



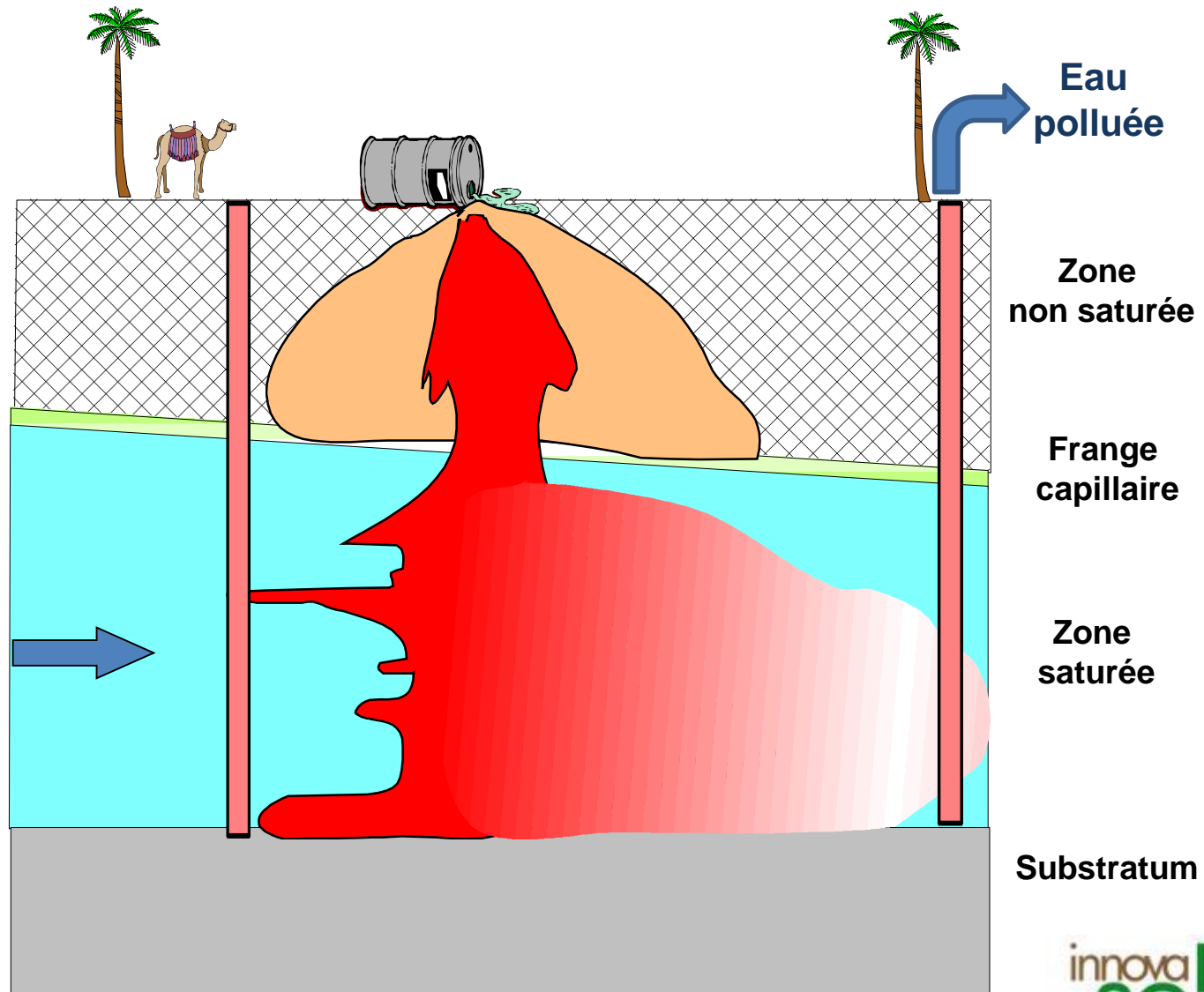
Redonnons au sol sa valeur

# Ecoulements de mousse pour la dépollution d'aquifères

Estefanía DEL CAMPO ESTRADA, Henri Bertin, Olivier Atteia

Séminaire Innovasol- Arcachon, 6 octobre 2015

# Contexte. Pollution des aquifères par des NAPLs



# Problématique. Dépollution et hétérogénéités

## Loi de Darcy

$$q = \frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{L}$$

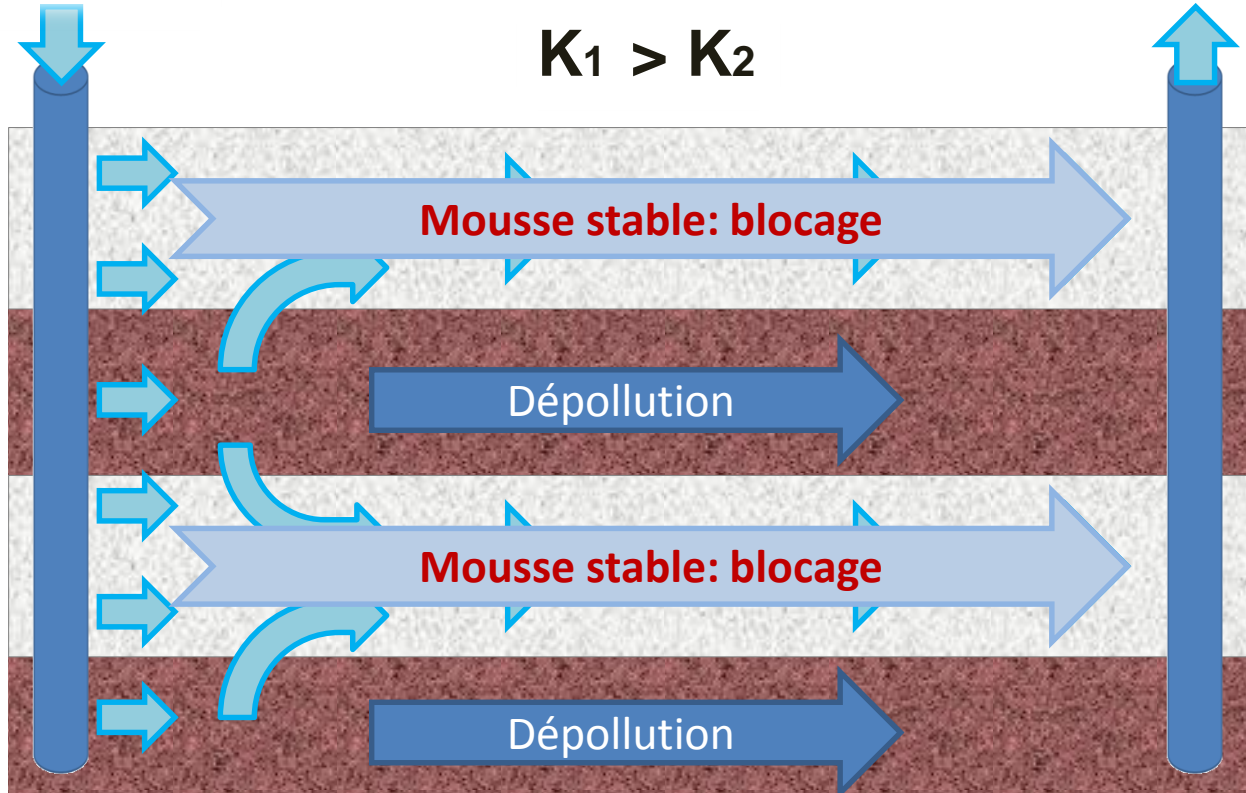
Écoulement préférentiel à travers les strates les plus perméables

