

# Injection des sols - Fracturation hydraulique ou imprégnation?

28/04/2024



COLLECTE



TRAITEMENT



SERVICES



VALORISATION



STOCKAGE



DEPOLLUTION

MAÎTRISER DURABLEMENT LE RISQUE DÉCHET POUR PÉRENNISER L'ACTIVITÉ INDUSTRIELLE

**Boris DEVIC-BASSAGET**  
DT Sarpi Remédiation

**SARPI Remédiation France**  
17 Rue du Périgord - 69330 Meyzieu  
Tél : 04 72 45 02 22



Union des Professionnels  
de la Dépollution des Sites.

# SOMMAIRE

**1** | Partie 1 - Histoire de  
l'injection des suspensions

**3** | Partie 3 - théorie  
Imprégnation vs Fracturation

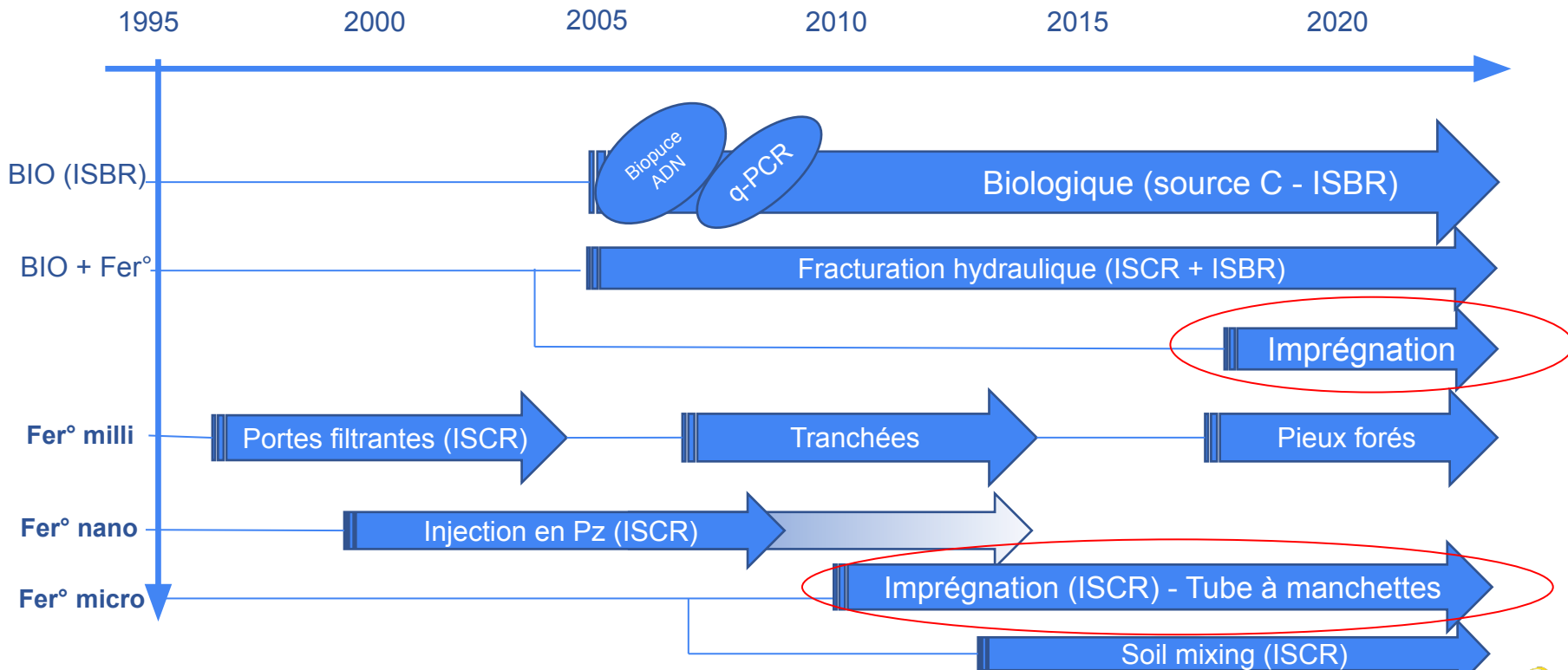
**2** | Partie 2 - Effet rebond et  
modalités d'injection

**4** | Partie 4 - Synthèse &  
conclusion

# Partie 1 - Brève histoire Injection réduction (bio / fer zéro)



# Historique des traitements par réduction et applications



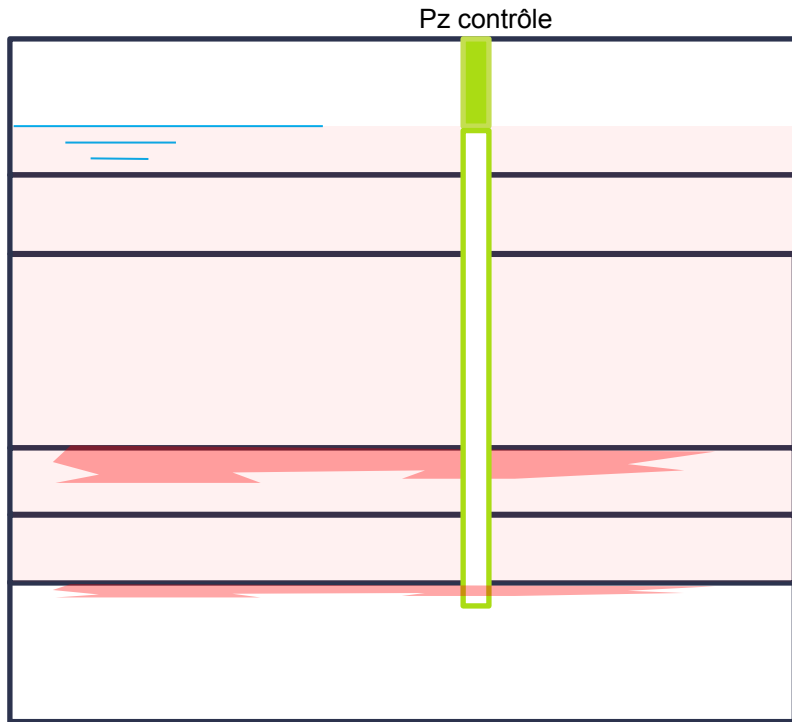
## Partie 2 - Effet rebond et modalités d'injection



## 2. Injection des sols – Modalités d'injection et effet rebond

### Effet rebond

- L'effet rebond est une **remontée durable des concentrations** après un traitement.
- Aux US, on considère un **effet rebond** quand la remontée est de plus de **25% de la chute de concentration** observée lors du traitement précédent.



