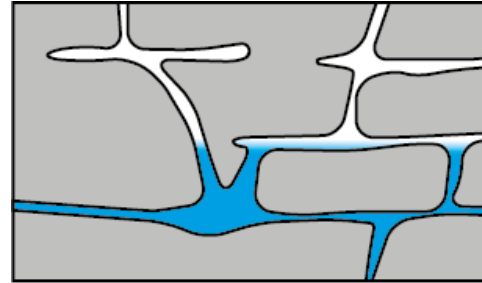
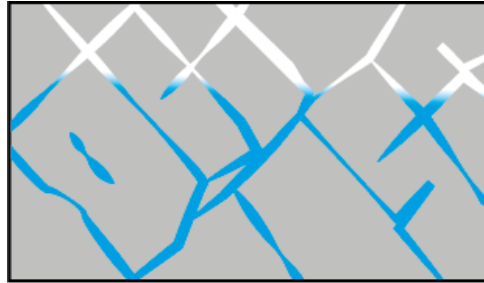
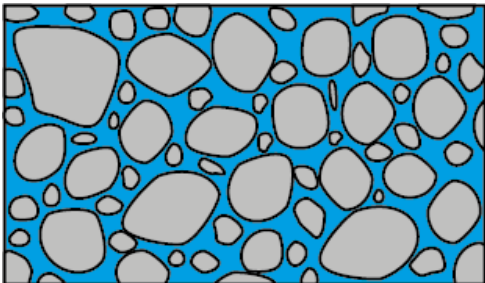
- Caractériser les propriétés hydrodispersives de l'aquifère ?

❑ Simulation

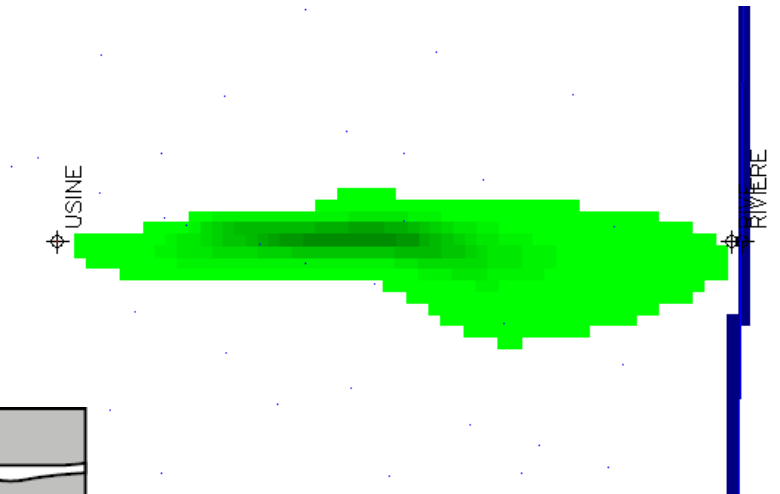
- Quel est le devenir d'une pollution dans une nappe souterraine ?

❑ Selon les milieux considérés : poreux | fissurés | karstiques

Représentation schématiques des 3 typologies de milieux souterrains



Exemple de courbe de restitution (points bleu) et son interprétation (courbe rouge)

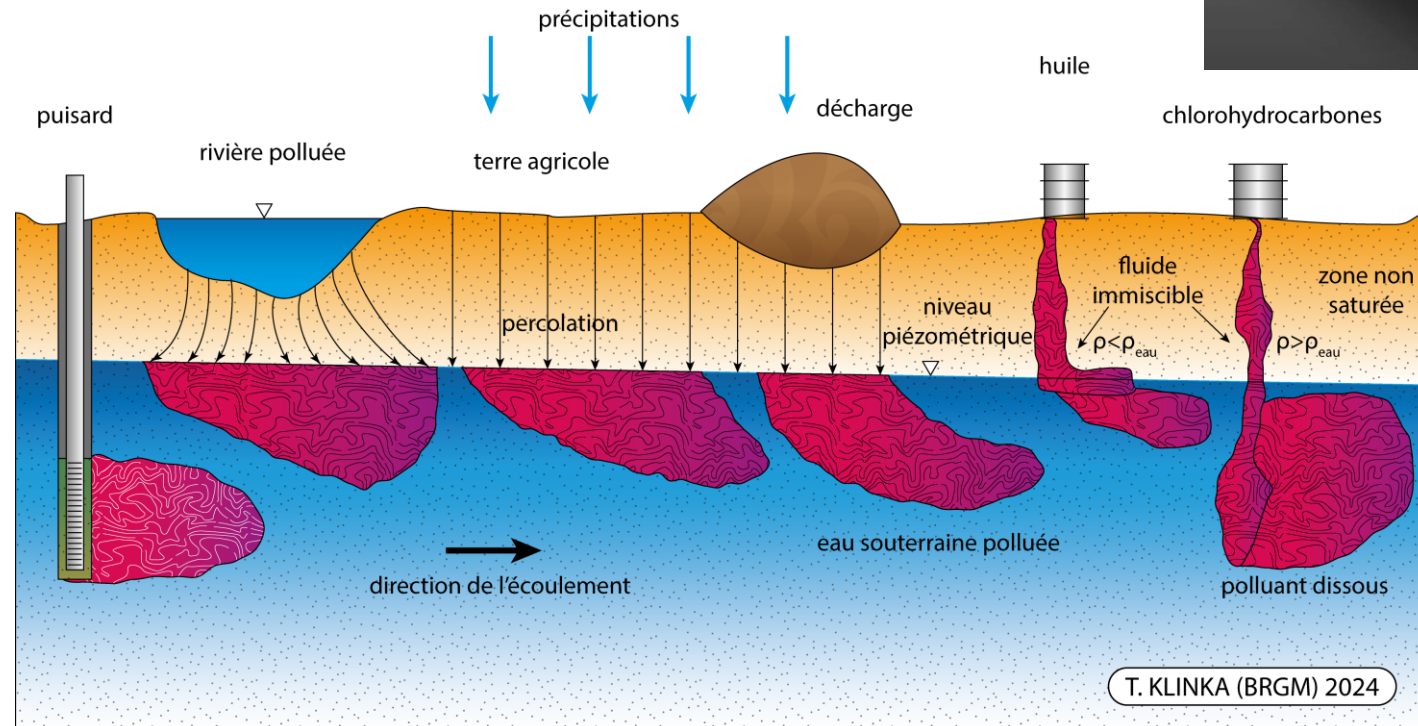
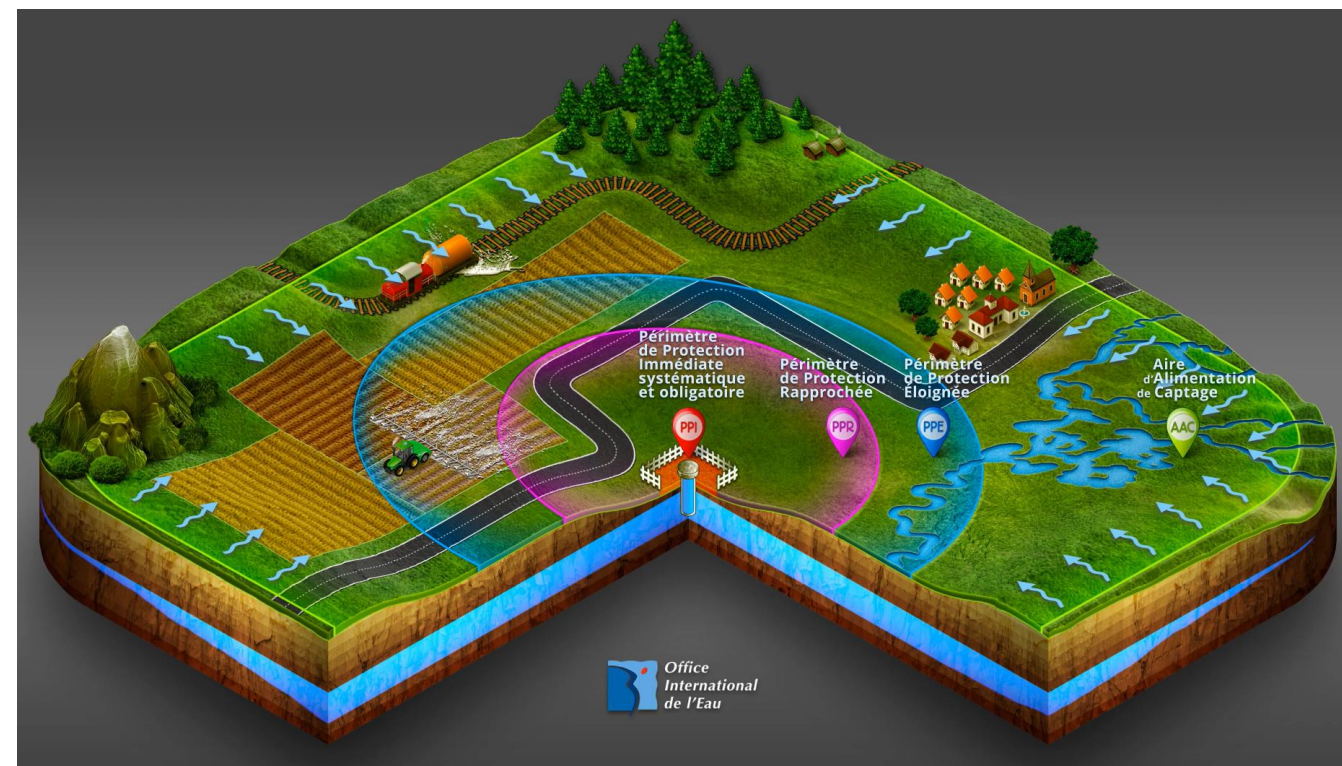


Simulation d'une pollution dans une nappe souterraine au droit d'une usine, après un temps « t »

TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Domaines d'applications

- ❑ Captages d'eau souterraine / sources
 - Zones de protection des eaux souterraines
- ❑ Aires d'alimentation des écoulements
- ❑ Évaluation de dangers / simulations d'incidents
- ❑ Sites contaminés / Aires suspectes



- ❑ Décharges
- ❑ Interaction eaux de surface - eaux souterraines
- ❑ Détection d'eaux parasites
- ❑ Forages / piézomètres
- ❑ Détermination des paramètres de l'aquifère / modélisation des écoulements souterrains

TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Préparation

Évaluation des temps de transit probable

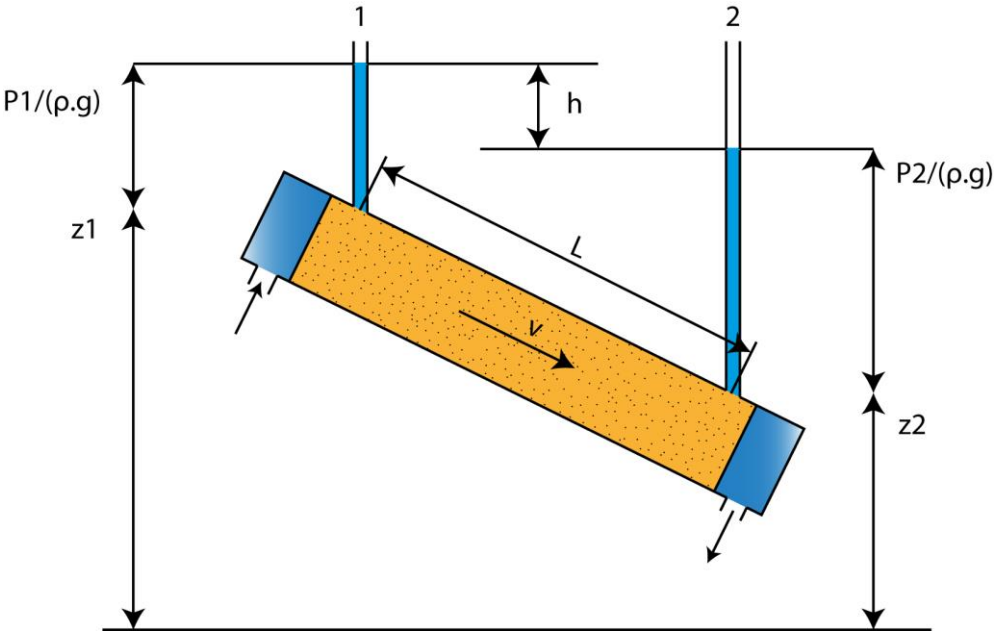
$$Q = SK \frac{\Delta h}{\Delta x}$$

$$\frac{Q}{S} = K \frac{\Delta h}{\Delta x} \leftrightarrow V_D = Ki$$

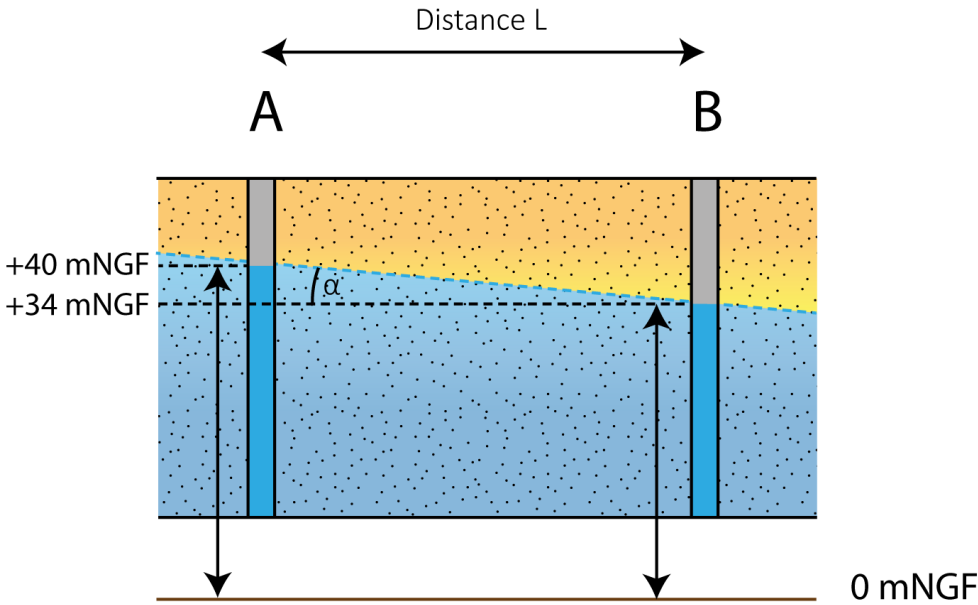
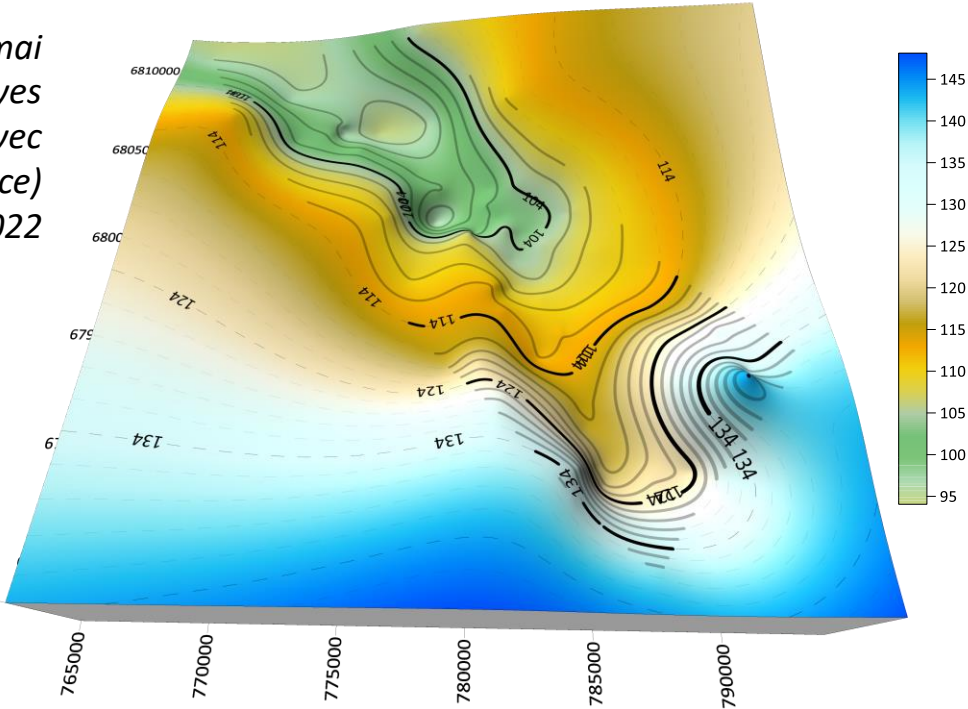
$$u = \frac{Ki}{n_e}$$

avec :

Q [m³/s] : débit d'écoulement
 K [m/s] : perméabilité
 S [m²] : section d'écoulement considérée
 $\Delta h/\Delta x$ [-] : gradient hydraulique (i)
 n_e [-] : porosité cinématique



Carte piézométrique hautes eaux - mai 2022 des alluvions de la Seine à Troyes (interpolation par krigeage avec variogramme puissance)
T. KLINKA 2022



TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Préparation

☐ Choix des traceurs : quelques exemples parmi les traceurs fluorescents

* μ -org ox. = micro-organismes oxydants

Nom du traceur	Spectre d'excitation	Spectre d'émission	Solubilité	Seuil de détection	Couleur	Visibilité à l'œil	Dégradation	Adsorption	Interférences
	(nm)		(g/L)	(µg/L)					
Uranine	491	515	600 g/L à 20°C	0.001	Vert jaune	50 à 100	UV / pH < 7 / µ-org. ox.	Faible	Eosine Y
Acide Amino G	345	452	Très faible	0.1	Bleu pastel	Invisible	UV / oxydants	Moyenne à forte	Tinopal CBS-C, Naphtionate
! Sulforhodamine B	565	585	50	0.01	Rouge fuschia	> 500	oxydants	Moyenne	Sulforhodamine G
Sulforhodamine G	532	552	5	0.01	Rouge orangé	> 500	oxydants	Moyenne	Sulforhodamine B
Eosine Y	513	537	320	0.008	Rouge	250 à 500	UV / oxydants / pH < 5	Faible	Uranine
Naphtionate	320	420	240	0.1	Bleu pastel	Invisible	UV / pH < 4 ou > 10 / µ-org. ox.	Moyenne à forte	Tinopal CBS-CL, Acide amino-G
Tinopal Cbs-Cl	350	435	25	0.1	Bleu pastel	Invisible	UV / oxydants / pH < 7	Moyenne à forte	Naphtionate, Acide amino G
! Rodamine Wt	558	583	-	0.01	Violet	250 à 500	oxydants	Forte	Sulforhodamine B



Uranine Amino acid G Sulforhodamine B Sulforhodamine G Rodamine Wt Naphtionate Eosine Y

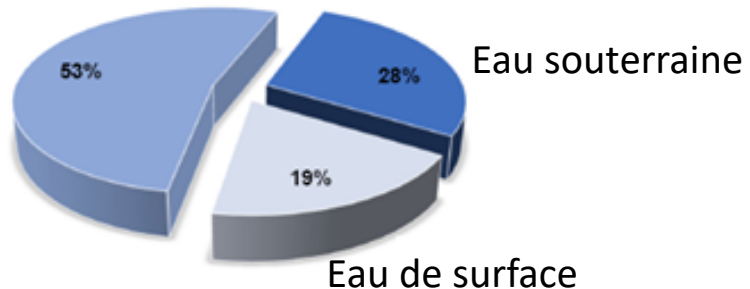
TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Exécution

- ❑ Avis d'information (selon la législation en vigueur)
- ❑ Déclaration des traçages :
 - Allemagne : éditions de recommandations
 - France, Belgique : annonce spontanée (pas de demande d'autorisation)
 - Luxembourg : régime d'autorisation
 - Royaume-Uni : annonce et demande d'autorisation
 - Canada : demande d'autorisation
- ❑ Injection
 - Comme dispositif standard, on recommande l'injection ponctuelle et instantanée du traceur dans la zone saturée.
 - Dans les régions karstiques, on ne peut souvent pas atteindre directement la zone saturée.

Modalités d'injection :

Zone saturée



Statistiques de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) 2018, sur 270 injections (soit 117 tests de traçages)



Injection au droit d'une doline



Essai de traçage pour l'évaluation de vulnérabilité d'un aquifère karstique après le décapage de la couche de couverture, Suisse



Mesure de la restitution du traceur au droit d'une source



Injection d'un traceur au droit d'un piézomètre

TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Käss (1992), Wernli (1994)
et Worthington (2001)

Exécution

- Choix des quantités à injecter
 - La définition correcte de la quantité de traceur à injecter est extrêmement importante pour la réussite d'un essai de traçage.
 - Évaluation empirique :

Paramètres :

M = Masse (quantité) injectée [g]

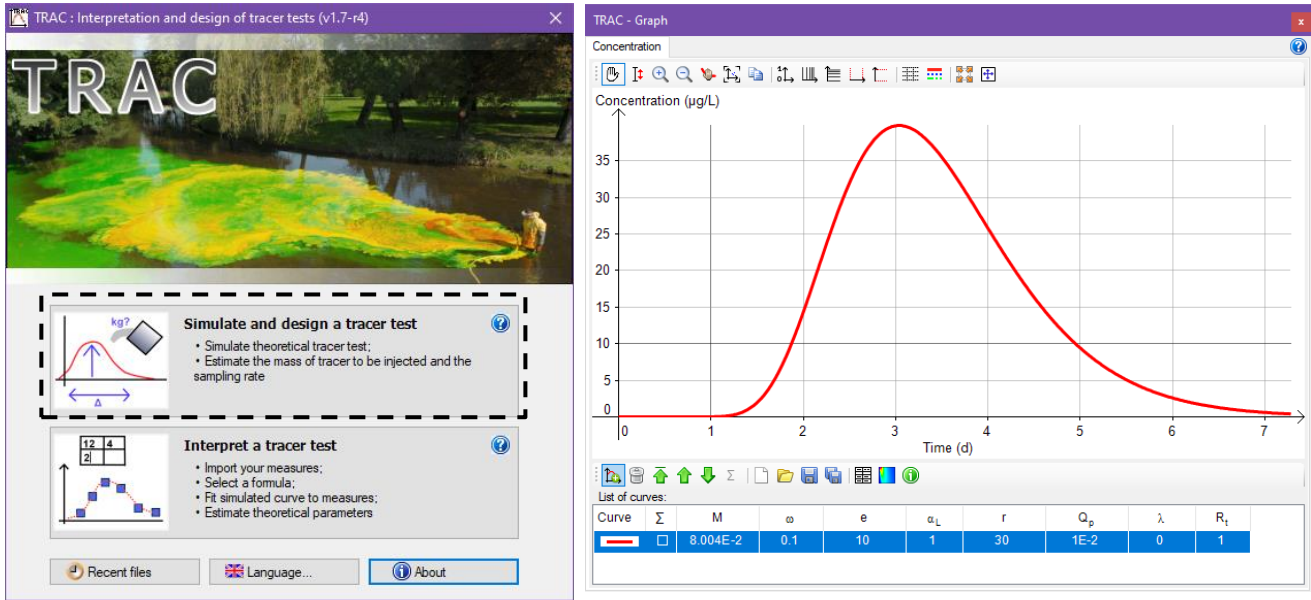
α = Facteur de correction du traceur [g/m]