Augmentation du coût du processus de remédiation

**Stratégie :**

**Blocage des couches perméables avec de la mousse**

Puits  
d'injection



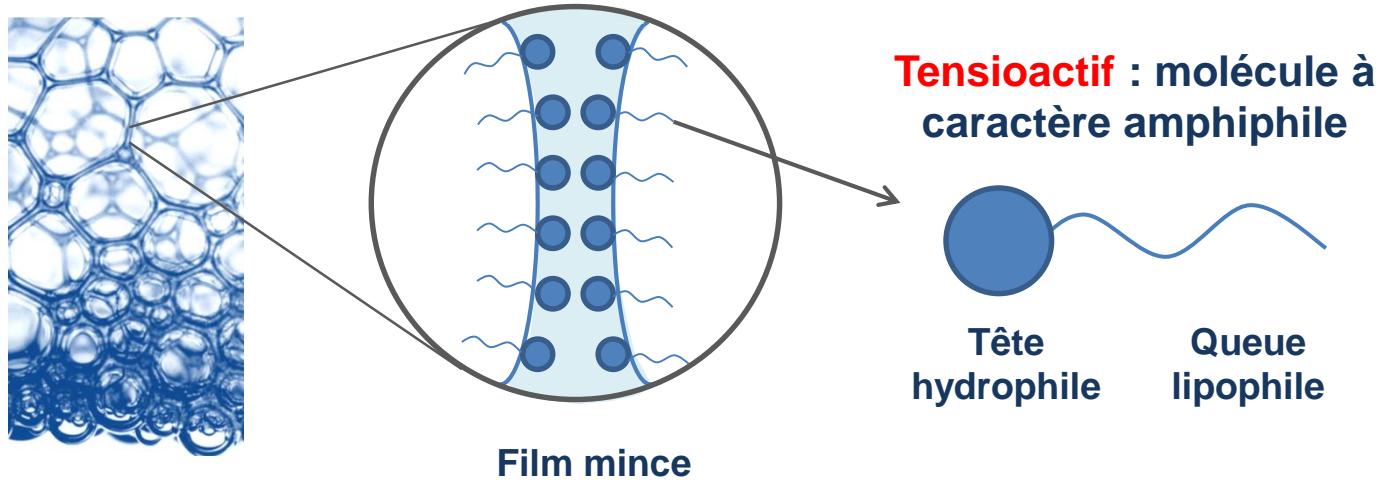
Puits  
d'extraction

# Démarche scientifique

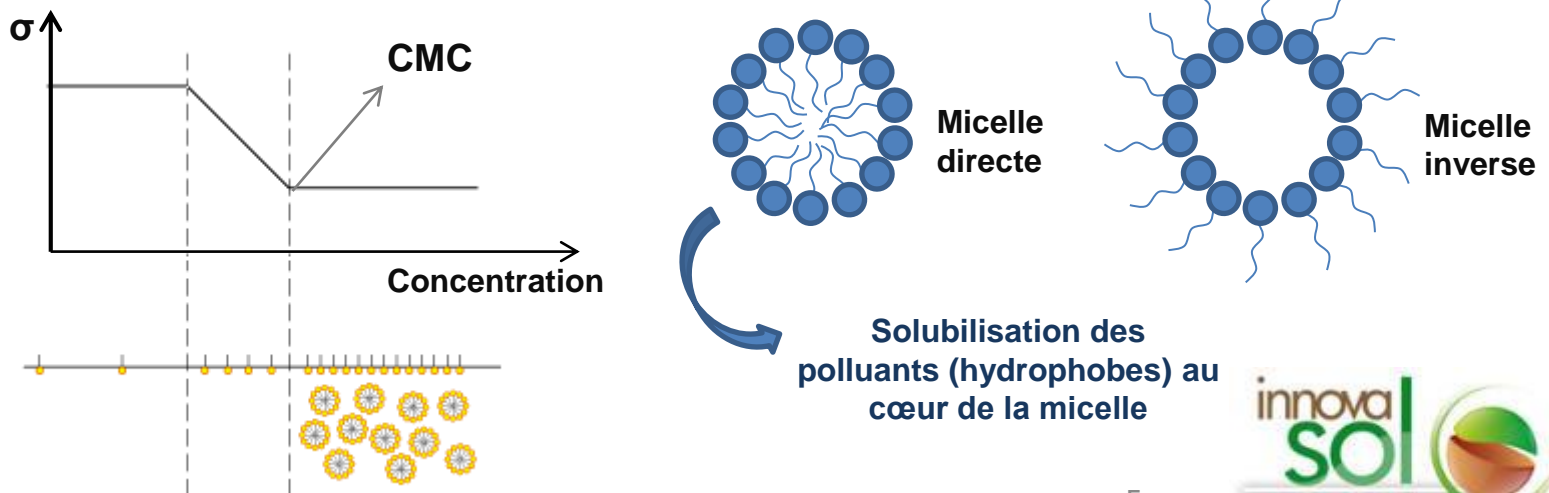


# Qu'est-ce que la mousse?

