



SOL environment

## Mise en œuvre d'une injection dans les sols : *Quelles modalités d'injection ?*

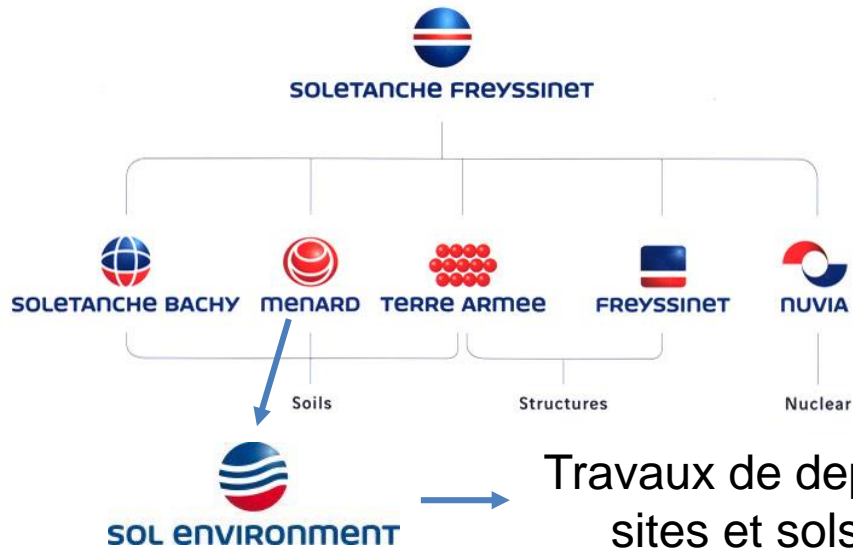
D. KAIFAS, A. TRIGER, P.Y. KLEIN



Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet AMI « SILPHES », avec le soutien de l'ADEME

Partenaires du projet : Solvay (Inovyn), BRGM, Serpol, Mahytec, Intera, Soldata Geophysics, Biorem, UTINAM, LCE, Sol Environment

# Nos activités



Barrière reactive perméable



Soil mixing



Injection de réactifs



Traitement biologique



# Mise en œuvre d'une injection

- Traitement chimique in situ - injection de particules solides (Fer)
- 2 grandes techniques d'injection : Imprégnation / claquage
- Contrainte : ne pas dégrader les structures environnantes  
→ Eviter les claquages du terrain

## Technique d'injection par imprégnation

- Avantage : distribution plus uniforme des particules dans le sol que par claquage
- Technique issue des fondations spéciales
- Respect des règles d'injectabilité (Pression et débit)

$$P_{inj} \leq P_0 = \gamma h (1 + \sin \varphi) v$$

$$P \leq 1 \text{ bar / m}$$

$$Q_{lim} \leq \frac{2\pi \cdot K \cdot l \cdot \eta_o}{\varpi \cdot \eta_c \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \cdot \gamma \cdot h (1 + \sin \varphi) v$$

$$Q \leq 300 \text{ l/h pour } k < 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$Q \geq 600 \text{ l/h pour } k > 10^{-2} \text{ m/s}$$

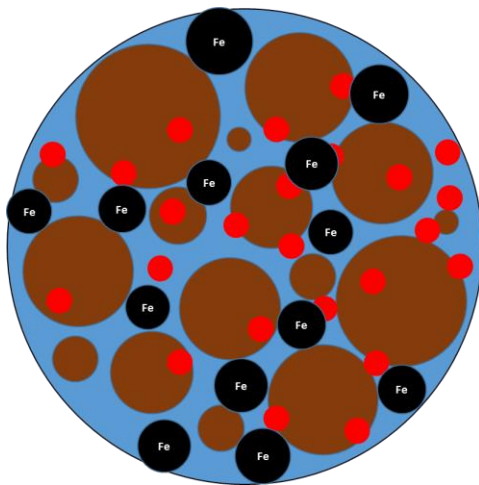


# Mise en œuvre d'une injection

## Traitement des zones sources : 2 grands objectifs

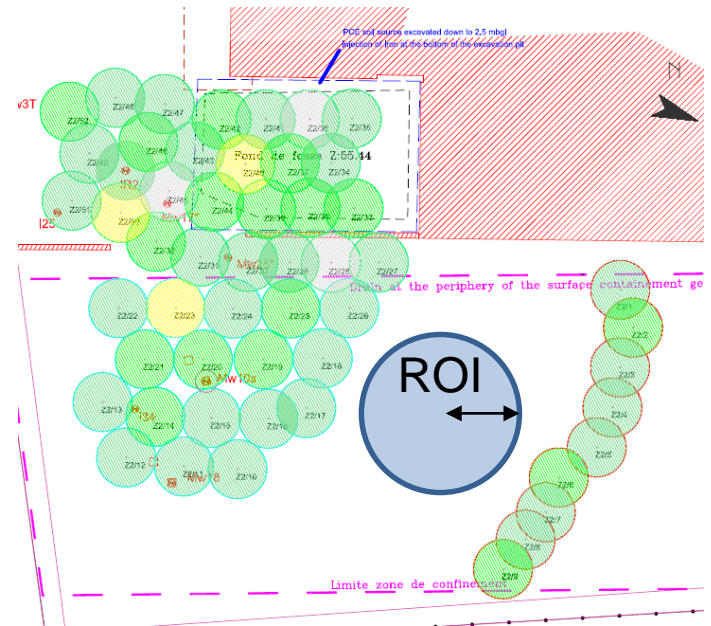
- Bonne distribution du fer dans le sol

→ *Efficacité du traitement*



- ROI le plus large possible

→ *Limiter les coûts de traitement*



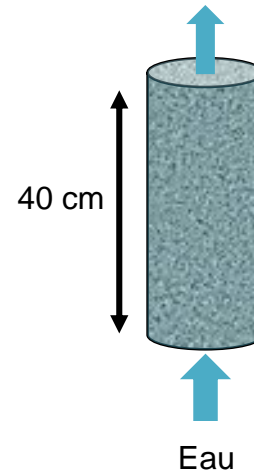
*Essais au laboratoire : atteindre les objectifs tout en respectant les règles d'injectabilité*