Limons  $K = 10^{-5}$  m/s

Sables limoneux  $K = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s

Sables et graviers  $K = 5 \cdot 10^{-4}$  m/s

Argile sableuse  $K = 10^{-6}$  m/s

Grave sableuse  $K = 10^{-3}$  m/s

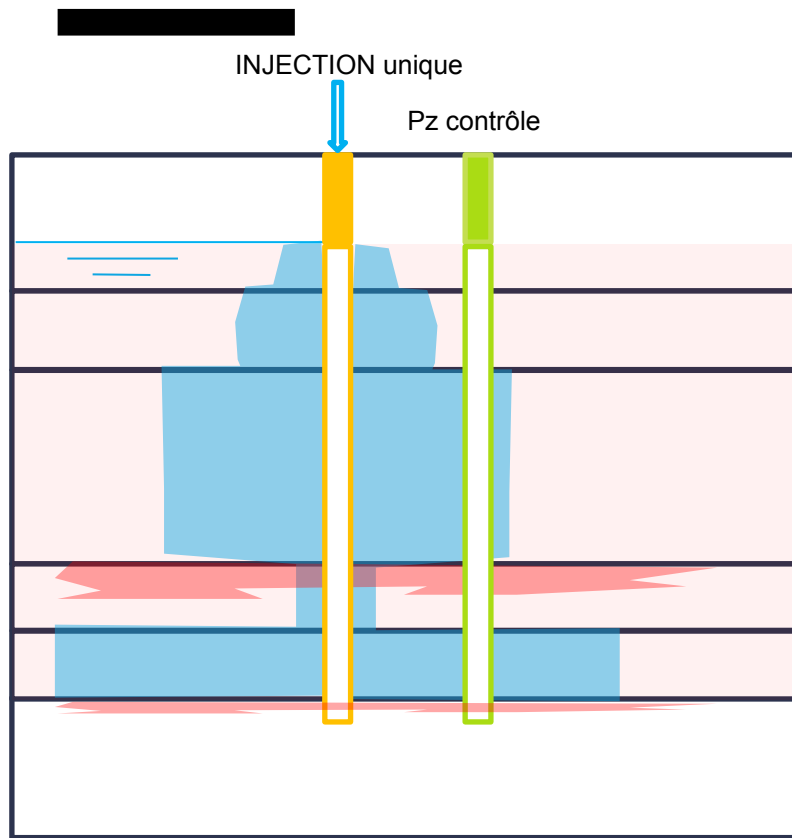
Marne compacte  $K = 10^{-8}$  m/s  
Substratum

Etat initial :

- Nappe impactées
- Zones argileuses ou de faible perméabilité impactées
- Hétérogénéités

## 2. Injection des sols – Modalités d'injection et effet rebond

### Effet rebond - Injection en piézomètre



Limons  $K = 10^{-5}$  m/s

Sables limoneux  $K = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s

Sables et graviers  $K = 5 \cdot 10^{-4}$  m/s

Argile sableuse  $K = 10^{-6}$  m/s

Grave sableuse  $K = 10^{-3}$  m/s

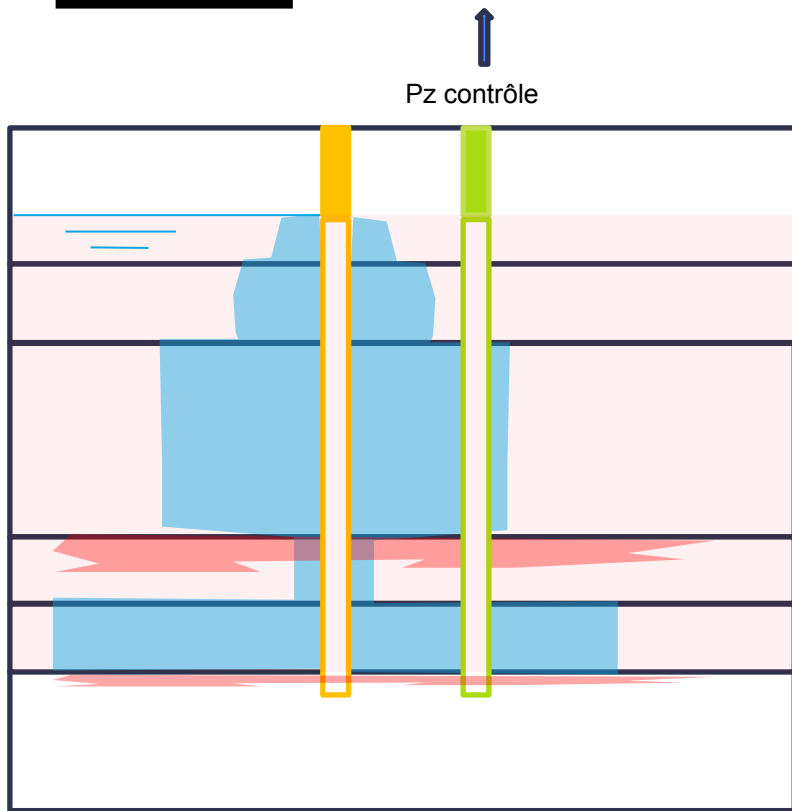
Marne compacte  $K = 10^{-8}$  m/s  
Substratum

INJECTION dans PZ  
unique et non sélectif :

⇒ L'injection ira  
d'autant plus loin que  
la perméabilité est  
forte

## 2. Injection des sols – Modalités d'injection et effet rebond

### Effet rebond - Injection en piézomètre



Limons  $K = 10^{-5}$  m/s

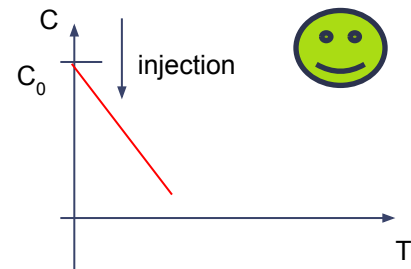
Sables limoneux  $K = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s