## Structure de la mousse :



## Propriétés des tensioactifs :

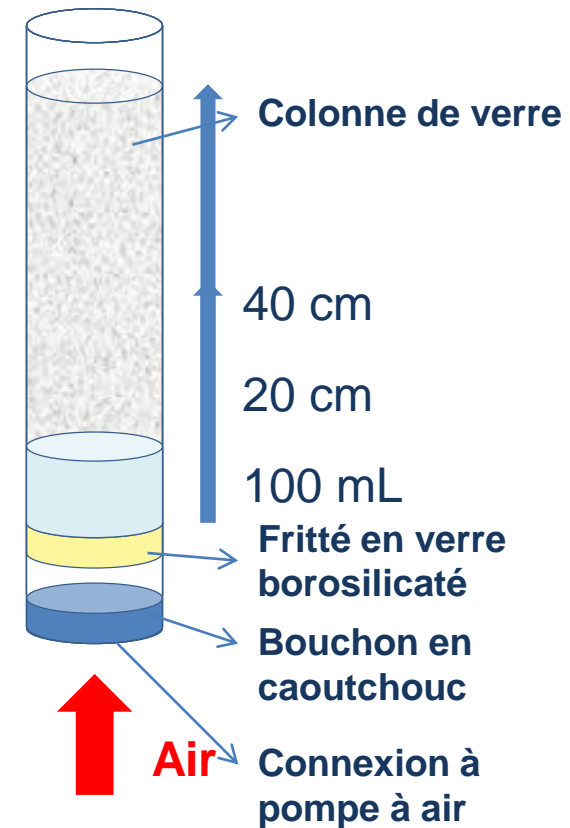


# Choix du tensioactif

## Les candidats : propriétés recherchées

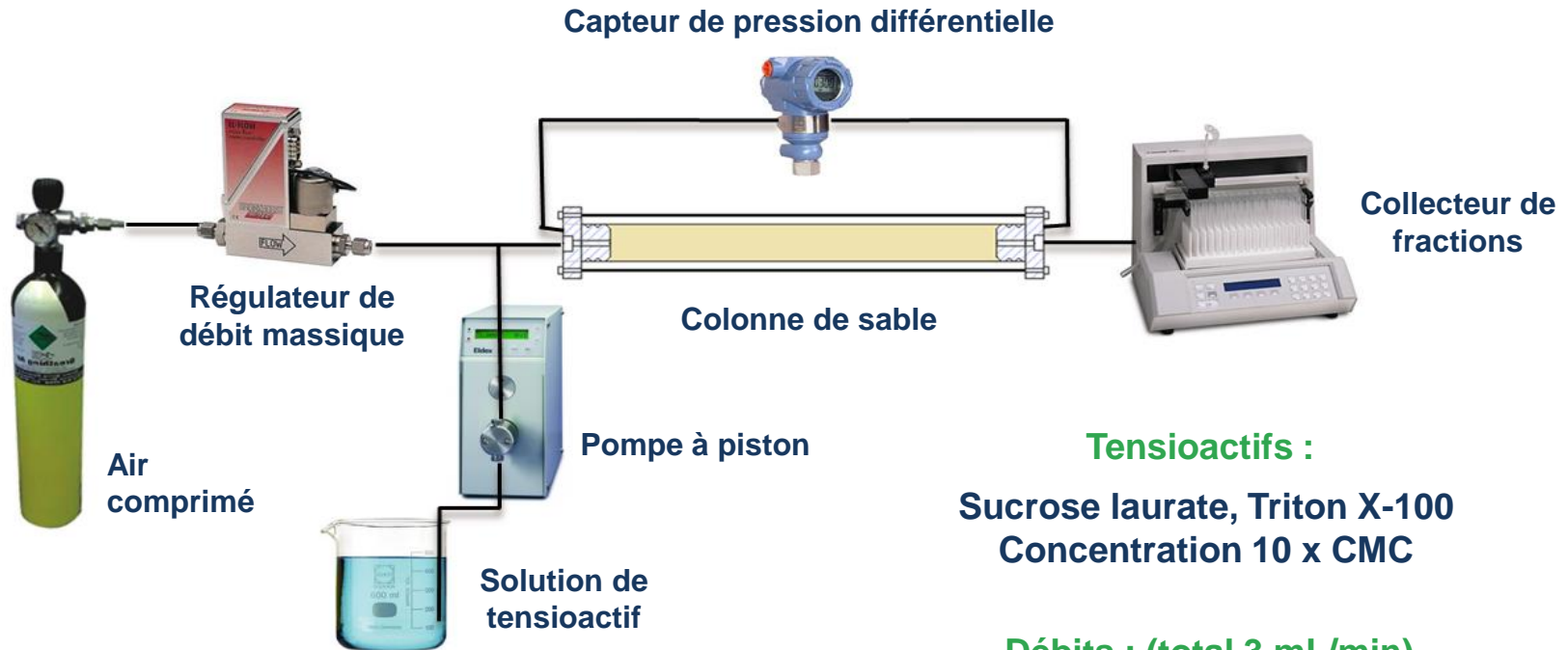
Bonne moussabilité, Faible toxicité, Fort taux de dégradation, Faible adsorption, Disponibilité à faible coût, Compatibilité avec les polluants