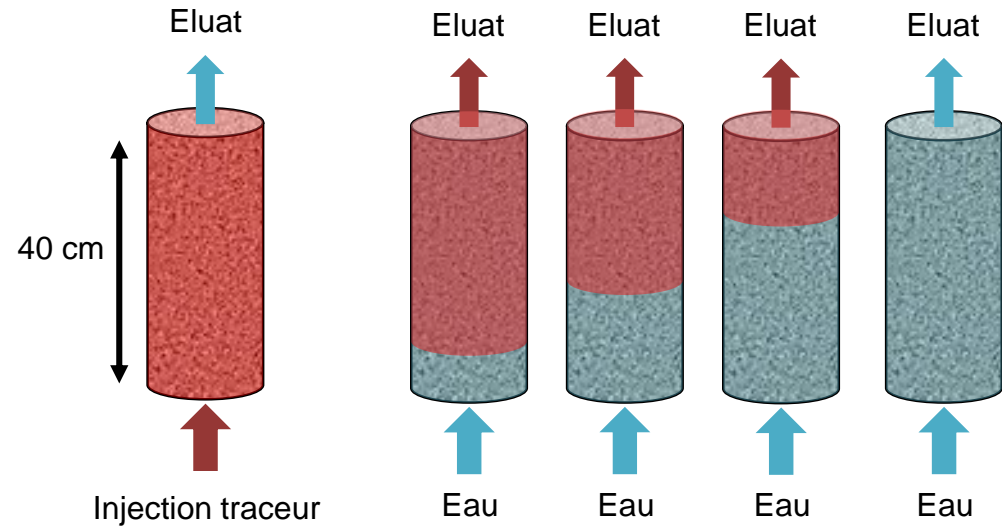
SOL environment



## Pilote et protocole opératoire



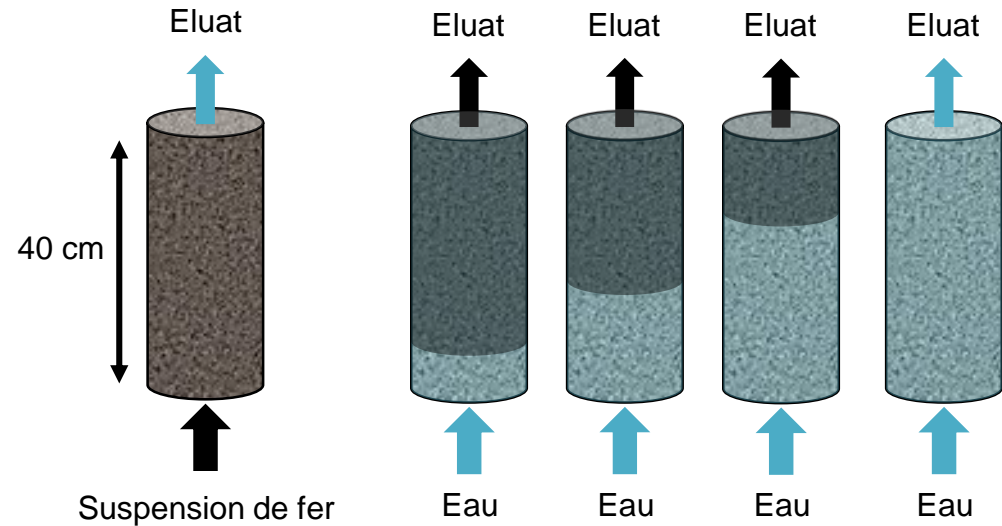
## Pilote et protocole opératoire



- Traceur = composé non retenu par le sol
- Injection du traceur puis rinçage
- Fractionnement de l'éluat tout au long de l'essai
- [Traceur] dans chaque fraction → Référence



## Pilote et protocole opératoire



- $[Fe_{tot}]$  dans chaque fraction  $\rightarrow$  % de fer en sortie de colonne / masse Fe injectée
- Découpe des colonnes (10 cm)  $\rightarrow$  Distribution Fe dans le sol
- Pression en entrée de colonne (Débit fixe)



## Injection de microparticules de Fe

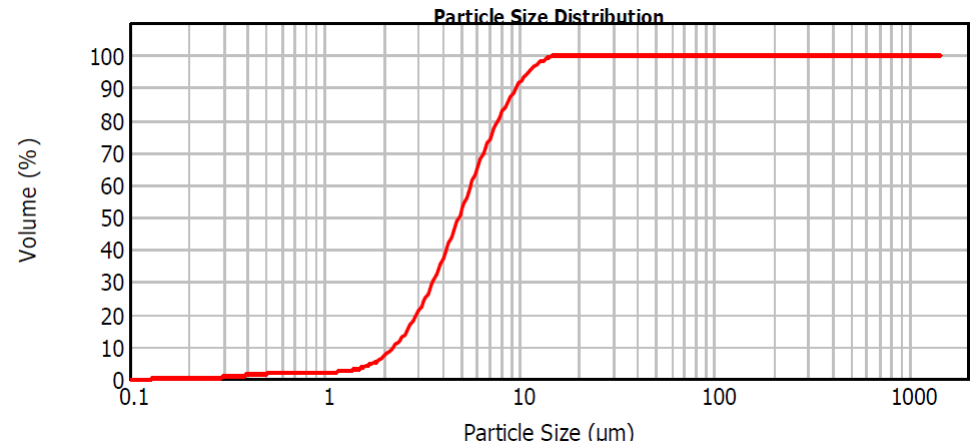
### Colonne

- Sol reconstitué avec sables et graviers
- $K = 10^{-4}$  m/s
- Porosité  $\approx 30\%$



### Suspension de fer

- Fer micrométrique
- Gamme de taille : 0,12 - 17  $\mu\text{m}$
- **C = 20 g/l**