Sables et graviers  $K = 5 \cdot 10^{-4}$  m/s

Argile sableuse  $K = 10^{-6}$  m/s

Grave sableuse  $K = 10^{-3}$  m/s

Marne compacte  $K = 10^{-8}$  m/s  
Substratum



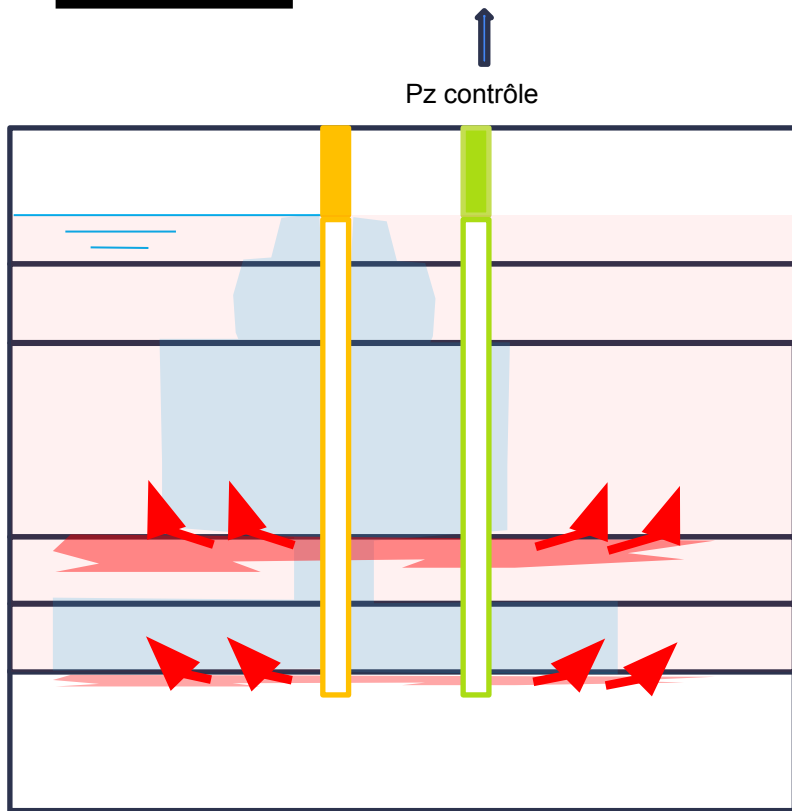
Réception dans Pz de contrôle :  
essentiellement de  
l'eau traitée (en bleu)

➤ Baisse des  
concentrations  
apparentes



## 2. Injection des sols – Modalités d'injection et effet rebond

### Effet rebond - Injection en piézomètre



Limons  $K = 10^{-5}$  m/s

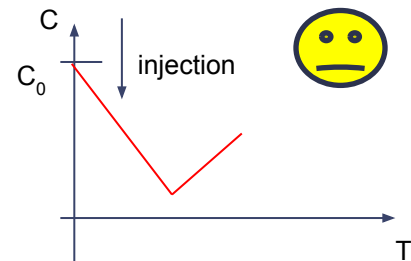
Sables limoneux  $K = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s

Sables et graviers  $K = 5 \cdot 10^{-4}$  m/s

Argile sableuse  $K = 10^{-6}$  m/s

Grave sableuse  $K = 10^{-3}$  m/s

Marne compacte  $K = 10^{-8}$  m/s  
Substratum

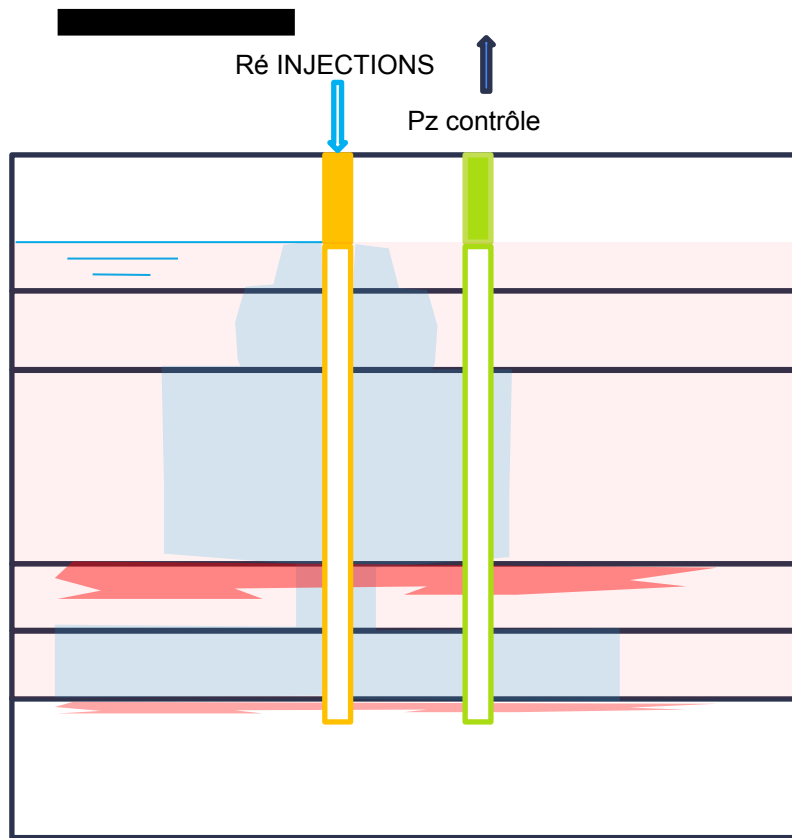


Nouveau contrôle :

- Le réactif est moins puissant (ex oxydant) et la lentille argileuse qui n'a pas été traitée « relargue »
- Rééquilibrage par diffusion
- 1<sup>ère</sup> augmentation des concentrations apparentes = rebond

## 2. Injection des sols – Modalités d'injection et effet rebond

### Effet rebond - Injection en piézomètre



Limons  $K = 10^{-5}$  m/s

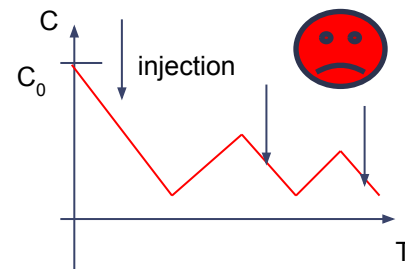
Sables limoneux  $K = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s