Triton X-100	Biotensioactifs : Rhamnolipides	Sucroesters : Sucrose Laurate
Tensioactif classique, utilisé comme modèle	Produites par des bactéries	Matière première : sucre
Toxique	Production coûteuse et limitée	Faible coût et grande disponibilité
CMC = 150 mg/L	CMC = 40 mg/L	CMC = 250 mg/L
$T_{1/2} < 30 \text{ min}$	$T_{1/2}$ entre 40 et 80 min	$T_{1/2} > 180 \text{ min}$



# Tests sur colonne 1-D

## Schéma du montage expérimental :



### Tensioactifs :

Sucrose laurate, Triton X-100  
Concentration 10 x CMC

### Débits : (total 3 mL/min)

$Q_{mousse}$ (%)	$Q_g$ (mL <sub>n</sub> /min)	$Q_w$ (mL/min)
85	2,55	0,45
95	2,85	0,15
99	2,97	0,03

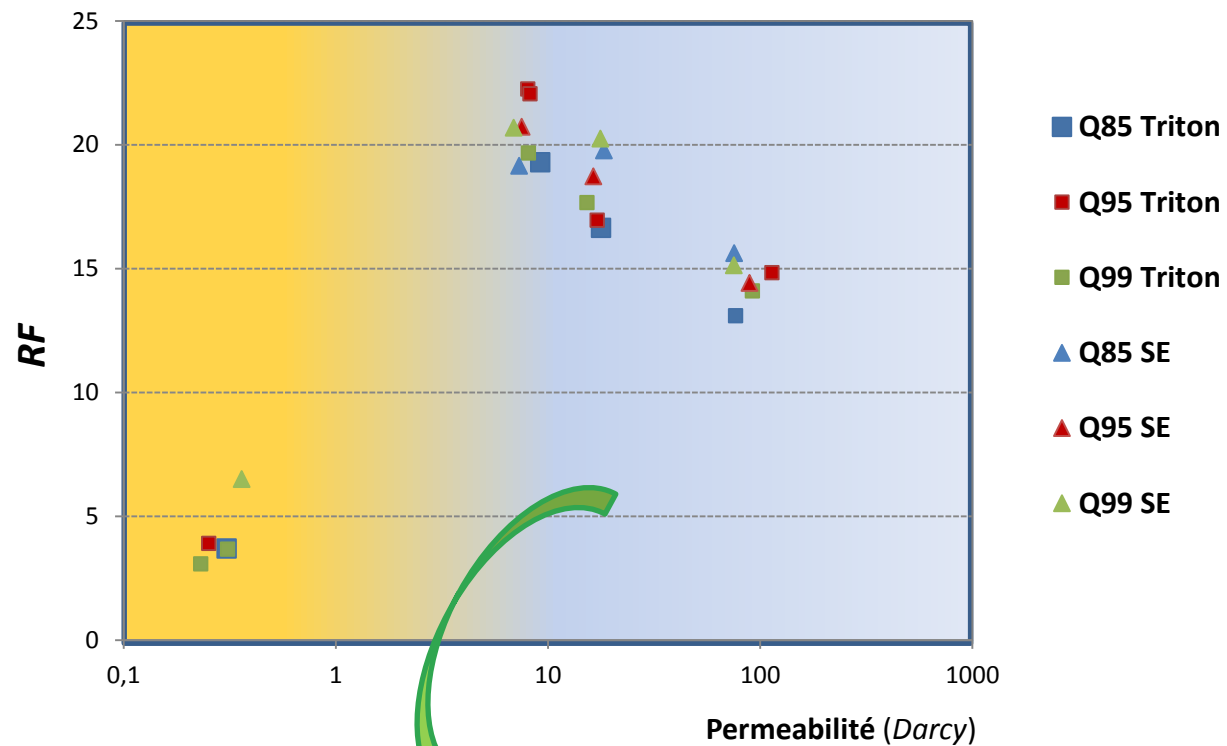
### Milieux poreux :

Type	Nom	$k$ (Darcy)
Billes de verre	Spheriglass 2000	$\approx 0,25$
Sable	BR37	$\approx 7$
Sable	NE34	$\approx 15$
Sable	MI 0.3/0.6	$\approx 75$