### Paramètre d'injection

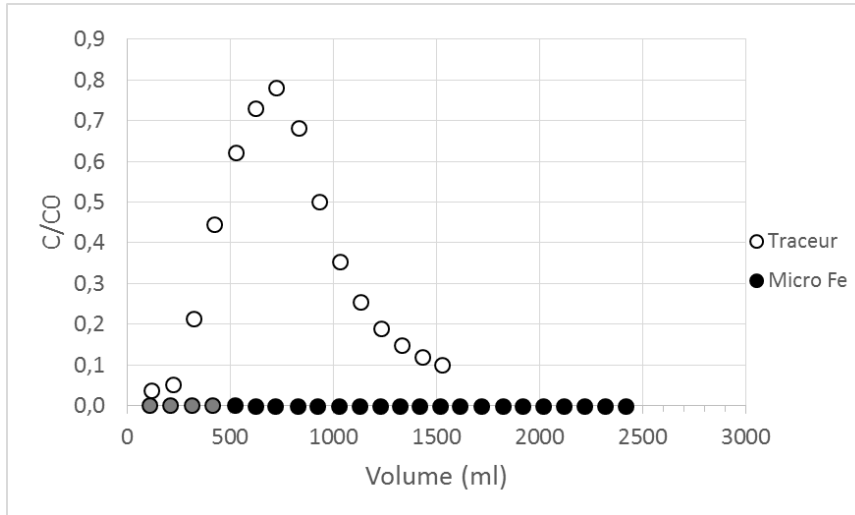
- Débit d'injection = 7,8 l/h



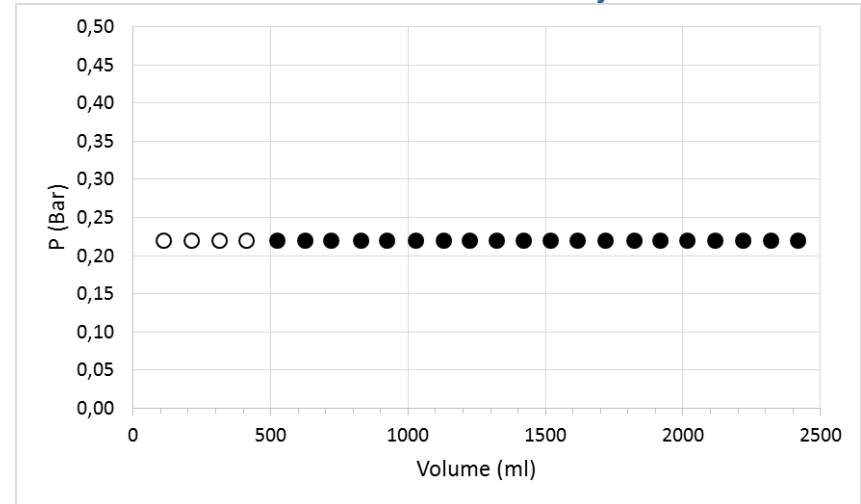


# Injection de Micro Fe

Courbe de percée - Fe micro



Pression au cours de l'injection

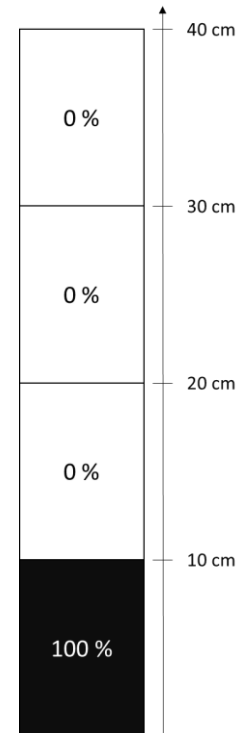
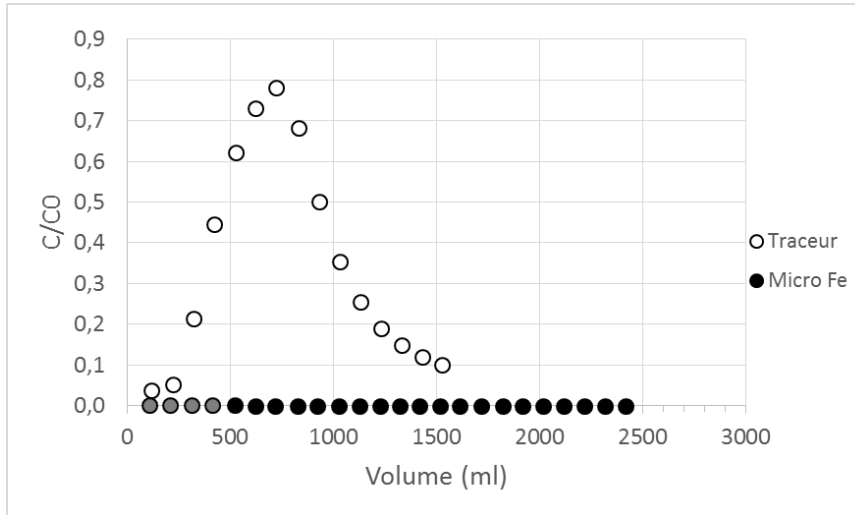


- % Fer en sortie de colonne < 0,01%
- Pression faible et constante durant l'injection



# Injection de Micro Fe

Courbe de percée - Fe micro



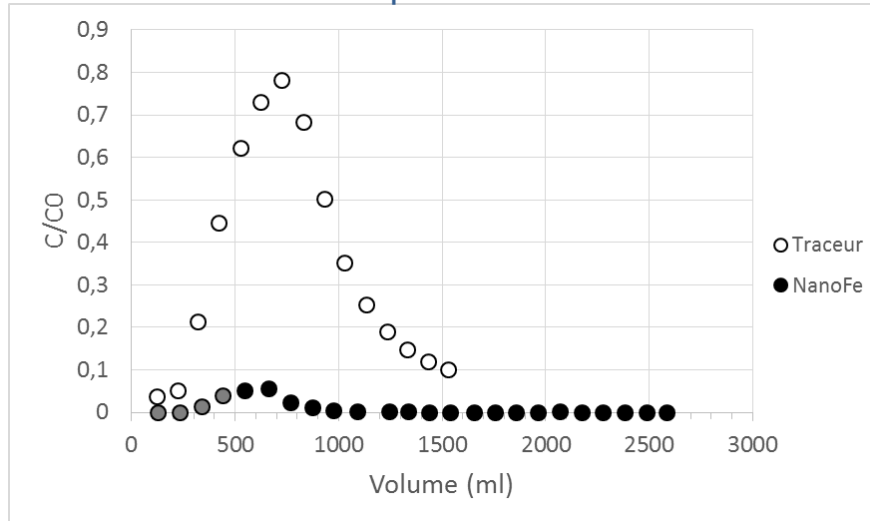
- % Fer en sortie de colonne < 0,01%
- Pression faible et constante durant l'injection
- Immobilisation des particules dans les premiers cm de la colonne