Sables et graviers  $K = 5 \cdot 10^{-4}$  m/s

Argile sableuse  $K = 10^{-6}$  m/s

Grave sableuse  $K = 10^{-3}$  m/s

Marne compacte  $K = 10^{-8}$  m/s  
Substratum

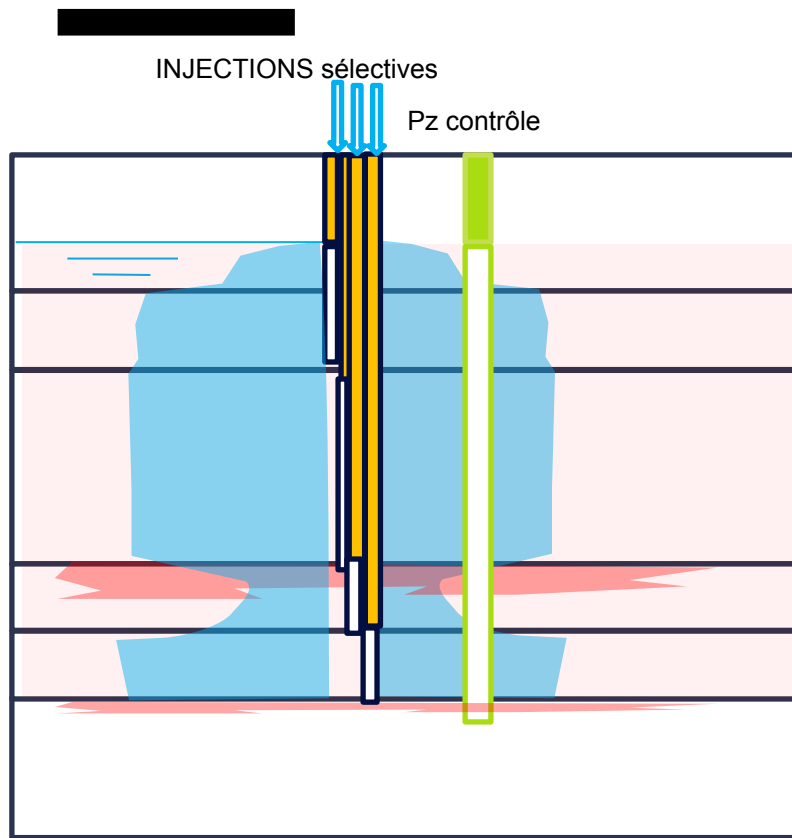


Réinjections :

- Effet « yoyo »
- Rebonds multiples
- Peu de visibilité sur fin de chantier

## 2. Injection des sols – Modalités d'injection et effet rebond

### Effet rebond - Injecteurs en “flûte de pan”



Limons  $K = 10^{-5}$  m/s

Sables limoneux  $K = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s

Sables et graviers  $K = 5 \cdot 10^{-4}$  m/s

Argile sableuse  $K = 10^{-6}$  m/s

Grave sableuse  $K = 10^{-3}$  m/s

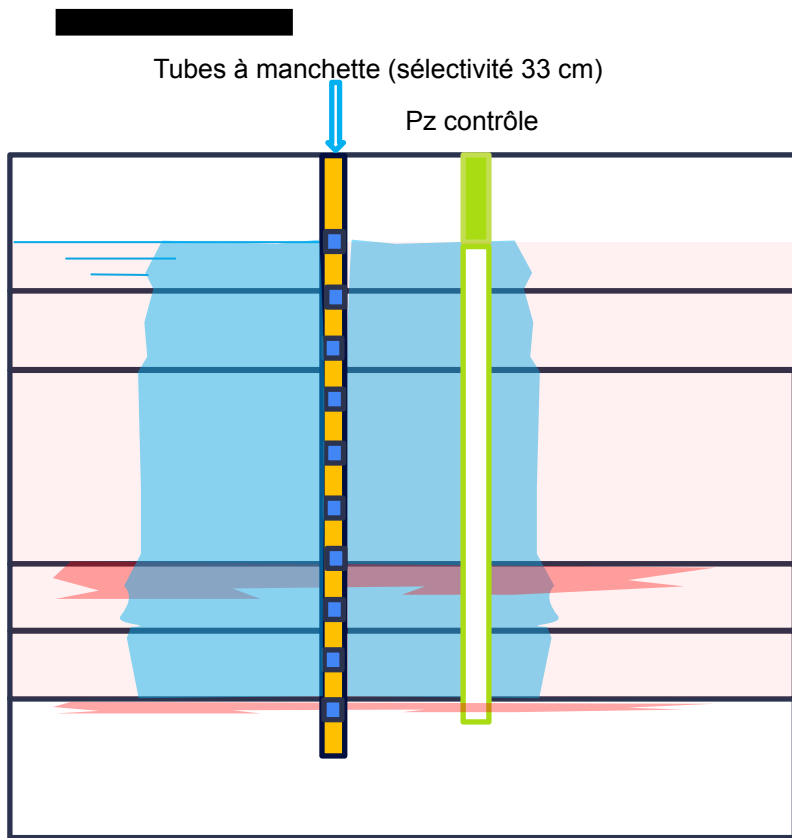
Marne compacte  $K = 10^{-8}$  m/s  
Substratum

Optimisation : injecteur  
flûte de pan, sélectif  
des  $K$  :

- injection mieux répartie
- Effet rebond moins prononcés

## 2. Injection des sols – Modalités d'injection et effet rebond

### Effet rebond - Injection au tube à manchettes ou Spin ou Direct Push



#### Optimisation maximale : Tubes à manchettes

- injection mieux répartie (équivalent à une flûte de pan / 33 cm (30 passes pour 10 ml de forage))
- Effet rebond limité au maximum car possibilité traitement accrue de la lentille argilo sableuse

## Partie 3 - injection des particules

# Fracturation hydraulique vs Impregnation



### 3. Imprégnation vs Fracturation

Modes d'injection : Claquage ou Direct Push



ISCR : Injections réactif visqueux et granulaire,  
Débit 2500 L/h / passe de 33cm  
 $K = 10^{-4}$  m/s  
□ résurgences à 15 m !!