# Tests sur colonne 1-D

## Facteur de Resistance à la Mobilité RF :

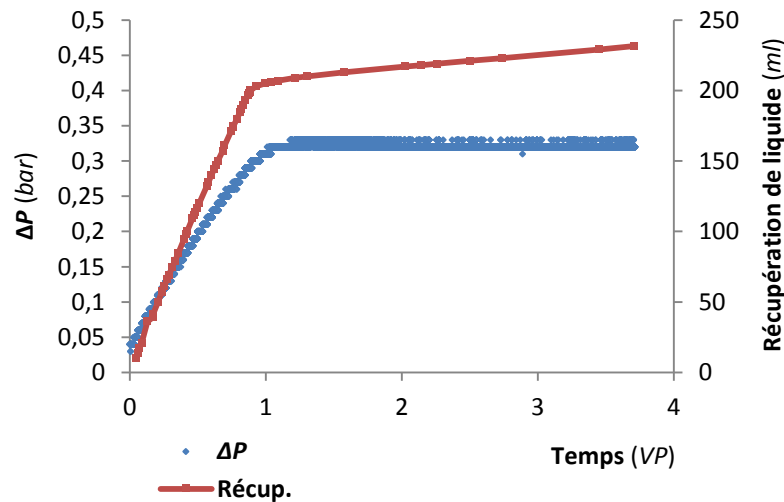
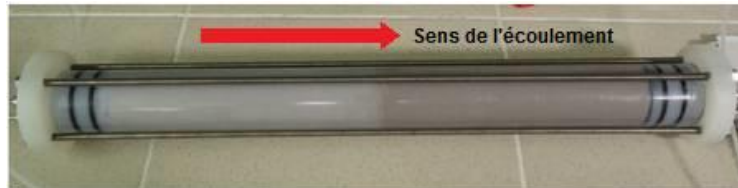
$$RF = \left[ \frac{\Delta P_{\text{tensioactif-gaz}}}{\Delta P_{\text{eau}}} \right]_{\text{pour le même débit}}$$



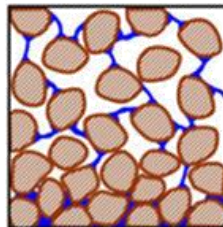
*Deux régimes*

# Tests sur colonne 1-D : Interprétation

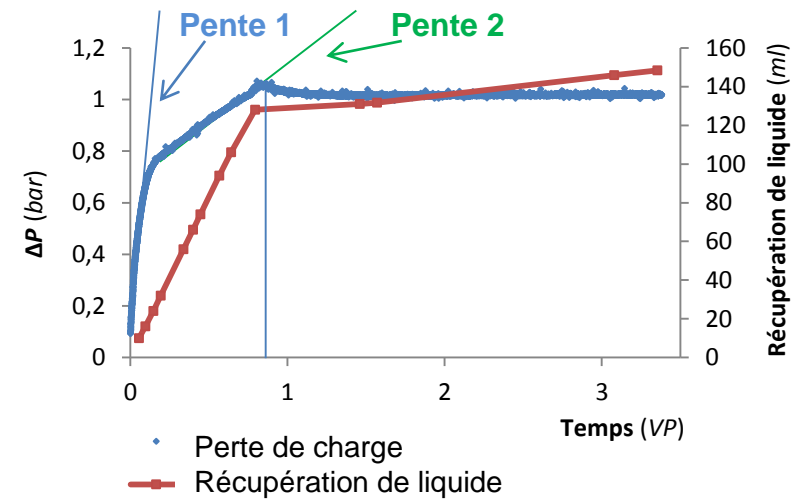
## Expériences à forte $k$



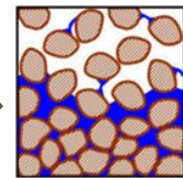
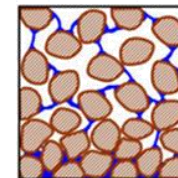
**Strong foam**