→ La pression n'est pas un bon indicateur de la migration des particules

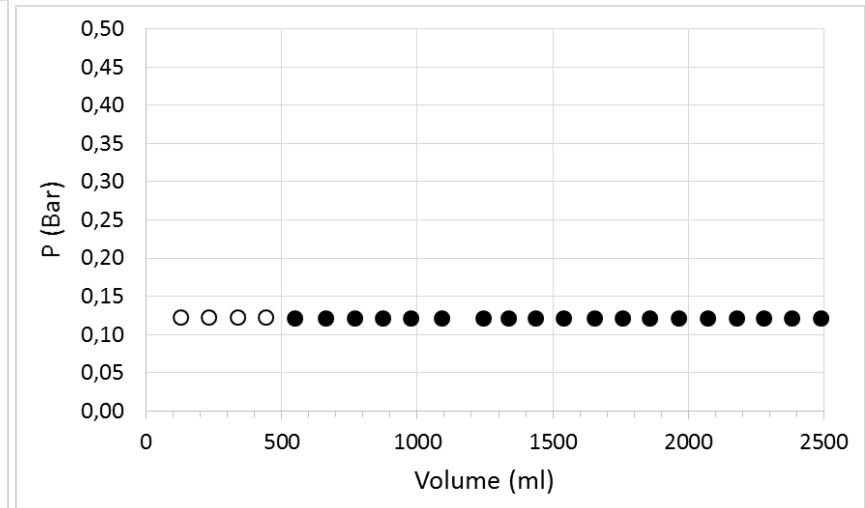


# Injection de Nano Fe

Courbe de percée – Fe nano



Pression au cours de l'injection

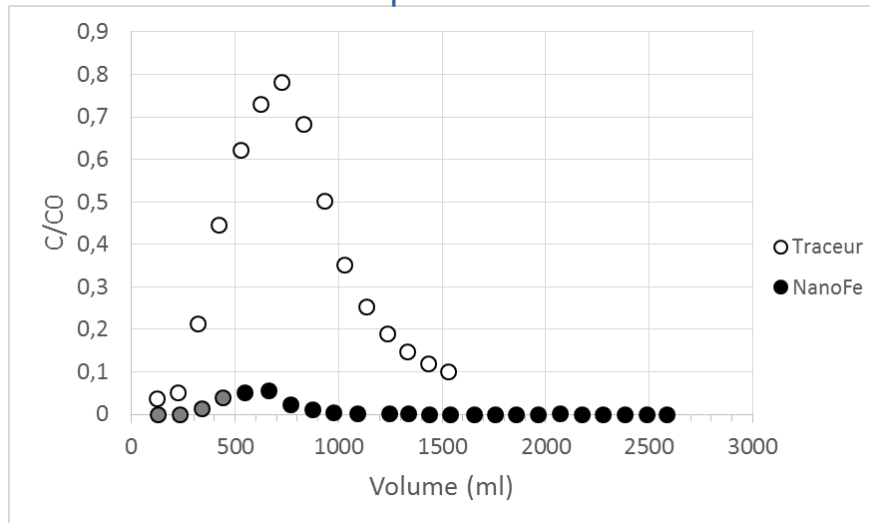


- % Fer en sortie de colonne = 4,6 %
- Pression constante ( $< P$  microFe)

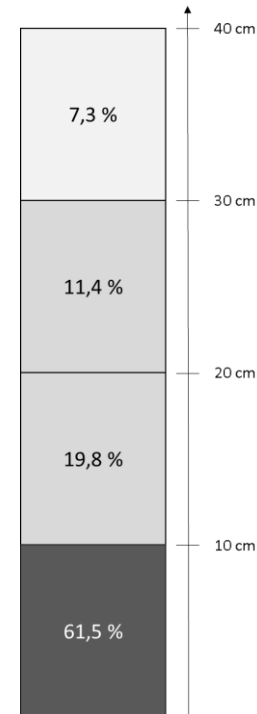


# Injection de Nano Fe

Courbe de percée – Fe nano



- % Fer en sortie de colonne = 4,6 %
- Pression constante (< P microFe)
- Migration des particules tout au long de la colonne
- Effet de concentration en entrée de colonne moins important



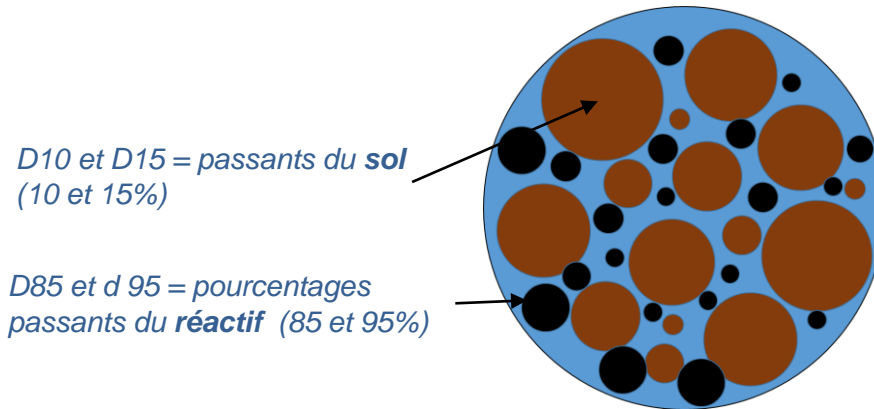
→ Effet de la taille des particules sur leur transport ?



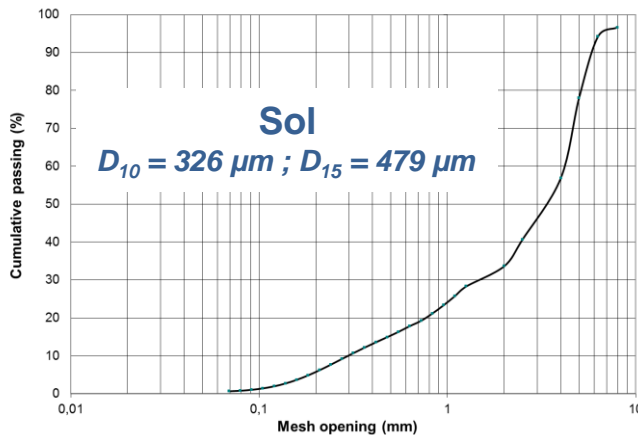
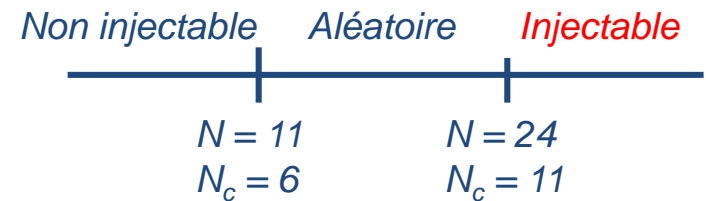


# Taille des particules

- Si la taille des particules de fer > taille des pores => phénomène de filtration
- Critères d'injectabilité basés sur des rapports de taille (réactif / sol)