L = Distance de traçage [m]

A = Facteur d'ajustement aux conditions de l'aquifère [-]

$$M = \alpha \cdot L \cdot A$$

- Logiciel **TRAC** (BRGM) : simulation - modélisation analytique



Sels (α)	
Chlorure de sodium NaCl	1E+04
Bromure de potassium KBr	3E+03 - 5E+03
Chlorure de lithium LiCl	1E+03

Particules (α)	
Phages (nombre)	1E+12
Microsphères (nombre)	1E+12

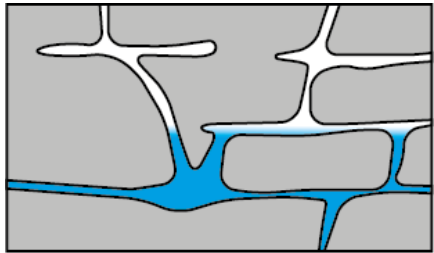
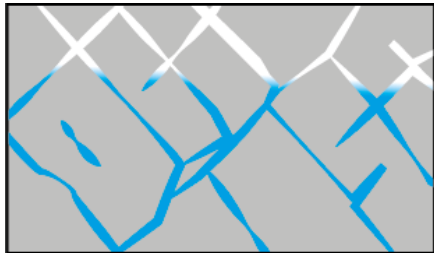
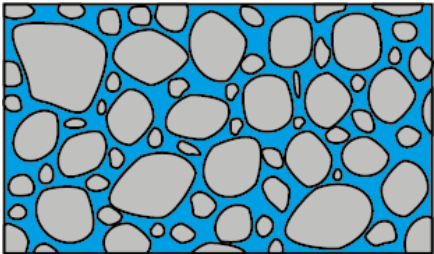
Traceurs fluorescents (α)	
Uranine	1
Eosine Y	2 - 3
Amidorhodamine G	2
Sulforhodamine B	4
Pyranine	5
Naphtionate	15
Tinopal	25
Duasine	4

$K > 1 \times 10^{-3} \rightarrow A = 1/4 * e$
 $10^{-4} < K < 10^{-3} \rightarrow A = 1/2 * e$
 $K < 1 \times 10^{-4} \rightarrow A = e$

K : perméabilité (m/s)
e : épaisseur de l'aquifère (m)

$A = 0.2 \text{ to } 4$
 $A = 10 * (Q/100)^{0.93}$

Si liaison karstique d'une
perte de cours d'eau vers la
source (Q : débit de la
source en m³/s)



TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Exécution - Échantillonnage

- ❑ Le plan d'échantillonnage doit être ajusté du point de vue temporel à la dynamique hydrogéologique de l'aquifère
- ❑ 1^{ère} méthode : Prélèvements manuels
 - Prélèvements et spectrofluorimétrie
 - Méthode la plus précise et la plus reproductible
 - Bonne résolution spectrale
- ❑ 2^{ème} méthode : Dispositifs d'échantillonnage automatique
 - Fluorimétrie *in-situ*/forage : ensemble sonde fluorimétrique / conductivité / turbidité, data logger et GSM
- ❑ 3^{ème} méthode : charbon actif (fluocapteurs)
 - Sachet de charbons actifs immergés dans l'eau pendant une période
 - Charbon actif : fabriqué par oxydation de matières carbonatées (noix de coco, bois, tourbe, charbon)
- ❑ Méthode d'analyse (traceurs fluorescents) :
 - Laboratoire : spectrofluorimétrie, chromatographie (HPLC)
 - Terrain : fluorimètre



Préleveur automatique



Fluorimètre de forage (gauche) et de source (droite)



Sachet de charbon actif immergé

TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

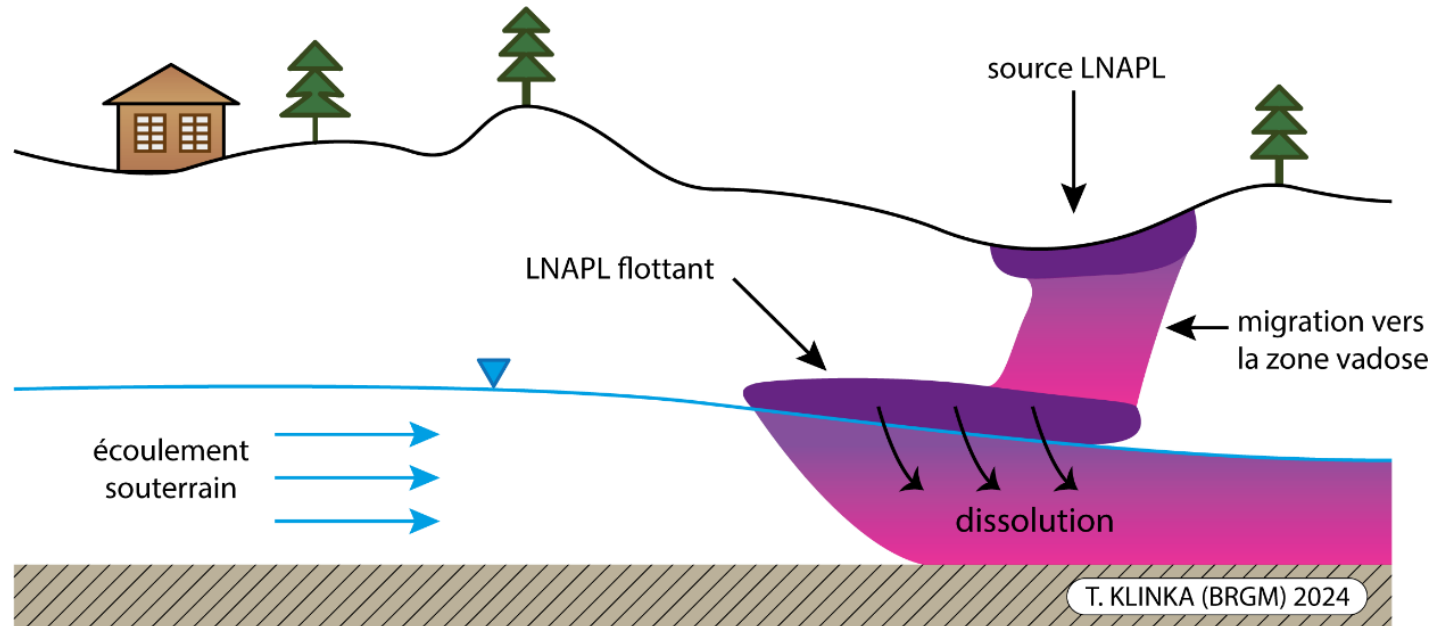
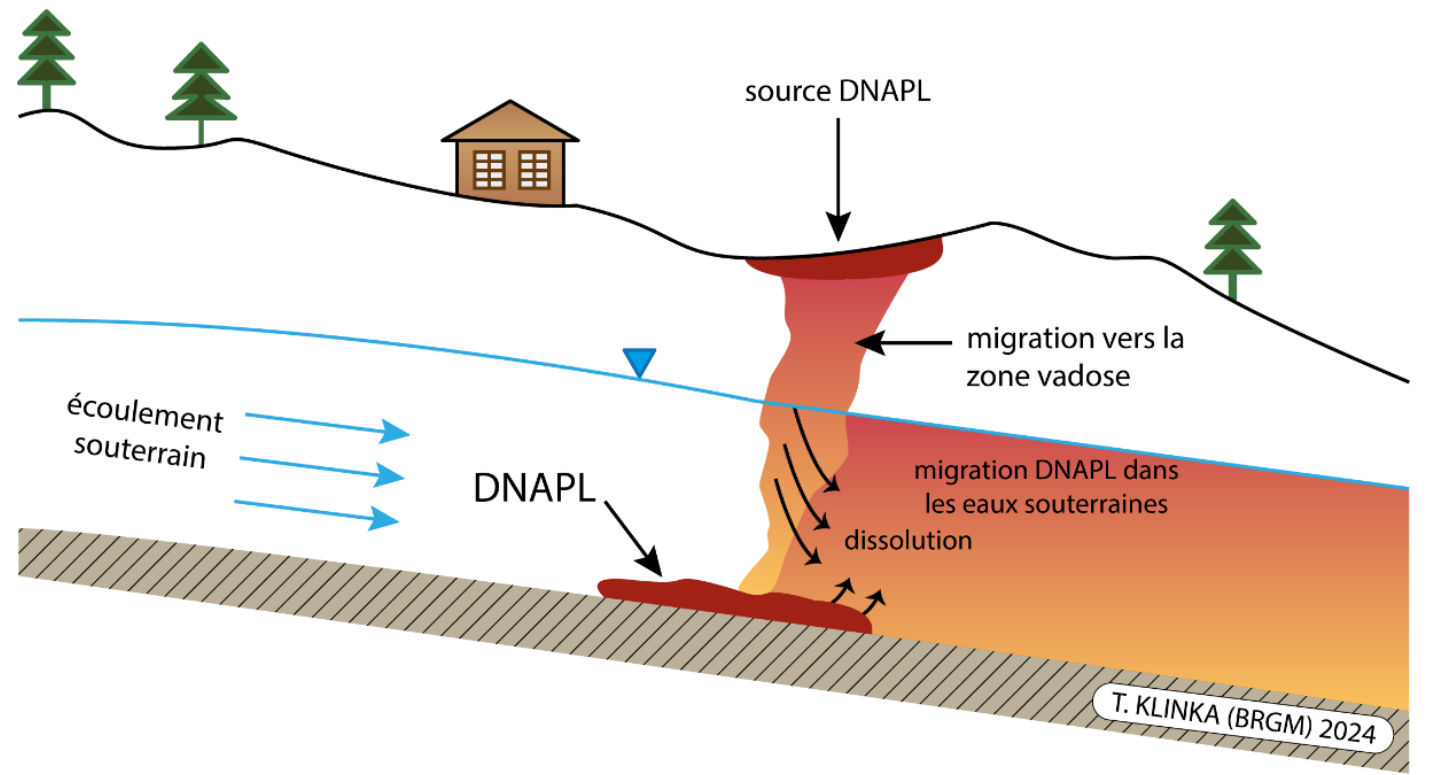
Transport de masse en solution

□ Le transport en solution ... en opposition aux écoulements de fluides immiscibles tels que :

□ Les écoulements d'huile et d'eau

... dont les lois de migration sont entièrement différentes

Systèmes diphasiques
ou triphasique (eau, huile, air)