## Expériences à faible $k$

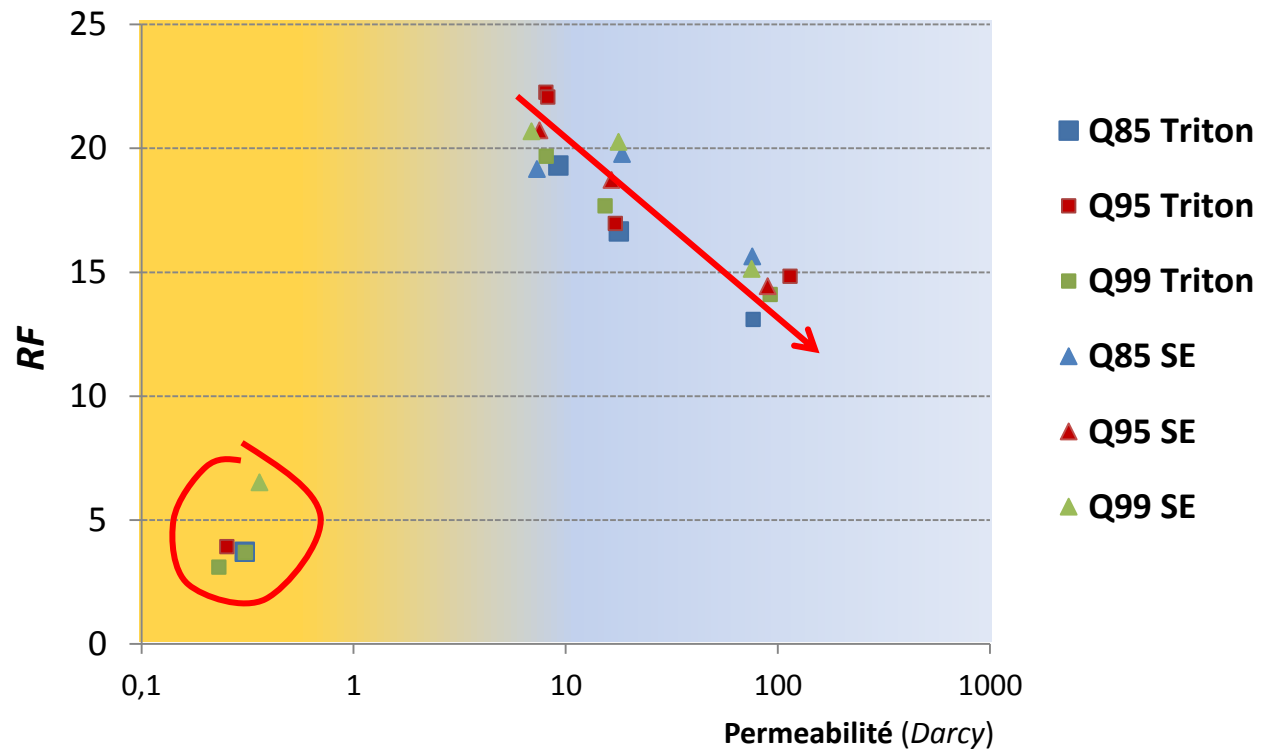


**Strong foam**



**Weak foam**

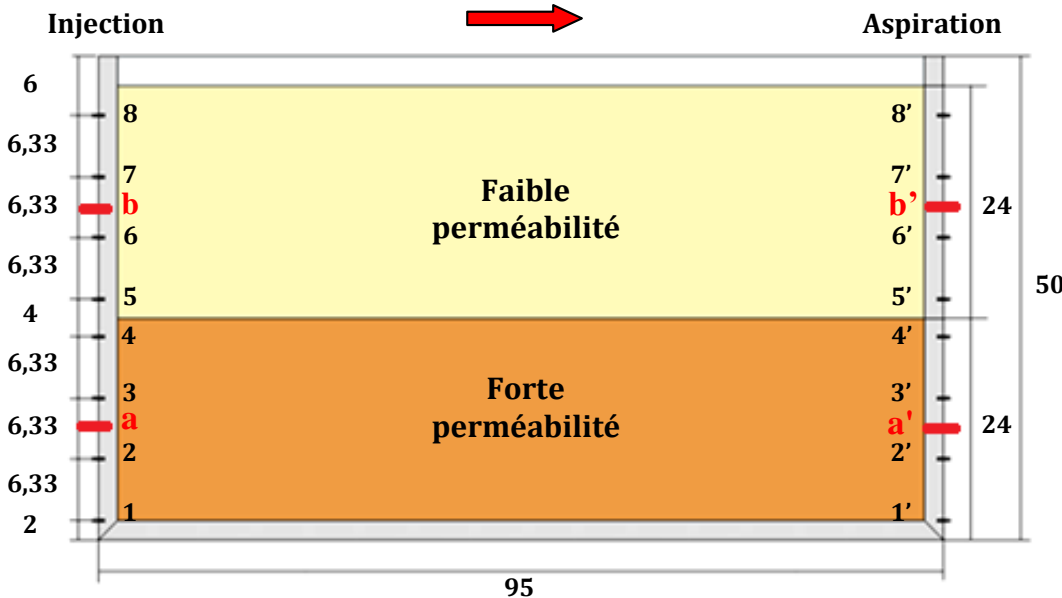
# Tests sur colonne 1-D



**Type de tensioactif et qualité de la mousse : pas d'influence sur RF**  
**Réduction de perméabilité jusqu'à 20 fois**  
**Augmentation de la perméabilité : effet déstabilisant des films**

# Tests sur pilote 2-D hétérogène

## Description du montage expérimental



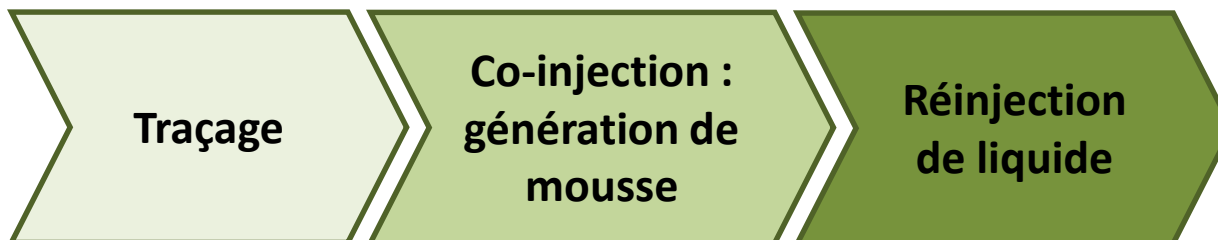
**Milieu à faible  $k$**   
(sable  $\approx 8$  Darcy sur colonne)

- Dimensions: 24 x 95 x 2 cm<sup>3</sup> (4560 cm<sup>3</sup>)
- Porosité: 35,17 %

**Milieu à forte  $k$**   
(sable  $\approx 80$  Darcy sur colonne)

- Dimensions: 24 x 95 x 2 cm<sup>3</sup> (4560 cm<sup>3</sup>)
- Porosité : 32,86 %