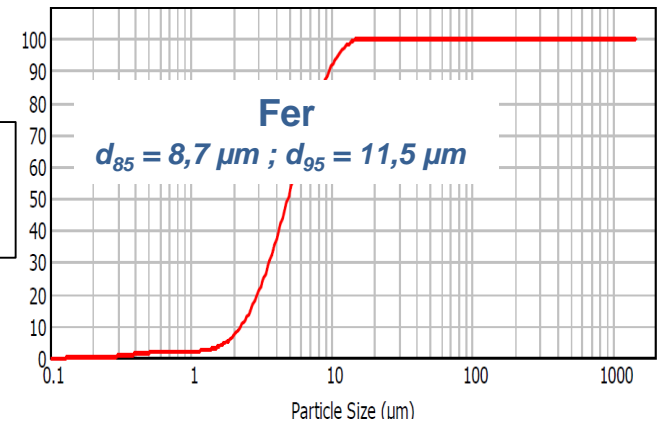


$$N = \frac{D_{15}}{d_{85}} \quad \text{ou} \quad N_c = \frac{D_{10}}{d_{95}}$$

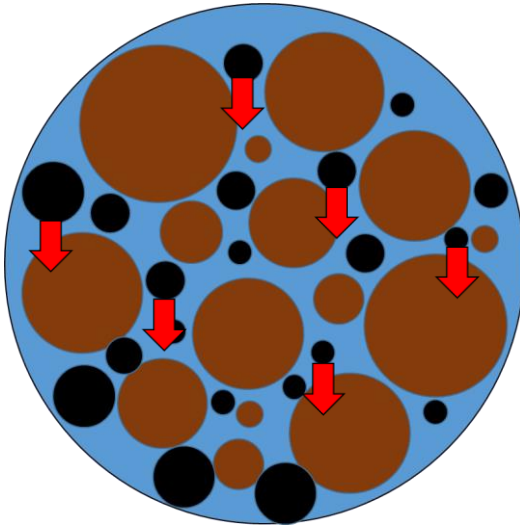


$$N = 55,1$$

$$N_c = 27,5$$



# Stabilité de la suspension

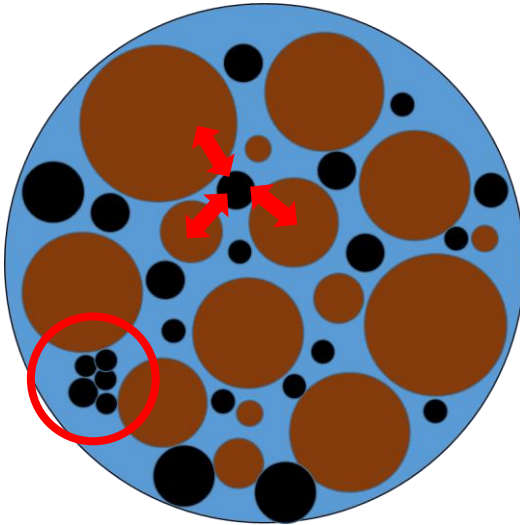


- $d_{Fe} = 7,87$

→ *Sédimentation dans le sol*



# Stabilité de la suspension



$$d_{Fe} = 7,87$$

→ **Sédimentation dans le sol**

Agglomération des particules

→ **Sédimentation + Filtration**

Interaction des particules avec la matrice sol

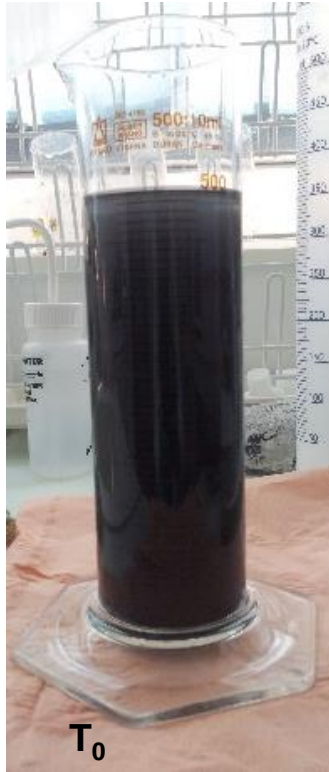
→ **Attachement**

Solution = Incorporer un adjuvant pour stabiliser les particules en suspension  
(cas de la suspension de nano Fe)



# Tests de sédimentation

## Microparticules de fer



## Microparticules de fer + polymère



- Sédimentation plus lente en présence de polymère
- Stabilisation des particules par augmentation de la viscosité

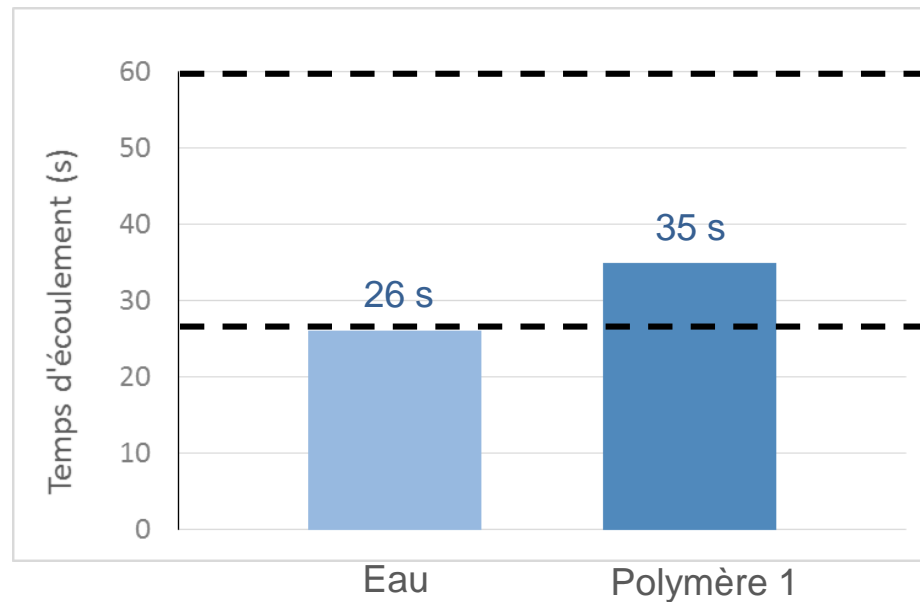




# Suspension Micro Fe / Polymère 1

## La suspension est-elle injectable ?

- Mesure au cône Marsh (viscosité apparente, mesure chantier)

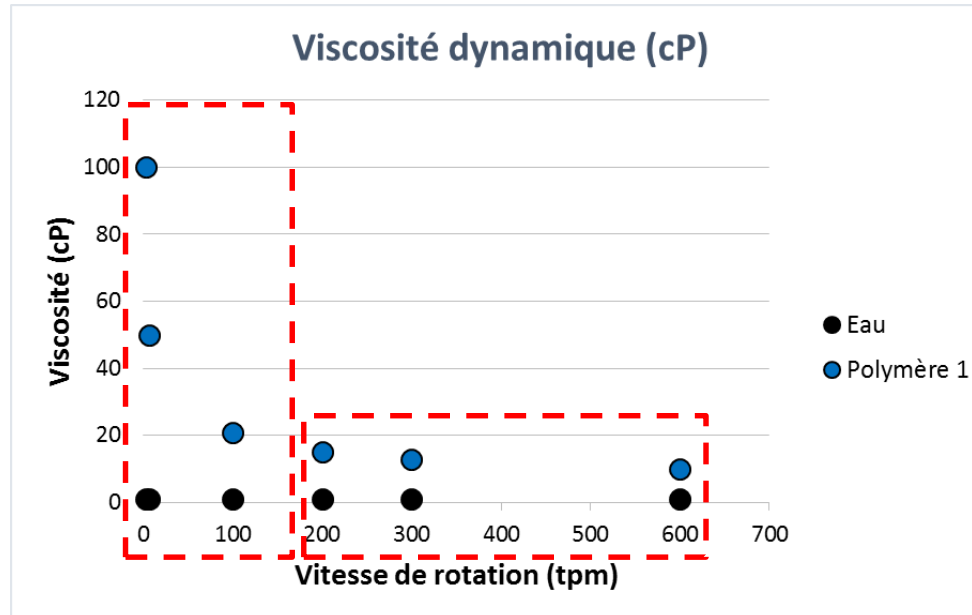


- Viscosité suspension > eau
- Ecoulement < 60 s → Fluide injectable
- Fluide de Bingham : variation de la viscosité en fonction de l'agitation