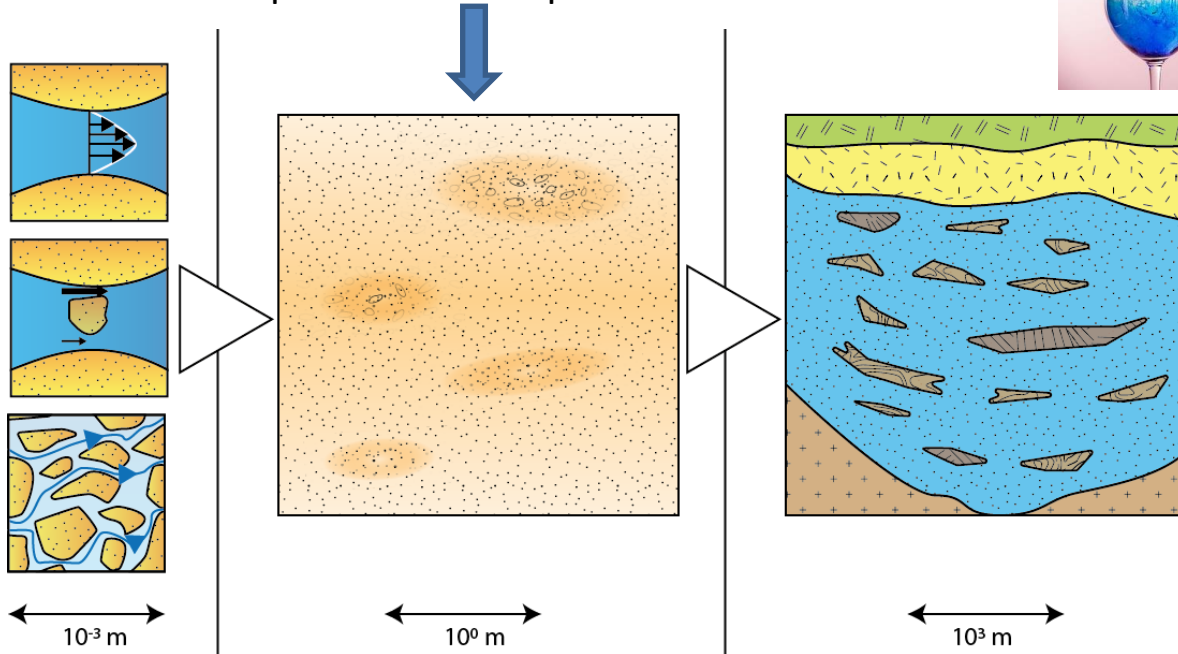


TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

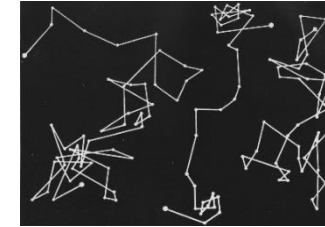
Processus gouvernant le transport dans les eaux souterraines

□ Un traceur dissous dans l'eau souterraine est soumis aux processus suivants :

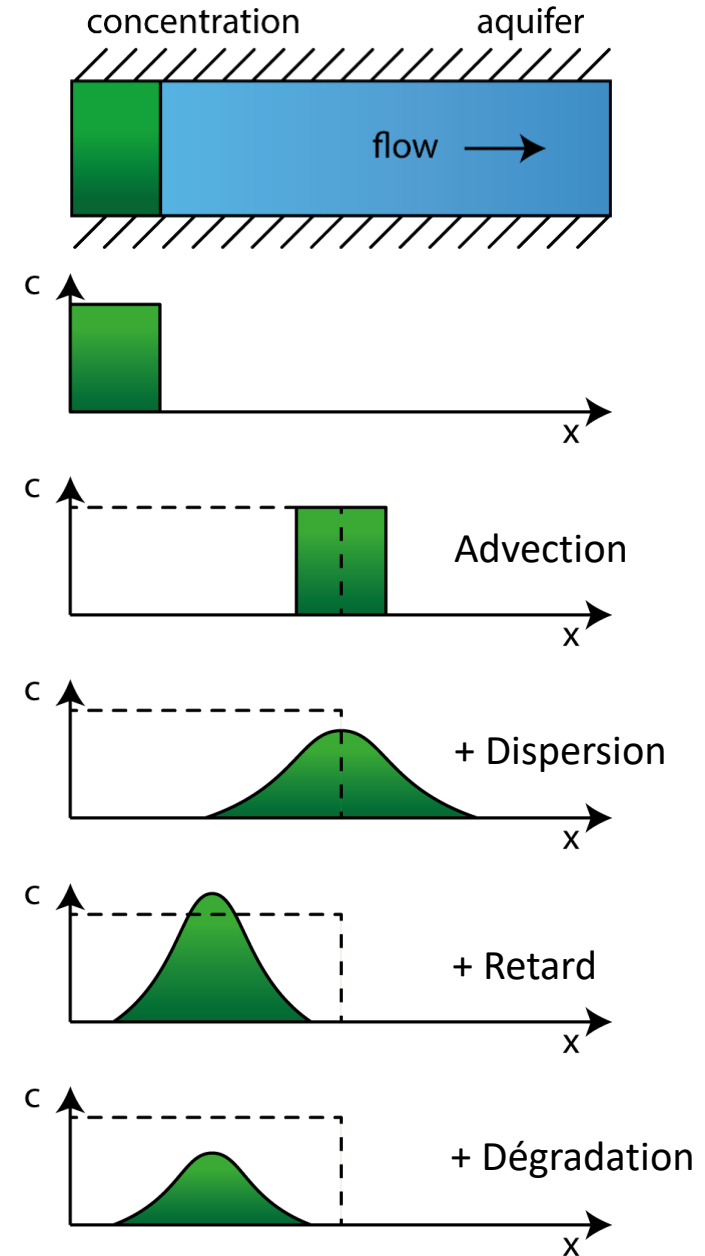
- Transport convectif provoqué par l'écoulement de l'eau souterraine ;
- La dispersion
 - La diffusion moléculaire
 - La dispersion mécanique



Positions successives liées au mouvement Brownien



Dans l'aquifère, l'eau emprunte des **chemins d'écoulement** différents (orientation, tortuosité) au travers de pores de dimensions variables (longueur, largeur) dans lesquels la **vitesse réelle varie** aussi (section variable, rugosité)



- Éventuellement processus d'échange par diffusion entre l'eau mobile et l'eau immobile
- Éventuellement adsorption et désorption
- Éventuellement dégradation du traceur / adsorption et désorption

TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Mise en équation du transport dans les milieux souterrains

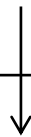
□ Équation fondamentale du transport

- Les bases théoriques des différents phénomènes régissant la migration de produits sont bien connues
- « Advection-Dispersion Equation » (ADE en anglais)

□ Équation plus ou moins complexe selon les mécanismes considérés :

- ADE 1D en milieu homogène et isotrope :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$



$$(m^2/s) \quad D = \alpha u + D_m \approx \alpha u$$

↓ ↓

Dispersivité (m) Diffusion moléculaire (m²/s)

Avec facteur
de retard :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{u}{R} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Facteur
de retard :

$$R = 1 + \frac{\rho K_d}{\theta}$$

Avec facteur de retard
et dégradation :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \lambda C = -\frac{u}{R} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Désintégration de type
exponentielle décroissante :

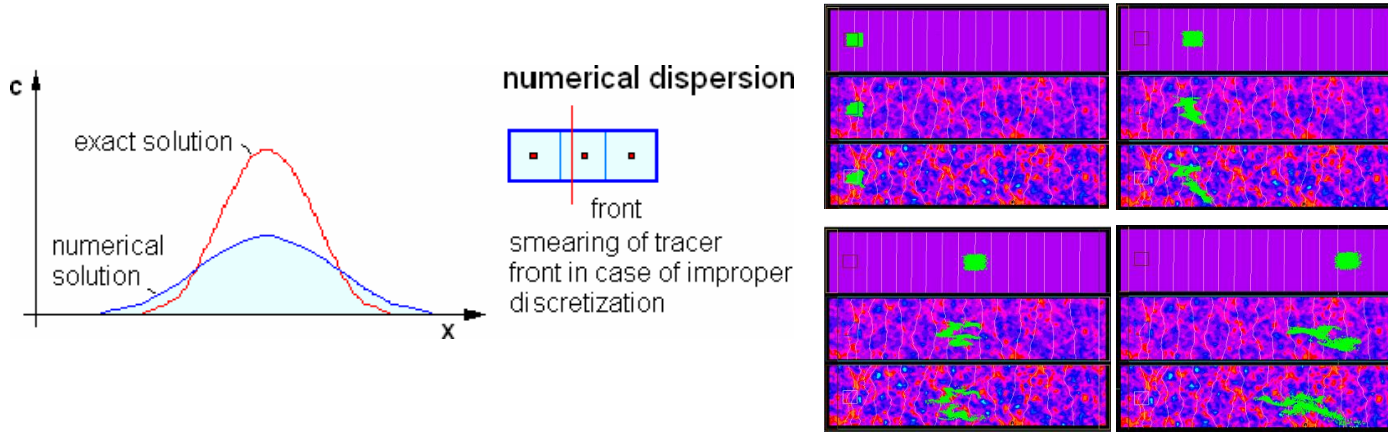
$$M(t) = M_0 \exp(-\lambda t) ; \quad t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Solutions numériques complètes de l'ADE

« Grid methods » :

- Différences finies (méthode eulérienne), volumes finies, méthode des éléments finis, différences finies mimétiques

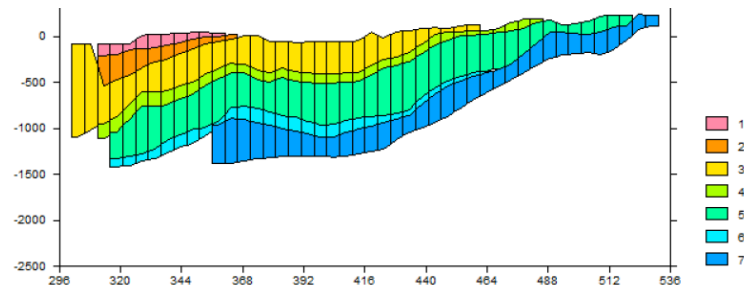


« Particle-tracking methods » :

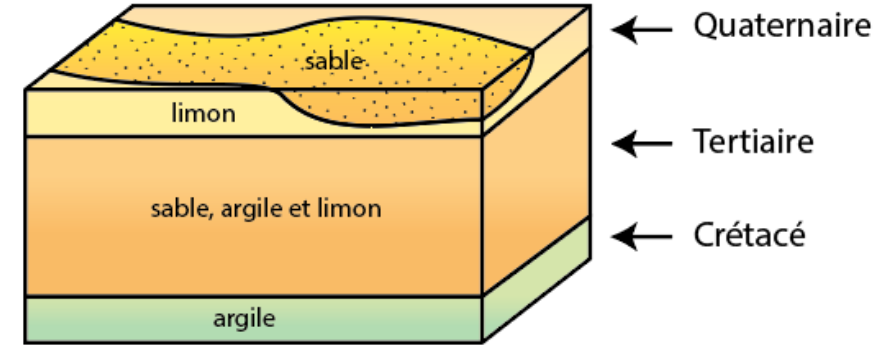
- Méthode des caractéristiques (MOC), random-walk (marche aléatoire, méthode lagrangienne)