## Protocole: Stratégie de dépollution

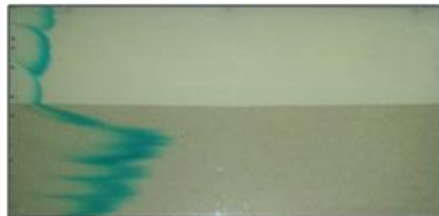


# Tests sur pilote 2-D hétérogène

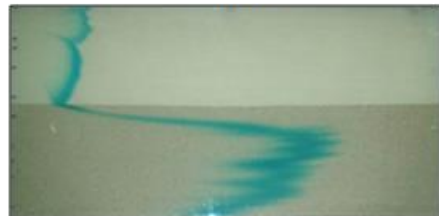
## 1. Traçage



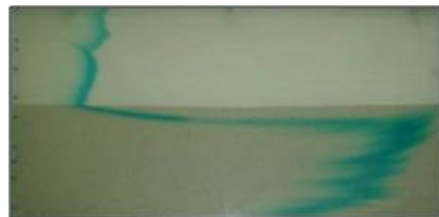
T = 0 min



T = 32 min



T = 91 min

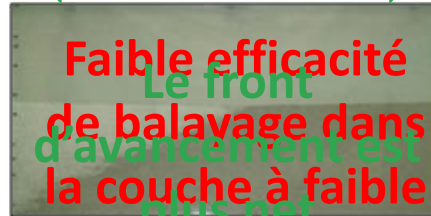


T = 127 min

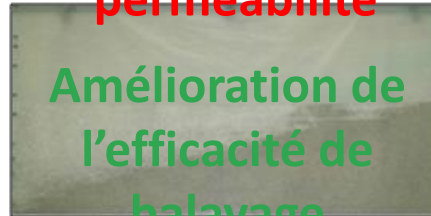
## 2. Co-injection



T = 0 min



T = 12 min



T = 38 min

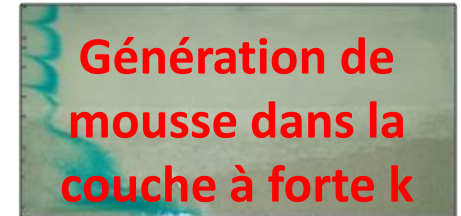


T = 139 min

## 3. Réinjection liquide



T = 0 min



T = 29 min



T = 56 min



T = 109 min

Faible efficacité  
de balayage dans  
la couche à faible  
perméabilité

Amélioration de  
l'efficacité de  
balayage

Génération de  
mousse dans la  
couche à forte k

Effet gravitaire  
(forme triangulaire)

# Tests sur pilote 2-D hétérogène : modélisation MODFLOW

## Modélisation du traçage: calage de la perméabilité

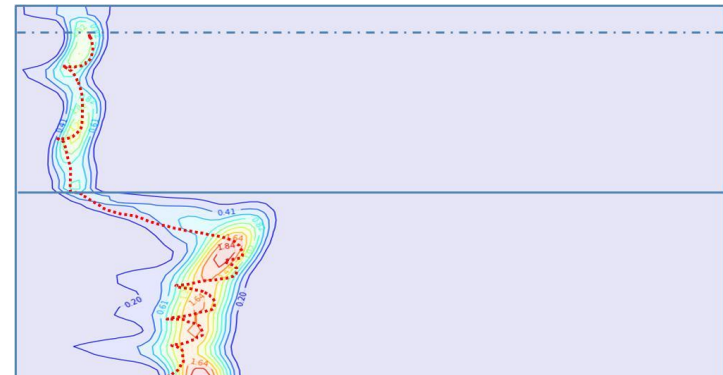
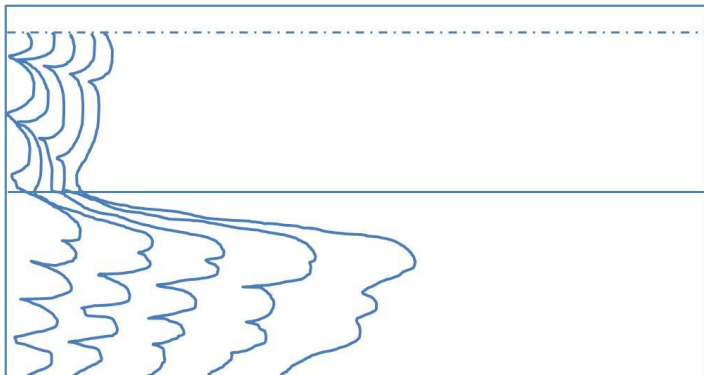
### Données :

- Porosité  
(1 → 0,35 et 2 → 0,33)
- Pertes de charge :  
(5,4 cmH<sub>2</sub>O couche à faible  $k$ )  
(2,8 cmH<sub>2</sub>O couche à forte  $k$ )
- Débit (11,6 ml/min)
- Fronts d'avancement en  
fonction du temps



$k_1 = 13,31$  Darcy  
( $K_1 = 0,8$  cm/min)

$k_2 = 61,6$  Darcy  
( $K_2 = 3,7$  cm/min)