# Suspension Micro Fe / Polymère 1

## Effet de l'agitation sur la viscosité de la suspension ?

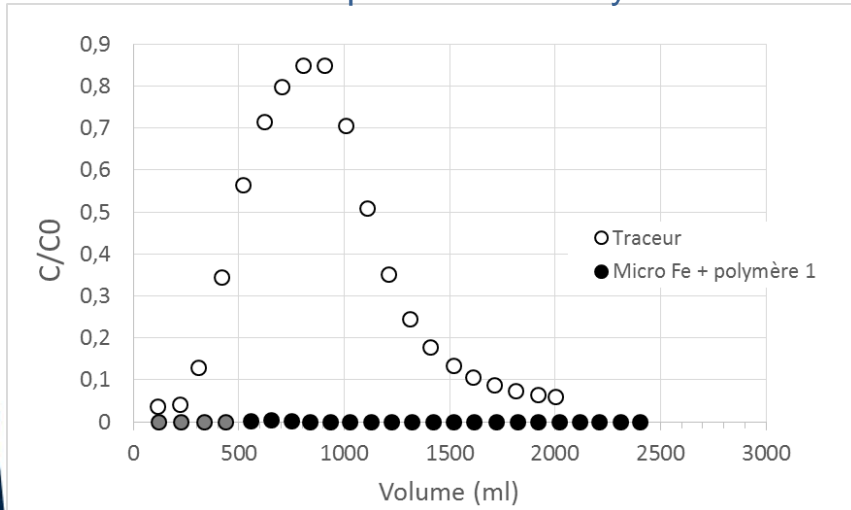


- Viscosité importante lorsque la suspension est au repos (stockage)
- Viscosité diminue lorsque l'agitation augmente (injection)

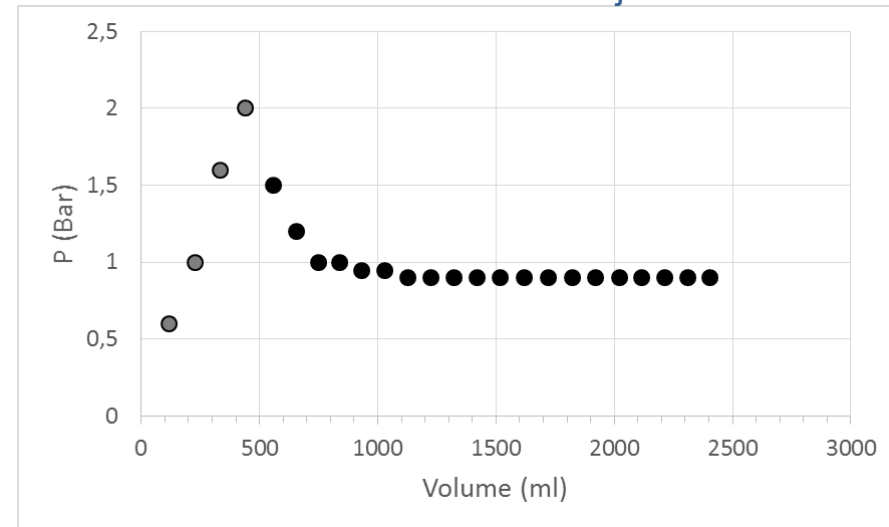


# Suspension Micro Fe / Polymère 1

Courbe de percée – Fe/Polymère 1



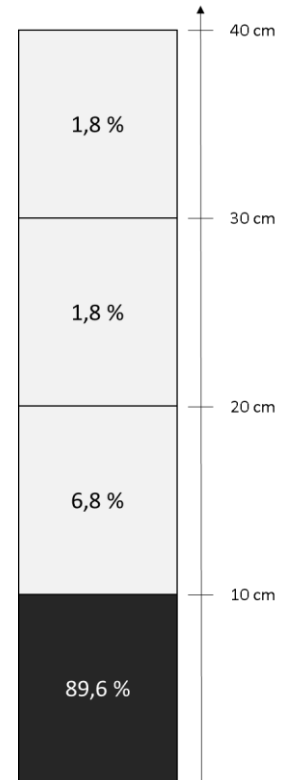
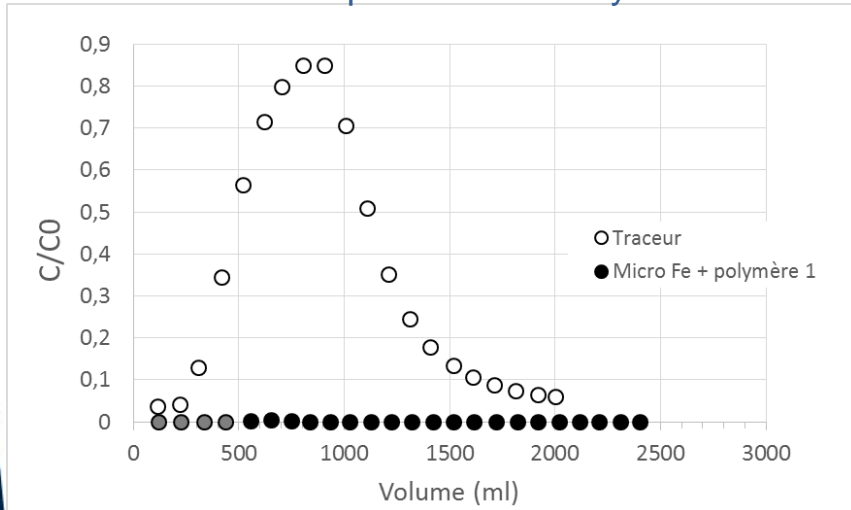
Pression au cours de l'injection