Utilisation s'il y a une discrétisation des propriétés hétérogènes du milieu

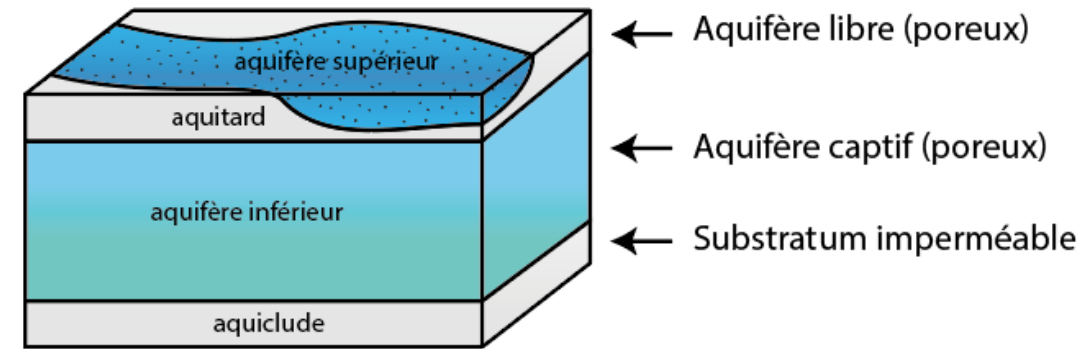
- MODFLOW (USGS)
- FEFLOW (DHY)
- MARTHE (BRGM)



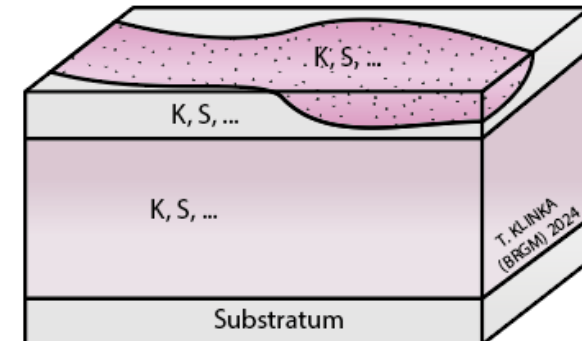
Géologie - Lithologie



Unités hydrogéologiques



Paramètres hydrodynamiques : K , S , ...



TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Interprétation et simulation

❑ **TRAC**, un logiciel d'interprétation de traçage, dimensionnement d'un traçage et simulation de propagation de pollution dans les aquifères

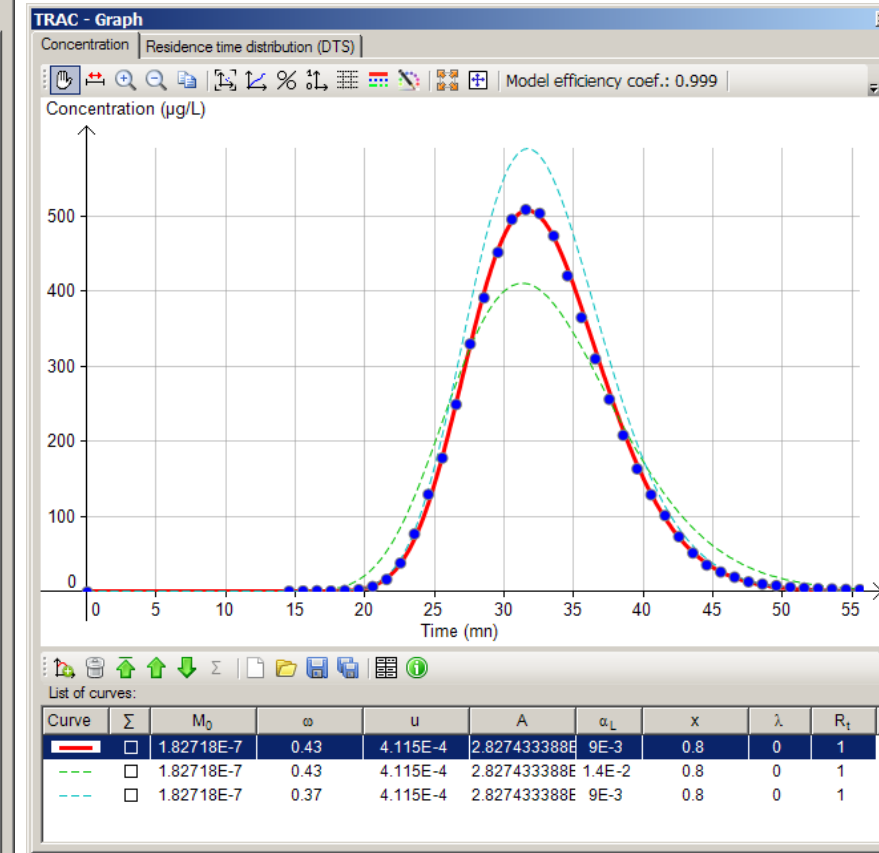
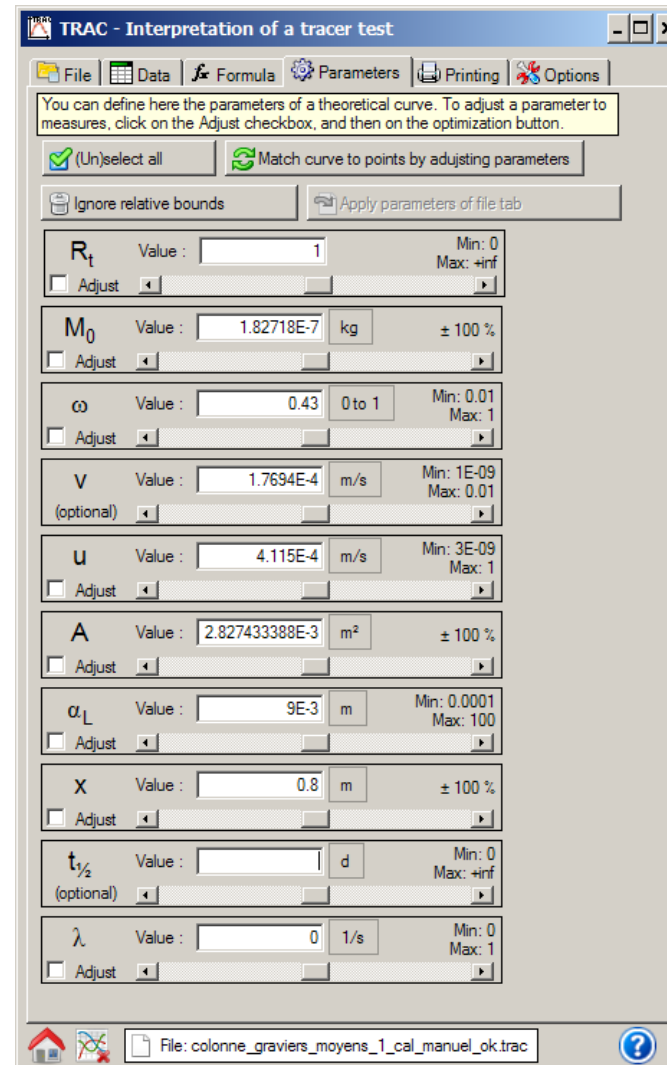
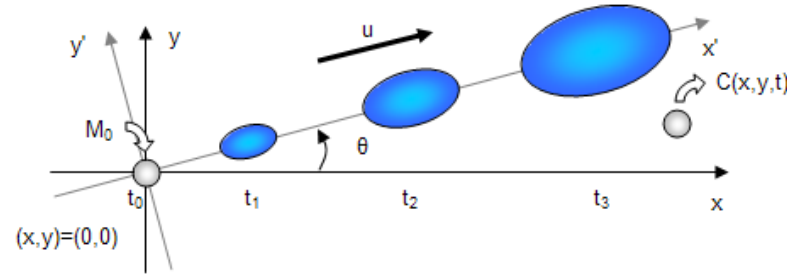
❑ Objectif du logiciel TRAC :

- Doter les hydrogéologues praticiens :
 - De méthodes de prévisions du comportement des polluants dans les nappes
 - De méthodes d'interprétation des traçages

❑ Logiciel évolutif :

- L'utilisateur peut ajouter de **nouvelles solutions analytiques**
- Possibilité d'ajouter de **nouvelles unités** (système anglo-saxon, thématicien)
- Logiciel **gratuit**, disponible en **3 langues**

- Français
- Anglais
- Espagnol



TRAC v1.7 (Windows OS)

Téléchargement : <https://trac.brgm.fr> # 15

TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Solutions pour les milieux 1D, 2D, 3D, radial convergent

Traçage au droit d'un pompage

- Améliore la récupération du traceur
- Accélère la procédure expérimentale
- Méthode économique pour obtenir les paramètres de transport

Développement d'une nouvelle solution semi-analytique en écoulement radial convergent

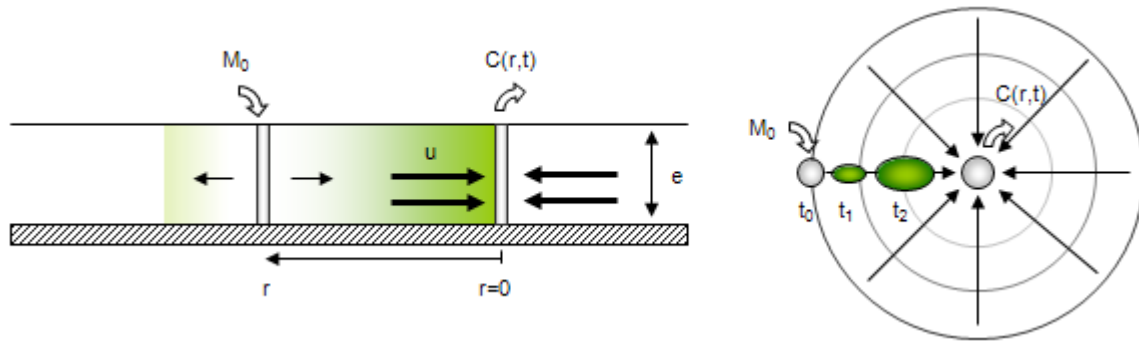
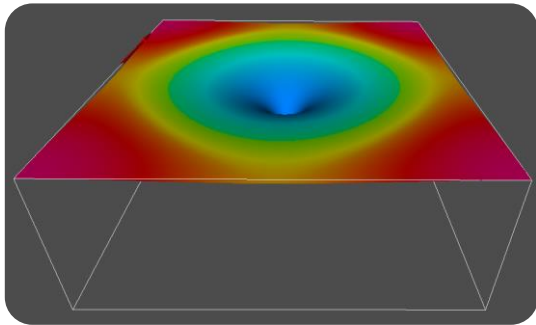


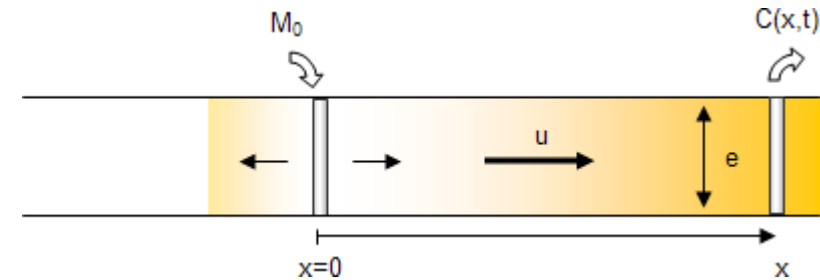
Schéma de traçage - Injection brève d'une masse dans un écoulement radial convergent induit par un pompage continu