### 3. Imprégnation vs Fracturation

#### Règle N°1 Conditions granulométriques d'injectabilité

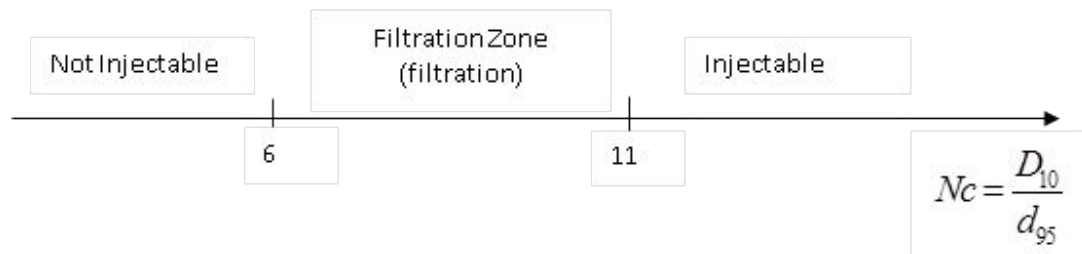
##### Règle 1 : Loi de Filtre – Condition d'injectabilité

On note le  $D_{10}$  du sol (diamètre passant du sol à 10%)  
Issu courbe granulométrique "GTR" ou déduit de la perméabilité

$$D_{10}(m) = \sqrt{\frac{K(m/s)}{10000}}$$

On note pour le coulis le  $d_{95}$ , diamètre passant du coulis à 95%.  
On note le rapport granulométrique

$$Nc = \frac{D_{10}}{d_{95}}$$

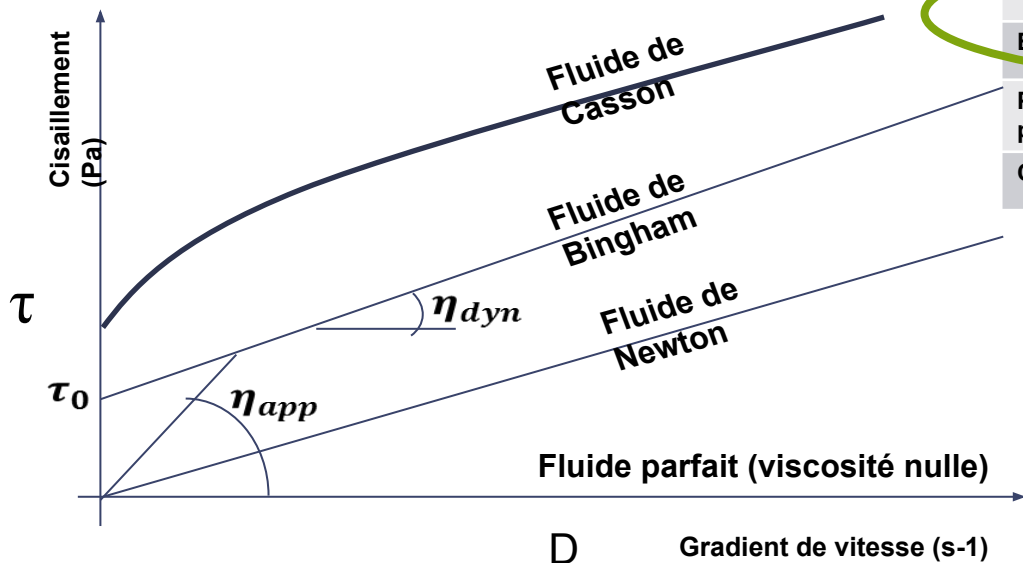
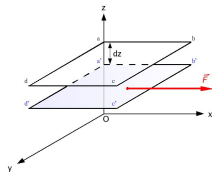


**Plus les particules sont fines, plus la suspension est injectable**

# 3. Imprégnation vs Fracturation

## Règle N°2 : Débit critique

RHÉOLOGIE -Types de fluides



## Cisaillement (mesure du couple)

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot D^\alpha$$

Type de fluide	$\eta$ = viscosité dynamique (mPa.s)	$\tau_0$ = seuil de cisaillement (Pa)	$\alpha$ = indice de comportement ( $\leq 1$ )
Parfait	0	0	-
Newton	$>0$	0	
Bingham	$>0$	$>0$	1
Pseudo plastique	$>0$	0	#1
Casson	$>0$	$>0$	#1

$$\eta_{app} = \frac{\tau}{D} = \eta_{dyn} + \frac{\tau_0}{D}$$

$\tau_0 > 0$  □ Plus le gradient de vitesse diminue, plus la viscosité apparente augmente

Ex du seuil de cisaillement = ce qui fait que la peinture ne coule pas

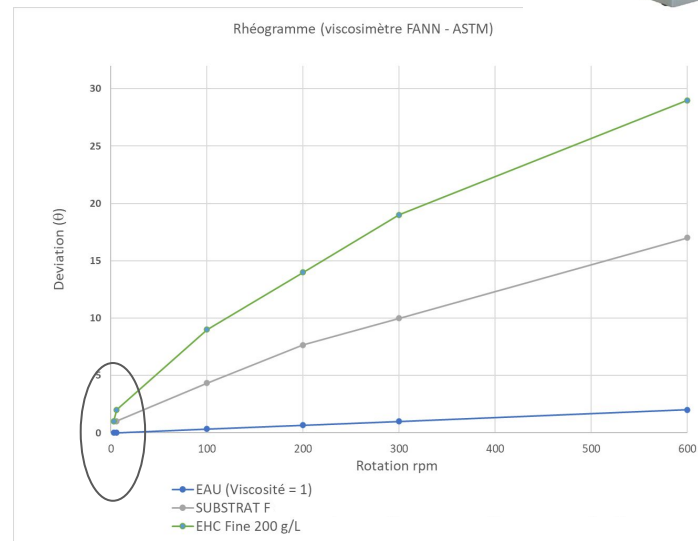
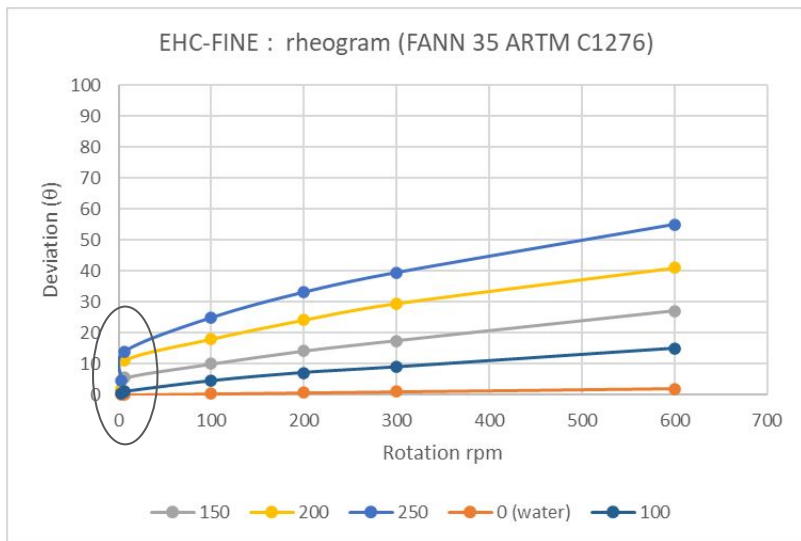
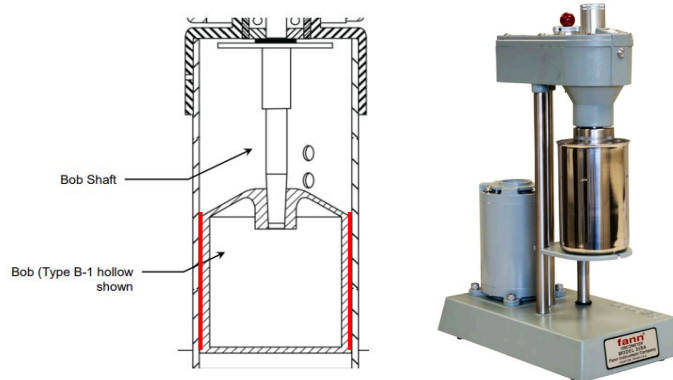