# Tests sur pilote 2-D hétérogène : modélisation

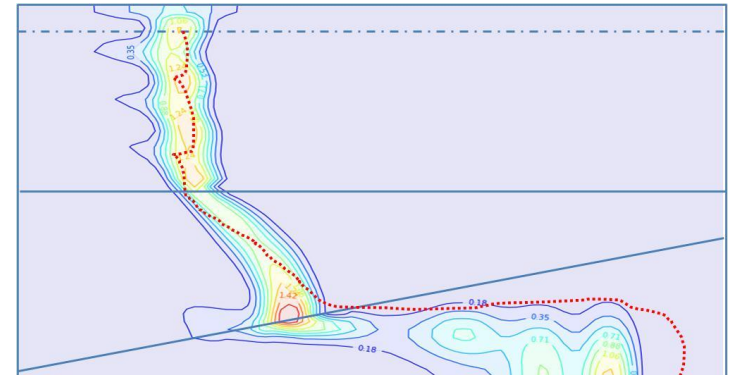
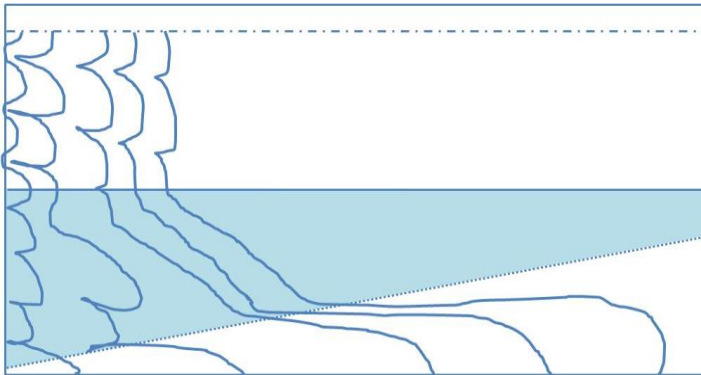
## Réinjection de liquide : estimation de RF

### Théorie :

- La présence de mousse modifie la saturation en eau ( $S_w$ )
- La mousse ne change pas la courbe  $k_{rw}(S_w)$

### Pour modéliser:

- Zone « *mousse* »  
porosité =  $S_w \times \text{porosité}$
- $S_w$  dans zone mousse  $\approx 0,3$
- On ajuste la perméabilité



### Meilleur calage :

- Porosité = 0,1
- $k = 5,82$  Darcy

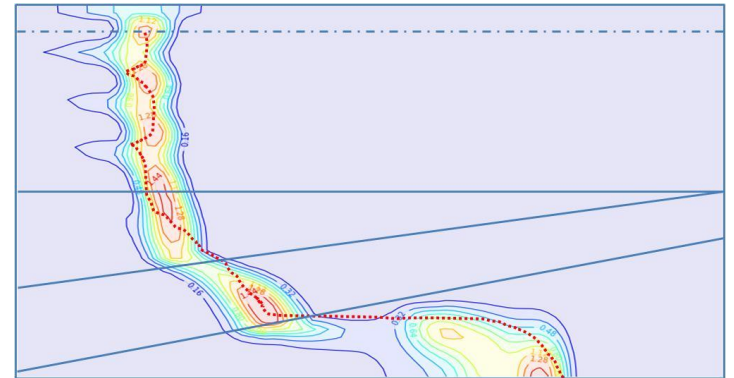
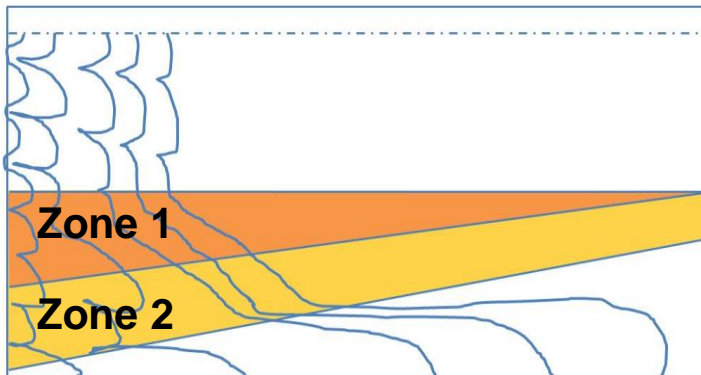


**Hypothèse:**  
**Zone mousse**  
**hétérogène**

# Tests sur pilote 2-D hétérogène : modélisation

## Réinjection de liquide : estimation de RF

### DEUX ZONES MOUSSE



**Meilleur calage  
pour les  
zones mousse:**

**ZONE 1 (en haut)**

- Porosité = 0,1
- $k = 4,16$  Darcy

**ZONE 2 (en bas)**

- Porosité = 0,1
- $k = 10$  Darcy

**« RF »**

**Zone 1  $\approx 15$**

**Zone 2  $\approx 6$**

# Conclusions

## Le choix du tensioactif :

- Les sucroesters produisent une mousse très stable hors milieu poreux
- Pas toxiques, biodégradables et économiques
- Importance du choix selon minéralogie du sol et type de polluant

## La génération de *mousse in situ* :

- Effet de la perméabilité du milieu poreux : deux régimes
- Valeur de RF: Indicateur de la présence de « *strong foam* » ou « *weak foam* »
- Type de tensioactif et qualité de la mousse : peu d'influence sur RF

## L'application de la technique (tests sur pilote 2D) :

- Génération de mousse maîtrisée dans des milieux stratifiés
- Blocage de la couche la plus perméable : effet gravitaire
- Réduction de la perméabilité : ralentissement de l'écoulement du liquide
- Amélioration de l'efficacité de balayage dans la couche à faible k
- Application dans la grande échelle : ségrégation gravitaire ?  
type et structure du milieu poreux?

The background is a complex, abstract pattern. It features a dense field of irregular, cell-like shapes in various sizes, each filled with a mix of vibrant colors including red, orange, yellow, green, and blue. These shapes are separated by thin, light-colored lines, creating a honeycomb-like structure. In the upper right corner, there is a distinct area with a dark, grainy, and textured appearance, possibly representing a different material or a shadow. The overall effect is one of organic complexity and vibrant color.

**MERCI DE VOTRE  
ATTENTION**