- % Fer en sortie de colonne = 0,2 %
- Augmentation de la pression → 5 Bar/m

# Suspension Micro Fe / Polymère 1

Courbe de percée – Fe/Polymère 1



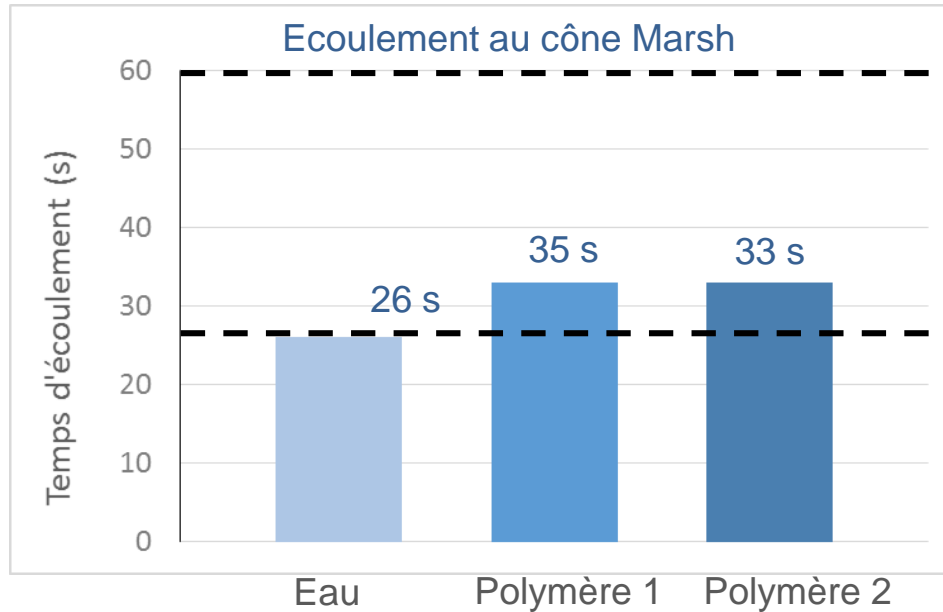
- % Fer en sortie de colonne = 0,2 %
- Augmentation de la pression → 5 Bar/m
- Augmentation de la distance de transport
- Concentration des particules dans les premiers 10 cm





# Suspension Micro Fe / Polymère 2

## La suspension est-elle injectable ?

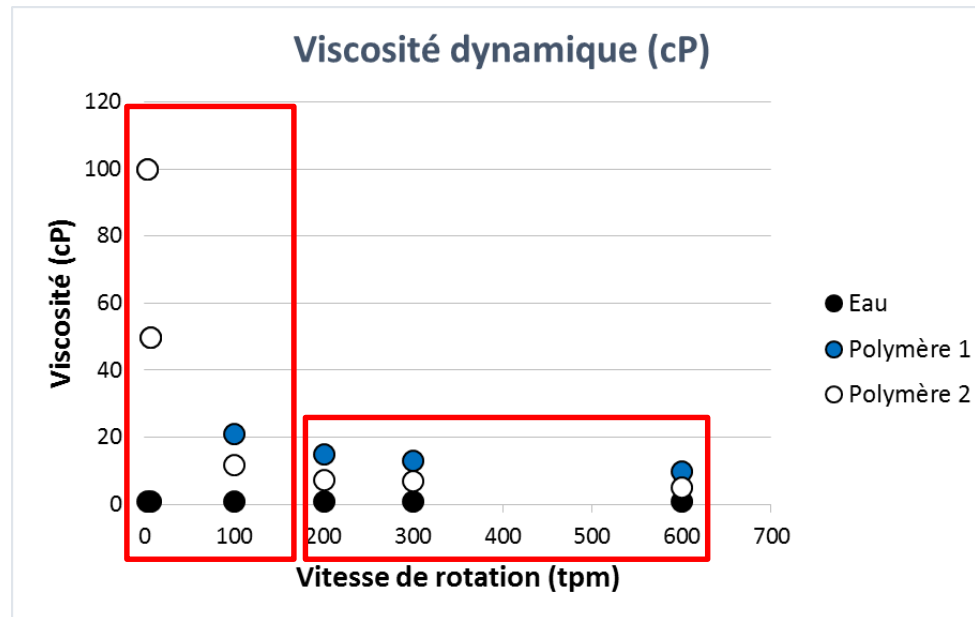


- Écoulement < 60 s → Fluide injectable
- Viscosité polymère 2 < viscosité polymère 1



# Suspension Micro Fe / Polymère 2

## Effet de l'agitation sur la viscosité de la suspension ?

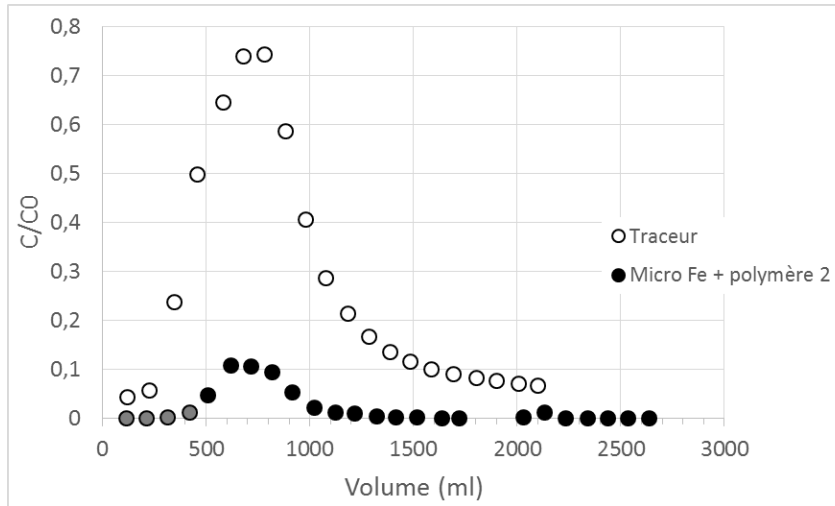


- Même comportement que le polymère 1
- Viscosité légèrement inférieure à polymère 1