# 3. Imprégnation vs Fracturation

## Règle N°2 : Débit critique

Mesure de viscosité

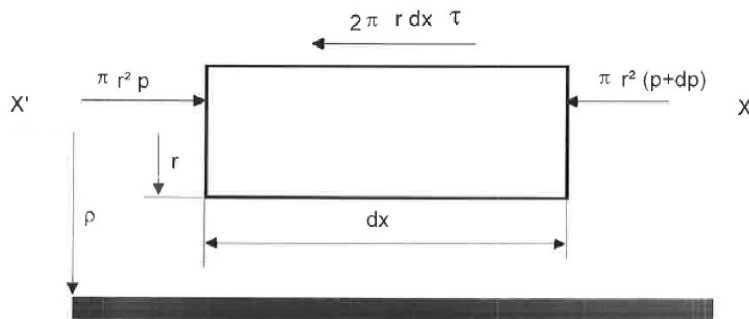
Exemples de rhéogrammes



### 3. Imprégnation vs Fracturation

#### Règle N°2 : Débit critique

Seuil de cisaillement = yield point



$$\frac{Dp}{Dx} = \frac{-2\tau}{r} \rightarrow P > \frac{2\tau L}{\rho} = \text{pression nécessaire pour qu'il y ait écoulement dans une conduite de longueur } L \text{ de rayon } \rho$$

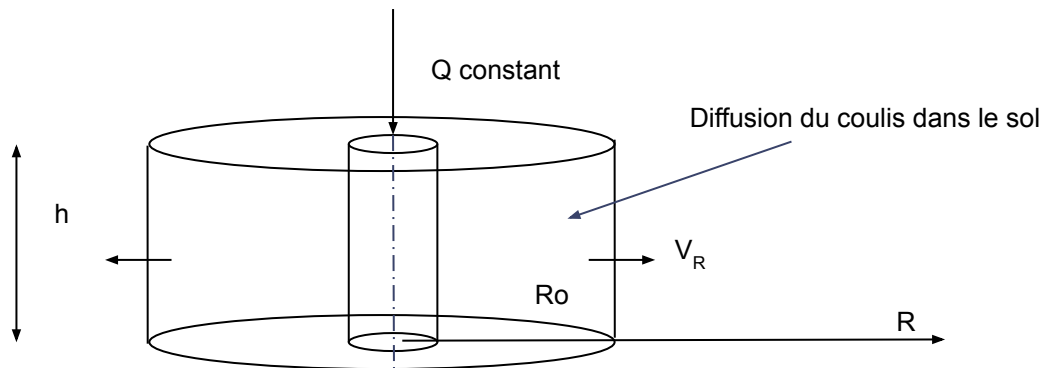
#### Intérêt des fluides cisailants :

- Stabilité des particules (évite la décantation des particules) - effet de “gel”
- Anti-essorage (limite la filtration)
- Permet de s'opposer à la « chasse gravitaire » des fluides, notamment en zone non saturée
- Evolution des suspensions en environnement : emploi de gommes biodégradables (dérivés des sucres)

# 3. Imprégnation vs Fracturation

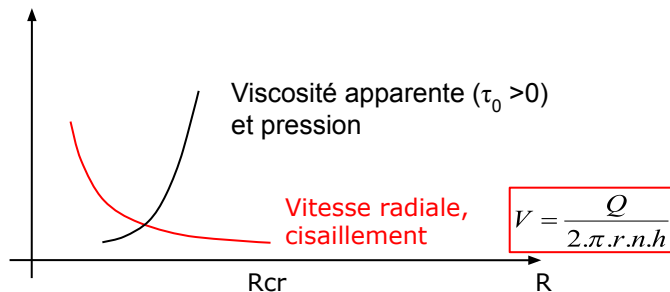
## Règle N°2 : Débit critique

VITESSE RADIALE du fluide injecté dans les pores du sol (via un forage vertical)



+ Darcy

$$Q = \frac{2\pi K e P}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}$$



# 3. Imprégnation vs Fracturation

## Règle N°2 : Débit critique

Documents de référence :

- Injection des sols (Henri CAMBEFORT, Eyrolles 1967)

- « Tunnels et ouvrages souterrains – N° 194-95 – mars/juin 2006 » Association française des Travaux en Souterrain (AFTESGT8). <https://www.aftes.fr/fr/product/la-recommandation-de-laftes-gt8-conception-et-realisation-des-travaux-dinjections-des-sols-et-des-roches-michel-chopin/>

## Pression limite d'imprégnation

Afin d'éviter la fracturation hydraulique du sol (pouvant atteindre plusieurs mètres et créant des risques de soulèvement de terrain et de résurgences dans des bâtiments), la pression d'injection efficace doit être limitée :

$$P_{eff\ ing} \leq P_0 = \gamma \cdot h(1 + \sin \varphi) \cdot \nu$$

où:

$\gamma$  = densité du terrain au dessus de la zone traitée en kg/m<sup>3</sup>

$h$  = profondeur moyenne de la zone injectée en m

$\varphi$  = angle de frottement du terrain (en général 35° pour les sables et graviers)

$\nu$  = coefficient de Poisson du milieu (en général = 0,3 pour les sables et graviers)

# 3. Imprégnation vs Fracturation

## Règle N°2 : Débit critique

### Limitation du débit (injection par imprégnation des milieux granulaires - Fluide de Bingham)

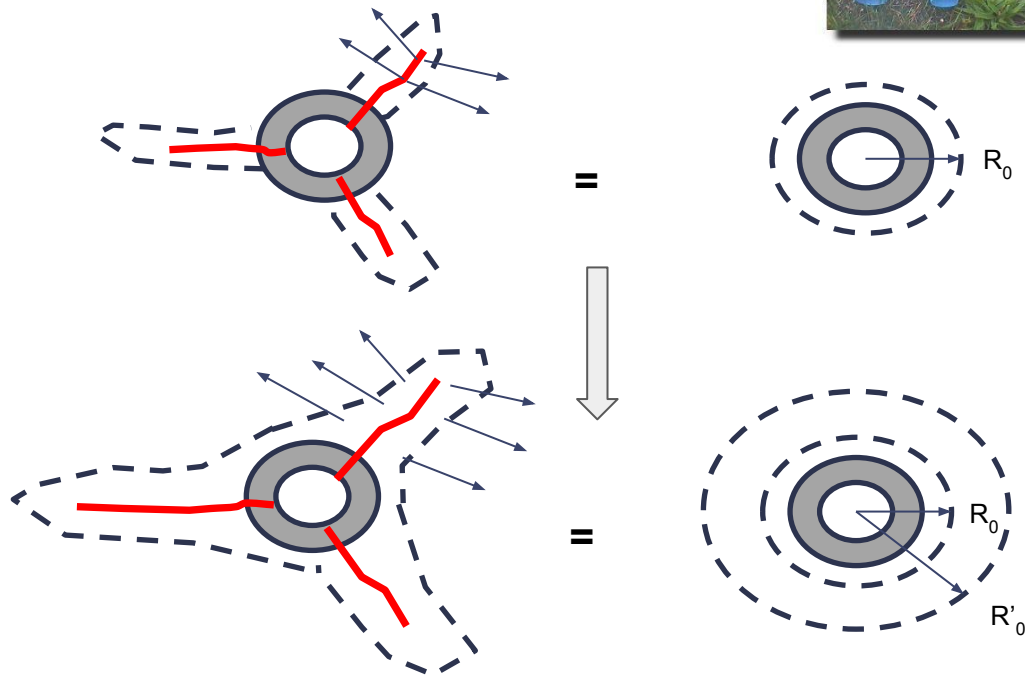
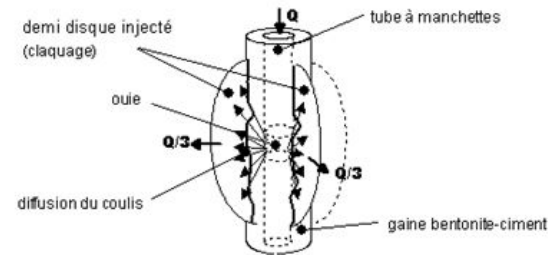
$$Q_{max} \leq \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot e \cdot \eta_0}{\varpi \cdot \eta \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \left[ \gamma \cdot h(1 + \sin \phi) \cdot \nu - \frac{4 \cdot \tau_0 (R_{inj} - r_0)}{D_{10}} \right]$$

⇒ Le seuil d'écoulement s'oppose à l'injection  
⇒ Il existe une distance à laquelle l'injection se bloque à pression donnée

$Q =$	débit en $m^3 \cdot s^{-1}$
$\varpi =$	densité du coulis en $kg/m^3$
$K =$	perméabilité du milieu alluvionnaire en $m \cdot s^{-1}$ (à l'eau)
$\eta_c =$	viscosité cinématique du coulis en $mPa \cdot s$ (proche de l'eau sans polymère, 2 à 10 avec polymère)
$\eta_0 =$	viscosité cinématique de l'eau en $mPa \cdot s$ (env. 1 $mPa \cdot s$ à 20 °C)
$e =$	épaisseur de la couche concernée en m (prise à 0,33 à 0,5 m en général pour le TAM)
$R =$	rayon d'action de Dupuit en m ( $R \sim 10 \cdot R_{inj}$ en ZS et $R \sim R_{inj}$ en ZNS)
$h =$	Profondeur d'injection en m
$\gamma =$	Densité du sol au-dessus du point d'injection
$\phi =$	Angle de frottement du sol (en général 35° pour des alluvions)
$\nu =$	Coefficient de Poisson du sol (en général 0,3)
$R_{inj} =$	rayon max de l'injection en m
$r_0 =$	rayon du forage en m (= 0,05 m en général)
$\tau_0 =$	Seuil de cisaillement du coulis en Pa (0 à 10 Pa selon type de polymère)
$D_{10} =$	Diamètre passant du sol en m.