Ajustement par optimisation des paramètres

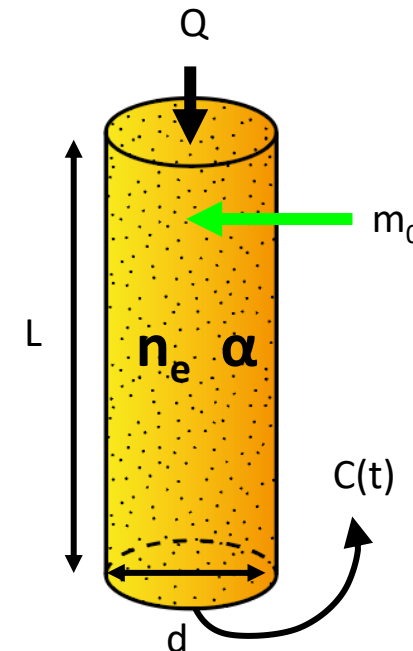
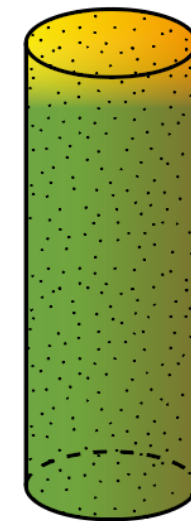
- Fonction objectif : minimise l'écart entre les points d'observation et les points simulés :

$$\chi^2 = \sum (s_{\text{calculated}} - s_{\text{observed}})^2 \Rightarrow \text{Minimum}$$



Injection d'un Dirac de masse dans un milieu infini

Colonne saturée

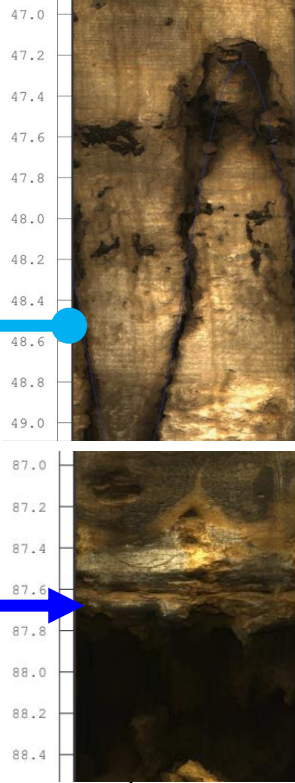
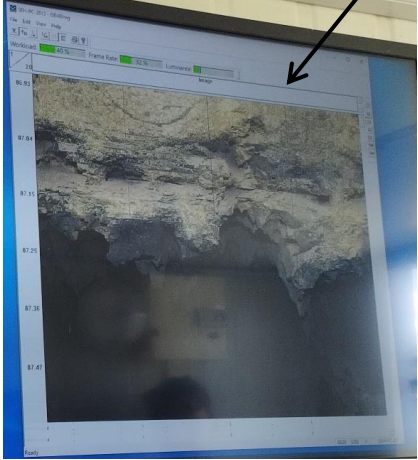
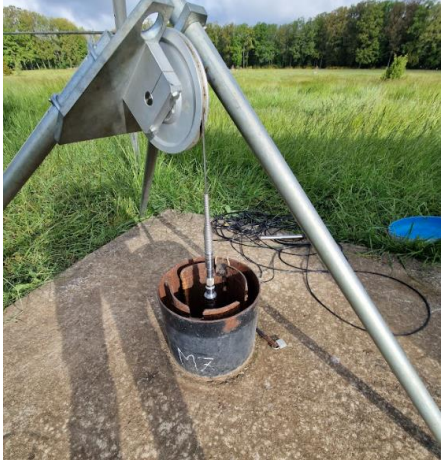
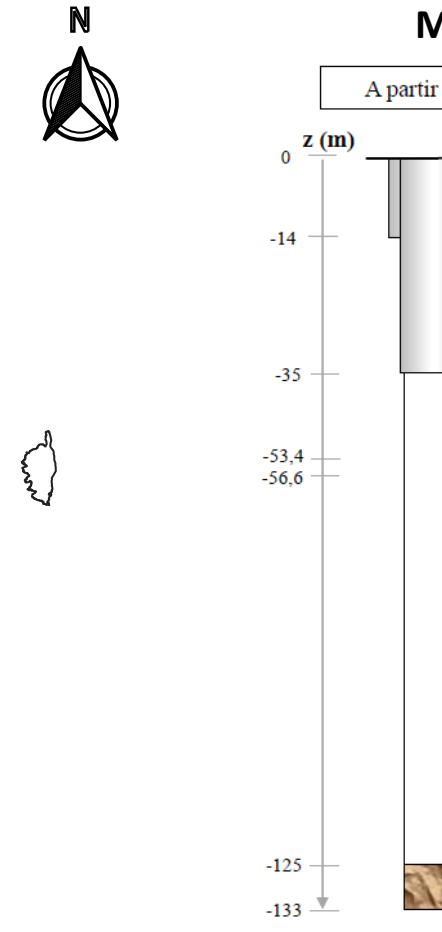
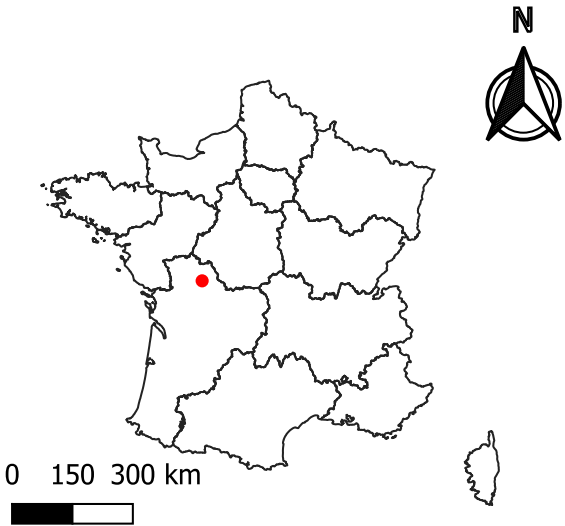
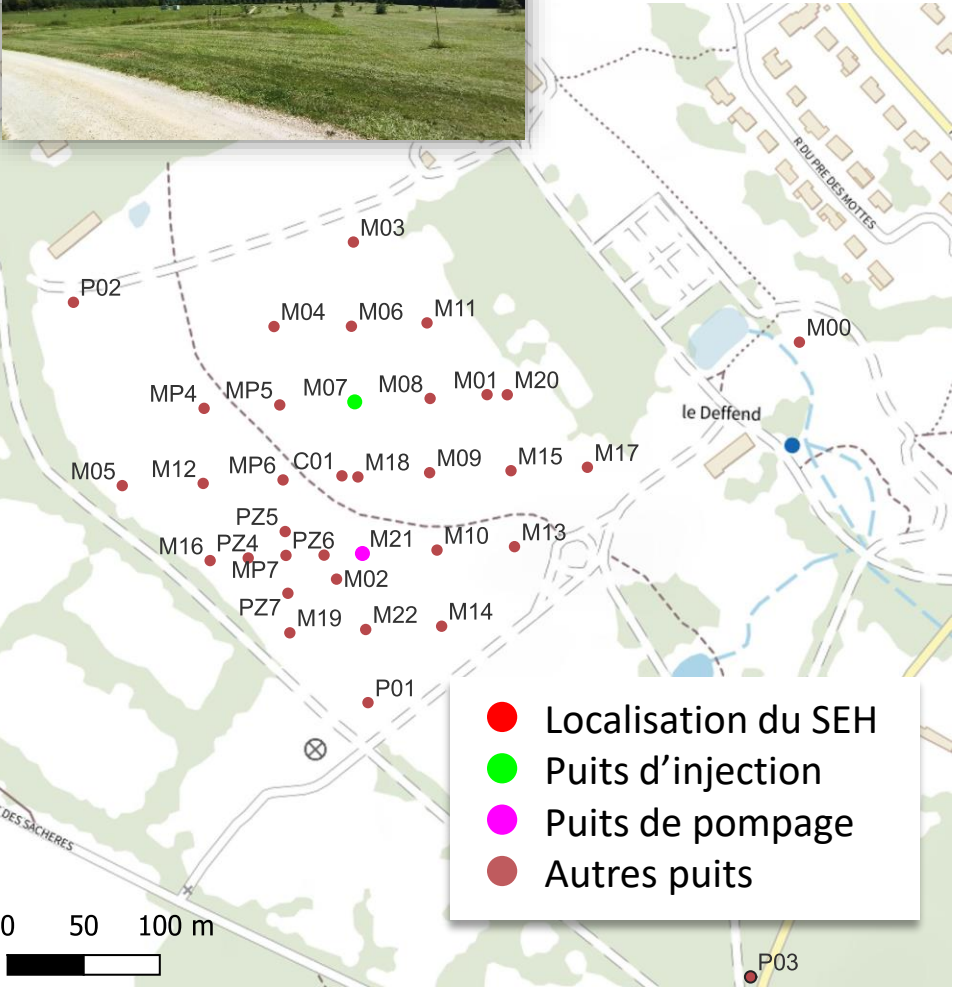


- Q = Débit imposé [L³/T]
- m_0 = Masse injectée [M]
- d = Diamètre de colonne [L]
- L = Longueur de colonne [L]
- n_e = Porosité [L³/L³]
- α = Dispersivité [L]
- $C(t)$ = Concentration [M/L³]

TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Exemple de traçage en milieu karstique

Traçage au droit du SEH de Poitiers – Dogger

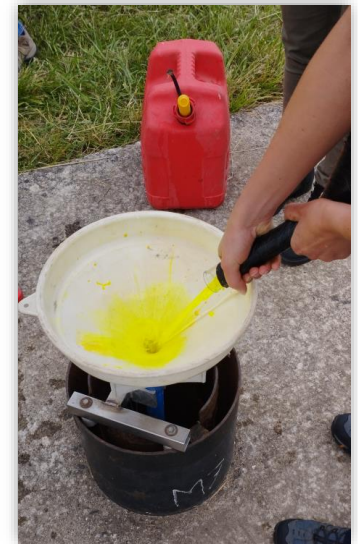
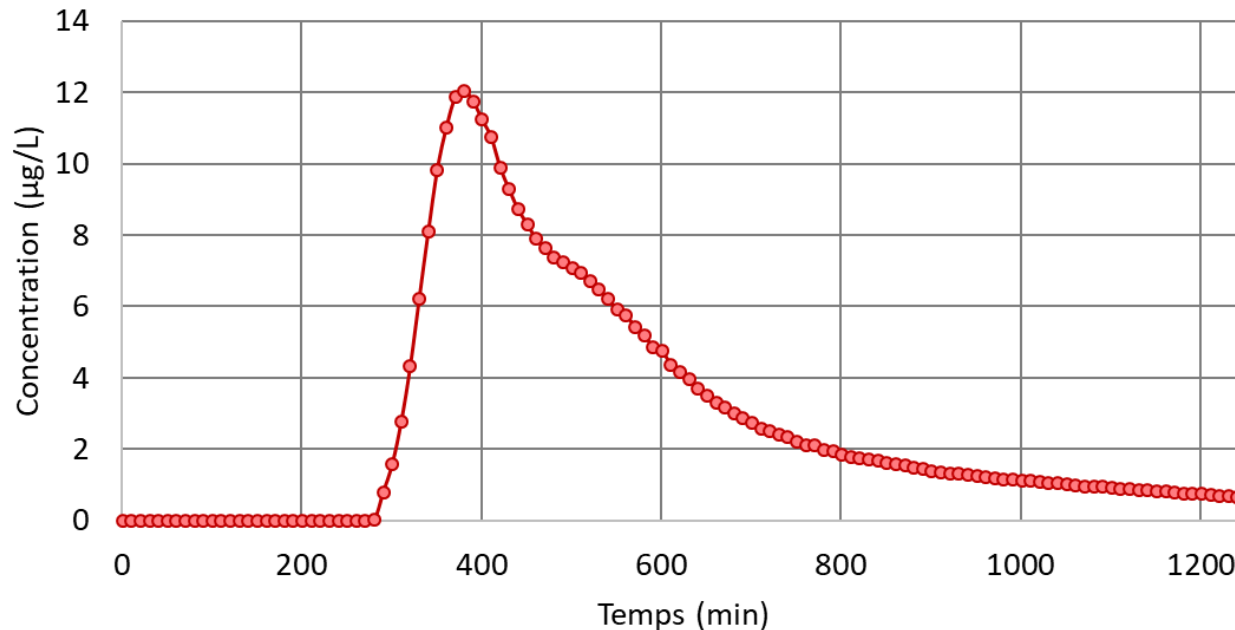


TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Exemple de préparation de traçage en milieu karstique

- ❑ Traçage au droit du SEH de Poitiers – Dogger
 - Traçage en condition de pompage sur M21
 - $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$
 - Injection de 5g de fluorescéine sur M7B (à 100 m de M21)
 - Identification de la zone d'injection via imagerie de paroi
 - Profondeur d'injection : 85 m (*via* canne d'injection + chasse)
 - Utilisation de deux fluorimètres en série

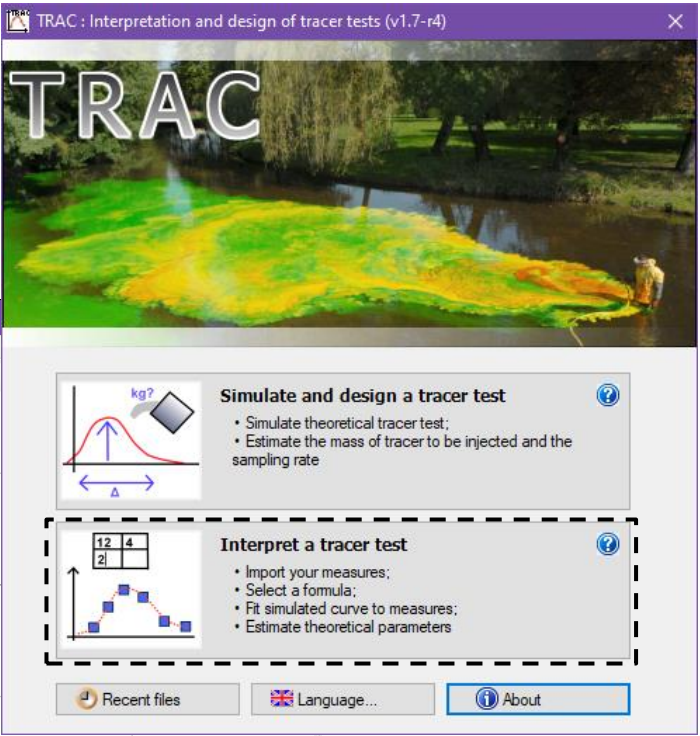
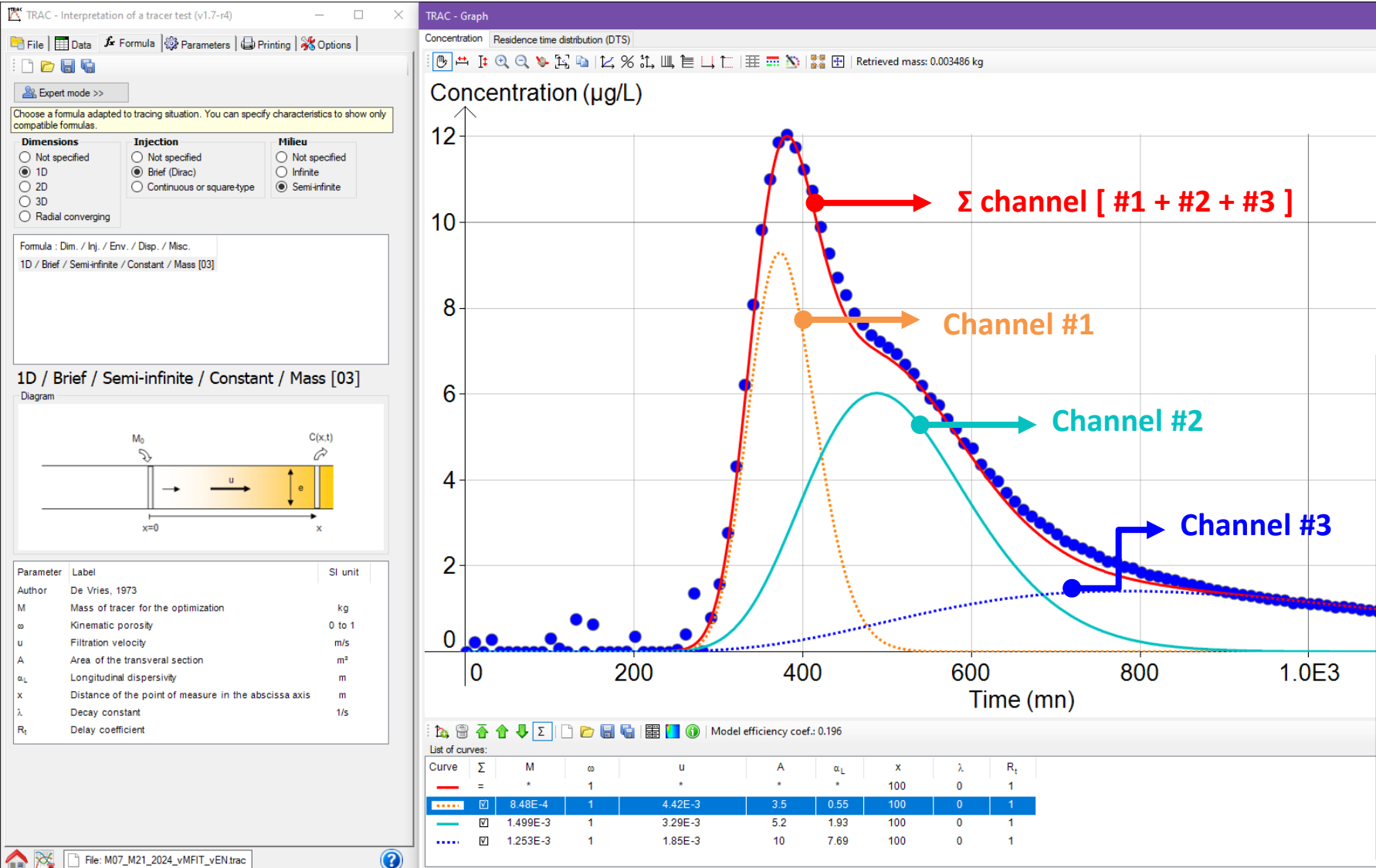
Courbe de restitution de l'uranine
[Injection en MP7, pompage @ $60 \text{ m}^3/\text{h}$ en M21]



TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Exemple d'interprétation en milieu karstique

Logiciel [TRAC](#) (BRGM)

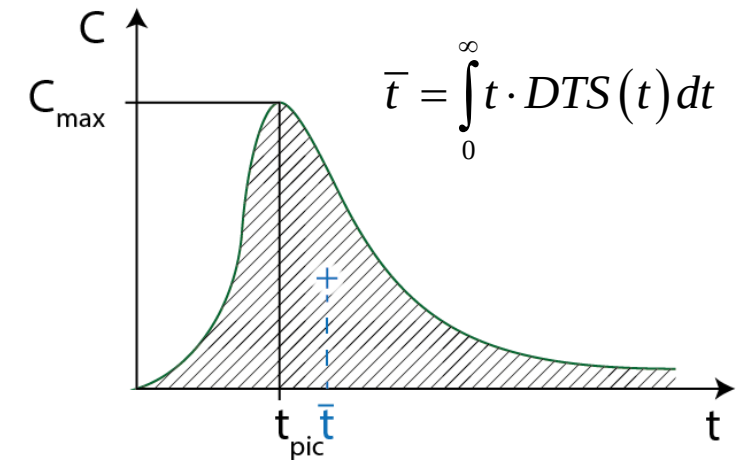
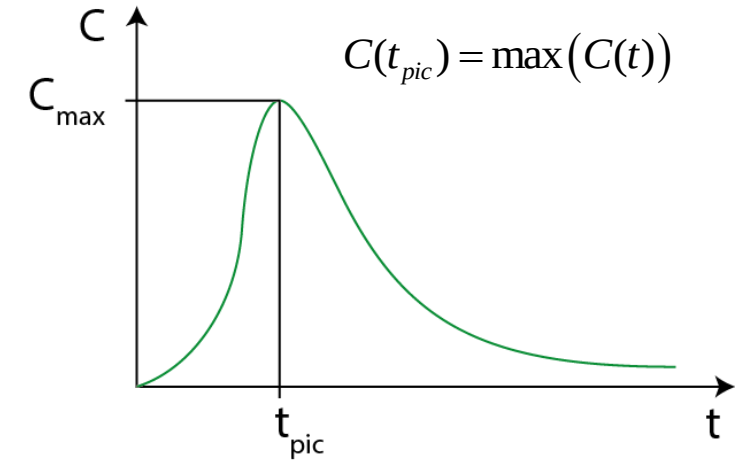
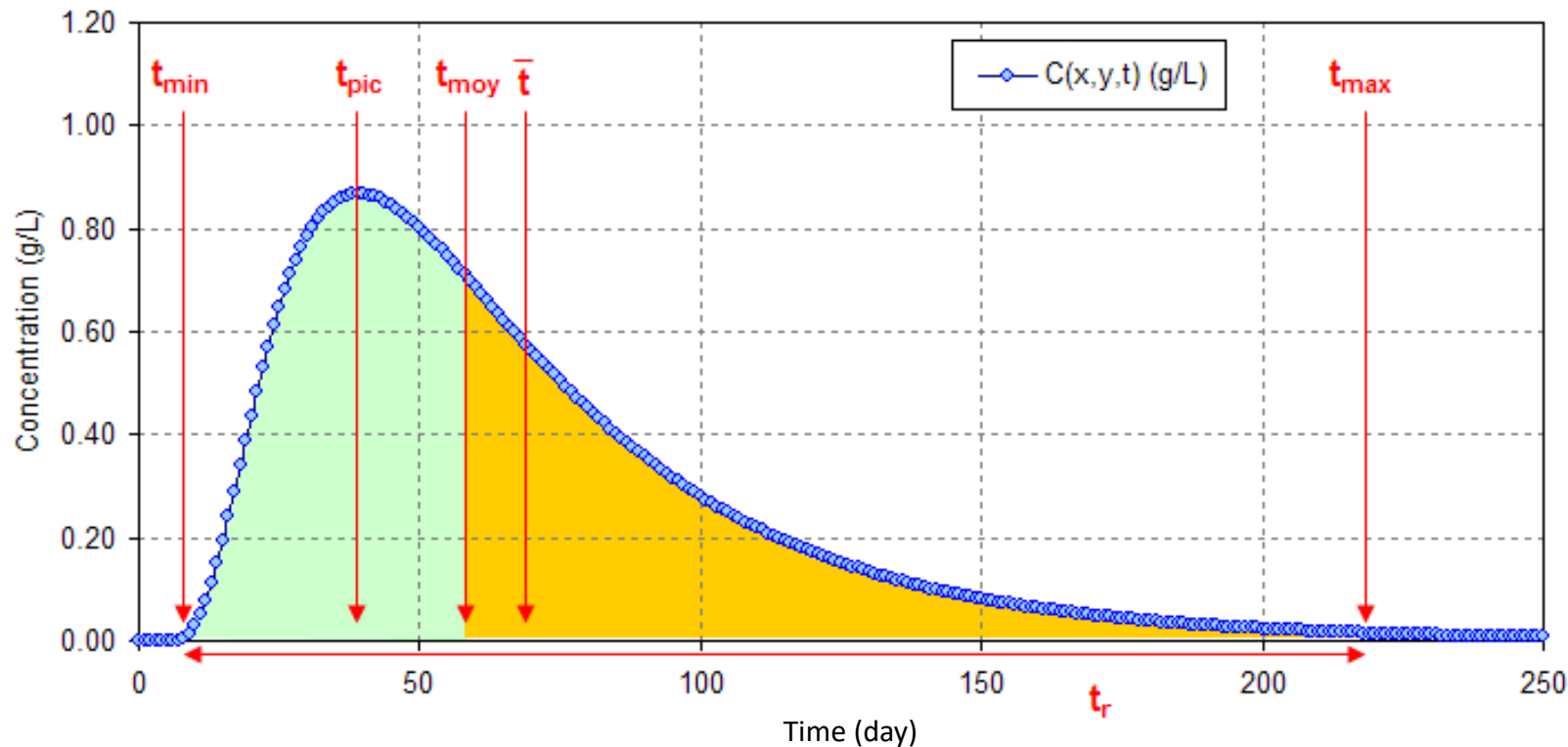