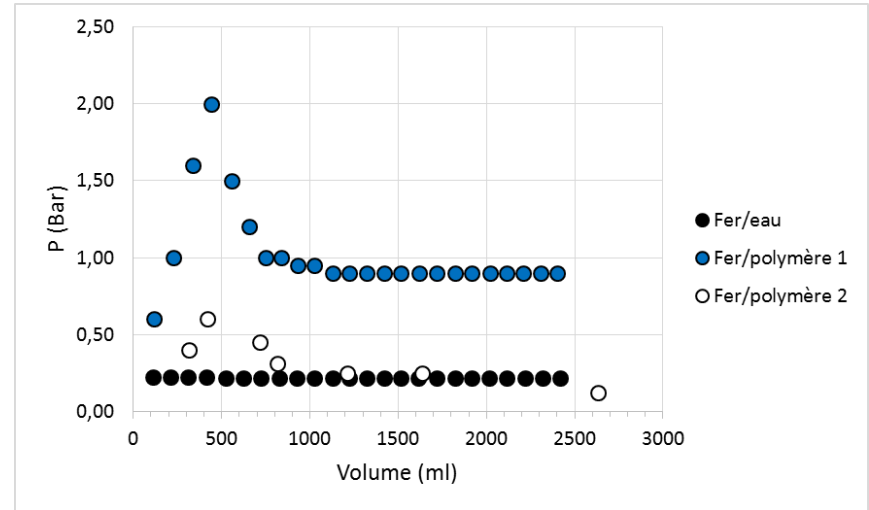


# Suspension Micro Fe / Polymère 2

Courbe de percée – Fe/polymère 2



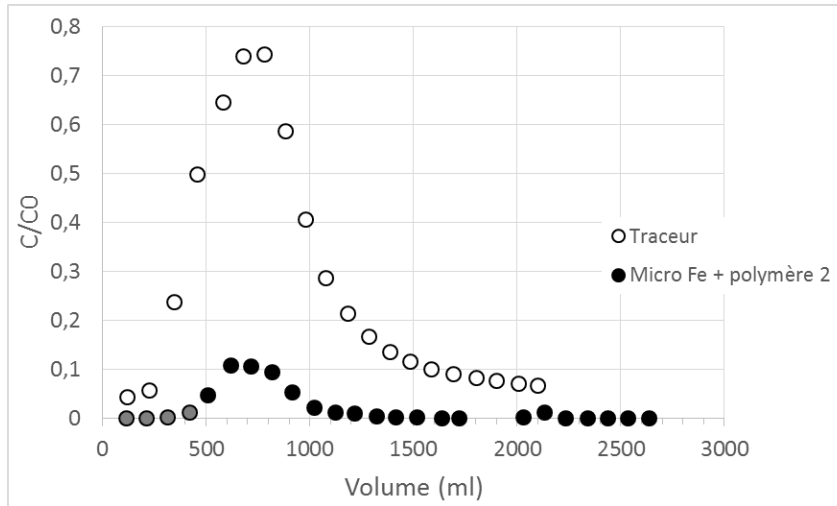
Pression au cours de l'injection



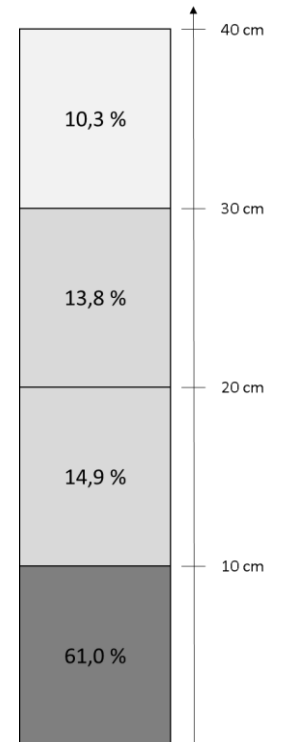
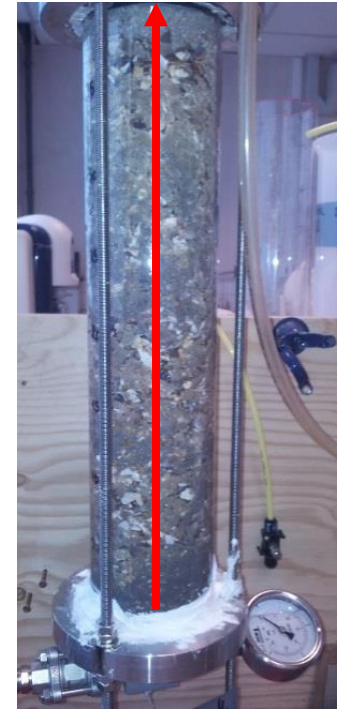
- % Fer en sortie de colonne = 10 %
- Augmentation de la pression  $\rightarrow$  1,5 Bar/m

# Suspension Micro Fe / Polymère 2

Courbe de percée – Fe/polymère 2



- % Fer en sortie de colonne = 10 %
- Augmentation de la pression  $\rightarrow$  1,5 Bar/m
- Distribution du fer dans le sol comparable aux nano Fe



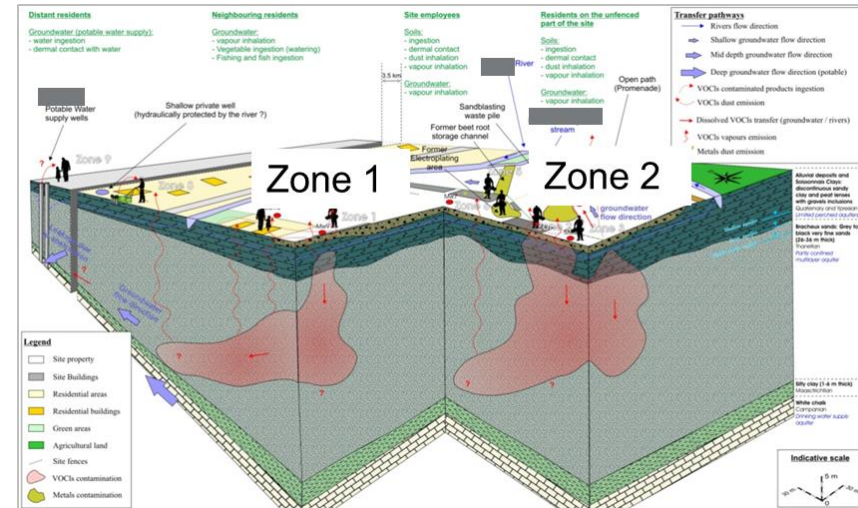
## Injectabilité de suspensions de particules de fer

- Injection de réactif solide par imprégnation → Règles d'injectabilité P/Q
- Immobilisation des particules de fer dans le sol
- Ajout d'un polymère pour améliorer la stabilité de la suspension
- Augmentation des distances de transport (comparable aux nano Fe)
- Privilégier l'utilisation de nano Fe pour les terrains peu perméables où les micro Fe ne sont pas injectables
- Augmentation de la pression



## Retour d'expérience

- 2 zones source de solvants chlorés
- Terrain sableux
- Fer micro avec matrice organique (EHC®)
- Injection par imprégnation jusqu'à -30 m
- Tubes à manchette, espacement de 3-4 m
- Injection simultanée sur 5-6 puits, tous les mètres (verticalement)
- Volume injecté par puit = 4-5 m<sup>3</sup> (400 m<sup>3</sup> au total)
- Débit moyen = 400 l/h
- Pressions max = 30 bar (1 bar/mètre)
- 70% abattement polluant en 4 mois





**Merci pour votre attention**



**SOL environment**

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

Tél : 01 47 76 55 90

[delphine.kaifas@solenvironment.com](mailto:delphine.kaifas@solenvironment.com)

06 77 03 36 22