# 3. Imprégnation vs Fracturation

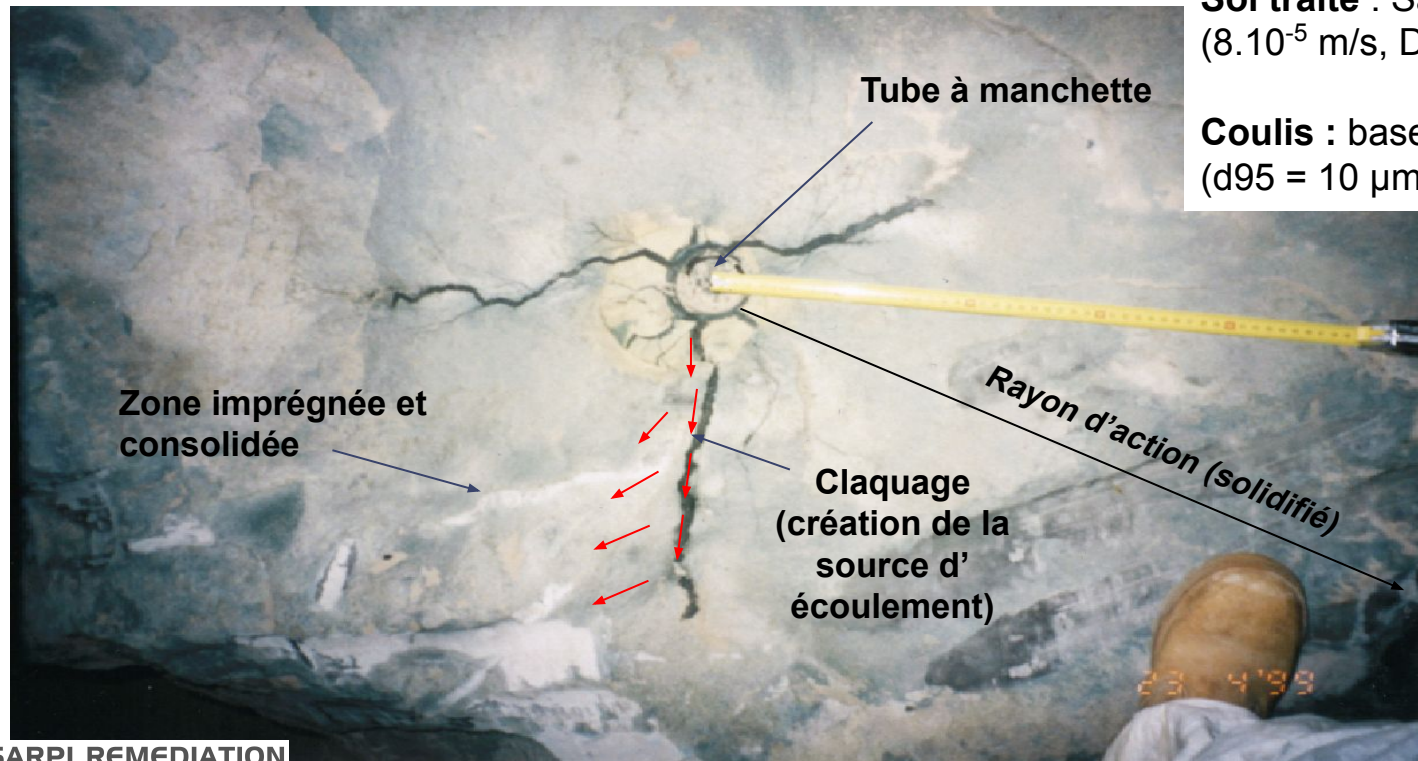
## Tube à Manchettes et Écoulements



- Diffusion par les petits claquages = création de la source
- A débit constant la pression monte.
- Si le fluide est cisailant, il peut y avoir équilibre de la pression avec le cisaillement
- Poursuite de l'injection : légère montée en pression = Nouveau claquage prolongé
- reprise de l'injection avec  $R'_0 > R_0$
- Pression :  $P(R'_0) < P(R_0)$

# 3. Imprégnation vs Fracturation

## A5. Exemples (terrain fin)



**Injection de  
stabilisation-solidification in situ**

**Sol traité :** Sables de Fontainebleau  
( $8.10^{-5}$  m/s,  $D_{10} = 100\mu\text{m}$ ,  $C_u = 2$ )

**Coulis :** base ciment ultrafin + craie  
( $d_{95} = 10\mu\text{m}$ )

# SYNTHÈSE





Technique	ISBR	ISCR (Injection imprégnation)	ISCR (Fracturation hydraulique)	ISCR Soil Mixing
Réactif	Mélasse / émulsion huile / lactate	ZVI ou mélange avec source carbone	ZVI ou mélange avec source carbone	ZVI
Rhéologie réactif	Très fluide (eau) $\eta_c = 1 \text{ mPa.s}$ $\tau_0 = 0 \text{ Pa}$	fluide $\eta_c = 2-10 \text{ mPa.s}$ $\tau_0 = 0,1-2 \text{ Pa}$	Épaisse $\eta_c = 5-100 \text{ mPa.s}$ $\tau_0 = 2-10 \text{ Pa}$	Indifférente
mode opératoire	Pz, Flute de pan	Injection one shot : Répétitive et Sélective (TAM bas débit) / SPIN®	Direct Push / TAM haut débit	Tarière
Fréquence réinjection	6-12 mois zone source	One shot zone source / 2-3 ans BPR	2 ans BPR	One shot zone source
Dosage courant	+/- 5g/l par campagne	+++ 0,5 - 1 % sol	Faible (0,1 - 0,2% masse)	1%, 2% puis 4% (limiter les effets biologiques)
Porosité injectée	Efficace	Efficace- totale 15-30% selon K	1-2% (Fracturation hydraulique)	totale : 15-30%volume de sol
Débit	Lent Rapide	Lent (600-1200L/h/m)	rapide (3000 -6000 L/h/m)	Mélange
Qualité du traitement	+/- (diffusion)	++ (filtration)	- - - (claquages de qq mm)	+++ (optimal si sécant)
Zones Sources	++/+	++/+++	-	+++
Panache	+/-	+++	++	- (altération baisse K)
Remarque	effet de diffusion du réactif	Réaction par contact	Résurgences (faible profondeur)	Altération géotechnique
Voie d'optimisation	Améliorer le traitement Injection Sélective (TAM)	porosité totale injectée, maillage resserré 2,5 - 3 m,		Dosage fer 4%, colonne sécantes

# Conclusion

- L'injection (imprégnation ou fracturation) à proximité de la surface est impossible. En pratique, à moins de 1,5 m de profondeur l'injection est quasiment impossible (le coulis résurge en surface par manque de résistance du sol)
- Plus on injecte profondément, plus on peut injecter à fort débit
- L'injection par imprégnation est plus coûteuse que la fracturation :

	Imprégnation	vs	Fracturation
○ Maillage	2,5 - 3 m	vs	4,5 - 5 m
○ Passes	33-50 cm	vs	33-50 cm
○ Débit	300 - 1200 l/h/p	vs	3500 l/h/p
○ porosité	15-30%	vs	2-5%
- A maillage égal, l'injection au tube à manchette est plus économique que le direct push si on doit réinjecter
- L'imprégnation nécessite une maîtrise fine des paramètres d'injection. Il faut trouver le bon compromis entre débit d'injection et stabilité des particules pour limiter la filtration

# Merci

[boris.devic-bassaget@veolia.com](mailto:boris.devic-bassaget@veolia.com)

[www.sarpiremediation.com](http://www.sarpiremediation.com)