	Channel n°1	Channel n°2	Channel n°3
m (g)	0.85	1.50	1.25
%m (%)	24	43	36
u (m/s)	4.4E-03	3.3E-03	1.9E-03
u (m/h)	15.9	11.8	6.7
A (m²)	3.5	5.2	10
α_L (m)	0.55	1.93	7.69
x (m)	100	100	100

TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Les temps et variables caractéristiques déterminés

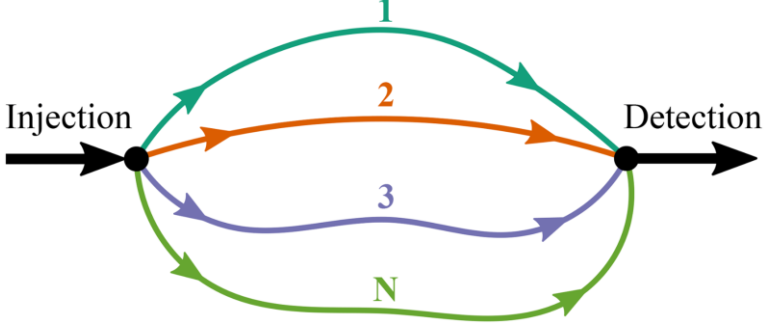
- Temps descriptifs
 - Pour une distance « d » donnée, la valeur de t_{moy} ne dépend que du processus d'advection
 - Alors que le processus de dispersion contrôle les écarts :
 - $t_{\text{min}} - t_{\text{pic}}$ et $t_{\text{pic}} - t_{\text{moy}}$ et $t_{\text{pic}} - t_{\text{max}}$
- Temps moyen de séjour ($\bar{t}$) --> v_{app} : **vitesse apparente**
 - Correspond à l'abscisse du centre de gravité du nuage de traceur



TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Exemple d'interprétation en milieu karstique

- ❑ Logiciel MFIT v1.0.2 (Février 2024) – Université de Poitiers
 - Multi-Flow Inversion of Tracer breakthrough curves in fractured and karst aquifers
 - Développé en 2019 par Jacques BODIN jacques.bodin@univ-poitiers.fr
 - Dédié à la modélisation analytique des courbes de restitution des traceurs.
 - Intègre 4 modèles de transport qui sont tous capables de simuler un ou plusieurs pics et/ou des queues de restitution
- ❑ La modélisation multiflux suppose :
 - que l'hétérogénéité spatiale d'un aquifère peut être approchée par une **combinaison de chemins unidimensionnels** indépendants
 - Compatible et interfacé avec les outils d'optimisation avancés de la suite de programmes **PEST**
 - Modèle **MDMI** :



Esquisse conceptuelle de l'approche de modélisation (générique) multiflux, modifiée de Leibundgut et al. (2009).

Model	Parameters
MDMi (ADE, instantaneous injection)	Q, m_j, T_{0j}, Pe_j
MDMed (ADE, exponentially decaying injection)	$C_0, Q_j/Q, T_{0j}, Pe_j, \gamma_j$
MDP-SFDM	$Q, m_j, T_{0j}, Pe_j, \beta_j$
MDP-2RNE	$Q, m_j, L_j, T_{0j}, Pe_j, \psi_j, \omega_j$

Parameters of the transport models integrated in the MFIT software.

$$C_j = \frac{m_j}{2Q_j T_{0j} \sqrt{\frac{\pi}{Pe_j} \left(\frac{t}{T_{0j}}\right)^3}} \exp\left(-\frac{Pe_j T_{0j}}{4t} \left(1 - \frac{t}{T_{0j}}\right)^2\right)$$

Analytical solution for the case of an instantaneous injection of solute in a semi-infinite medium (Kreft and Zuber, 1978)

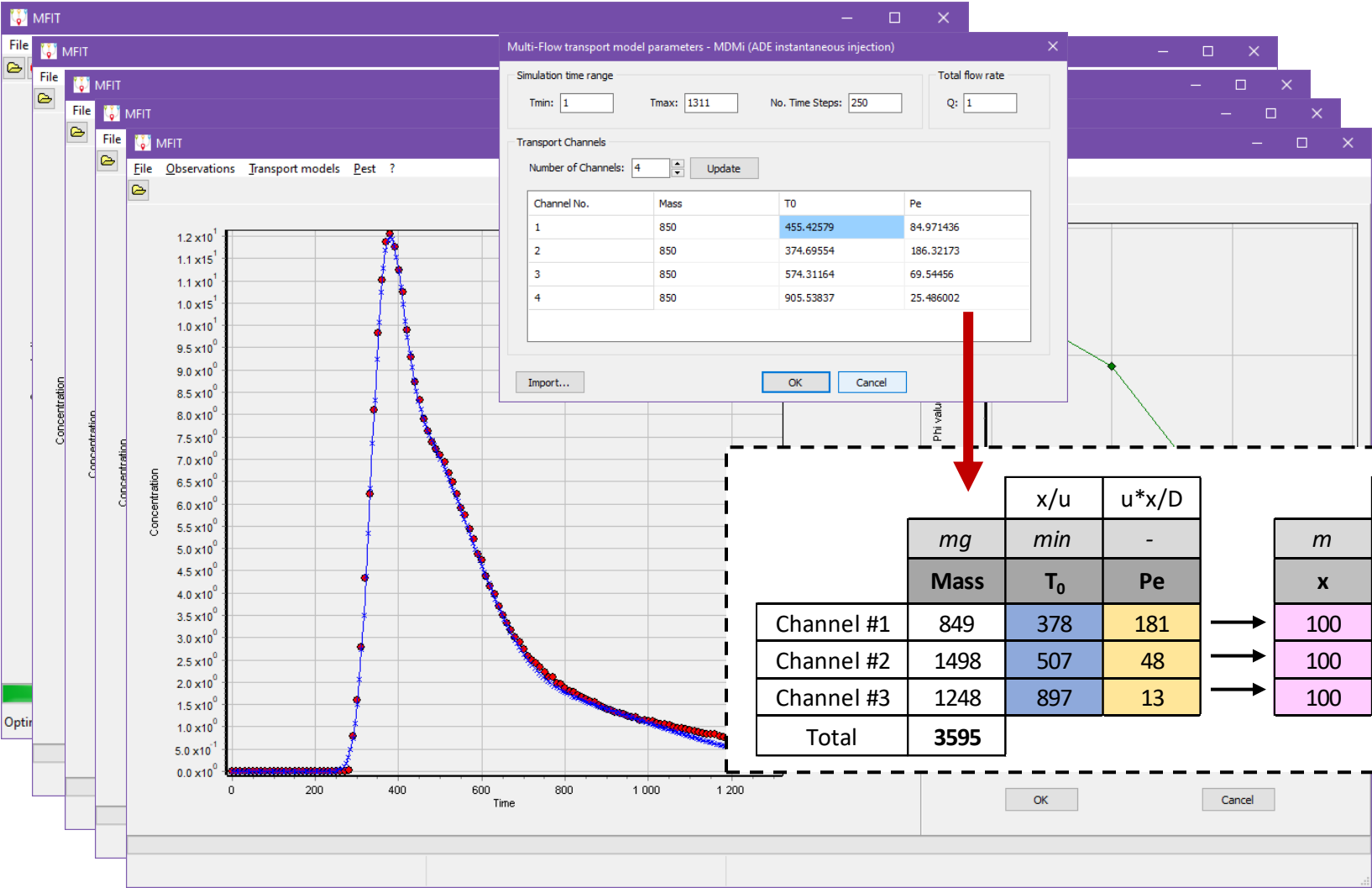
$$T_{0j} = \frac{L_j}{u_j} \quad Pe_j = \frac{u_j L_j}{D_j} \quad \text{où } L_j [L] \text{ est la longueur du } j \text{ ème chemin.}$$

- Avec les paramètres suivants :
- t [T] est la variable temporelle
 - Xj [L] est la coordonnée spatiale le long du j ème canal d'écoulement
 - uj [L.T-1] et Dj [L2.T-1] sont respectivement la vitesse d'advection et le coefficient de dispersion
 - mj [M] est la partie de la masse de soluté qui s'écoule via le j ème canal
 - et T0j [T] et Pej [-] sont le temps de transit moyen et le nombre Péclet, qui sont exprimés :

TRAÇAGE HYDROGÉOLOGIQUE

Exemple d'interprétation en milieu karstique

Estimation des paramètres de transport par inversion (PEST)



$$T_{0j} = \frac{L_j}{u_j}$$
$$Pe_j = \frac{u_j L_j}{D_j}$$

		x/u	u*x/D					x/T0	u*x/Pe			D/u			
mg		min	-					m	m/s	m/min	m/h	m			
Mass		T ₀	Pe					x	u	u	u	D	D	D	α _L
Channel #1	849	378	181	→	100	4.4E-03	0.26	15.89	2.4E-03	0.15	8.78	0.55			
Channel #2	1498	507	48	→	100	3.3E-03	0.20	11.84	6.9E-03	0.41	24.76	2.09			
Channel #3	1248	897	13	→	100	1.9E-03	0.11	6.69	1.4E-02	0.85	50.92	7.62			
Total	3595														

 BD Traçages

-  **Traçage positif**
-  **Traçage négatif**
-  **Point d'observation**
-  **Point d'injection**

