

# Transfert et transport colloïdal de polluants métalliques

Applications en assainissement routier

**Bertrand DURIN**

Division Eau & Environnement  
Laboratoire central des ponts et chaussées

École des mines de Nantes  
UMR CNRS 6144 GÉPEA

**Bouguenais, 2 juin 2006**

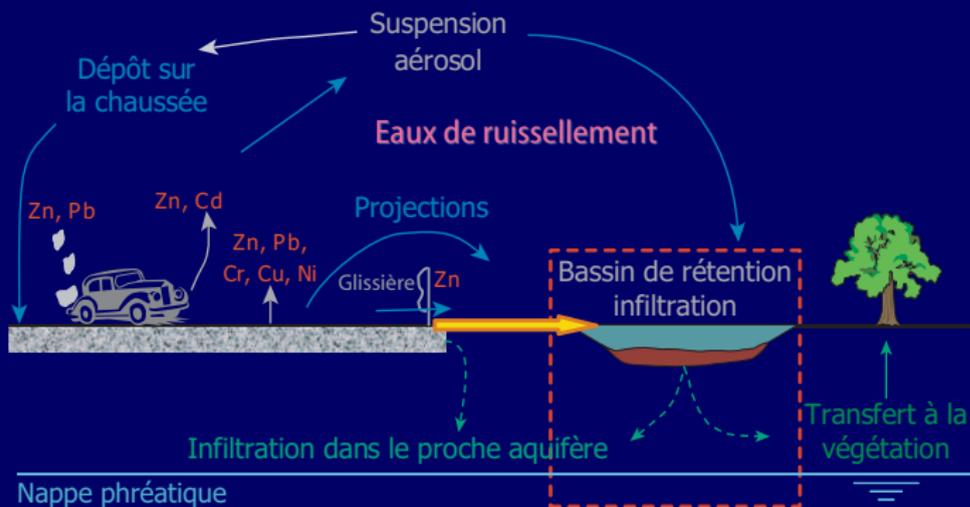
# Plan de l'exposé

- 1 Position de l'étude
  - Contexte
  - Enjeux
- 2 Ouvrage
  - Site et méthodes
  - Résultats
- 3 Simulateur
  - Appareil et expériences
  - Résultats
- 4 Particule
  - Méthodologie
  - Résultats

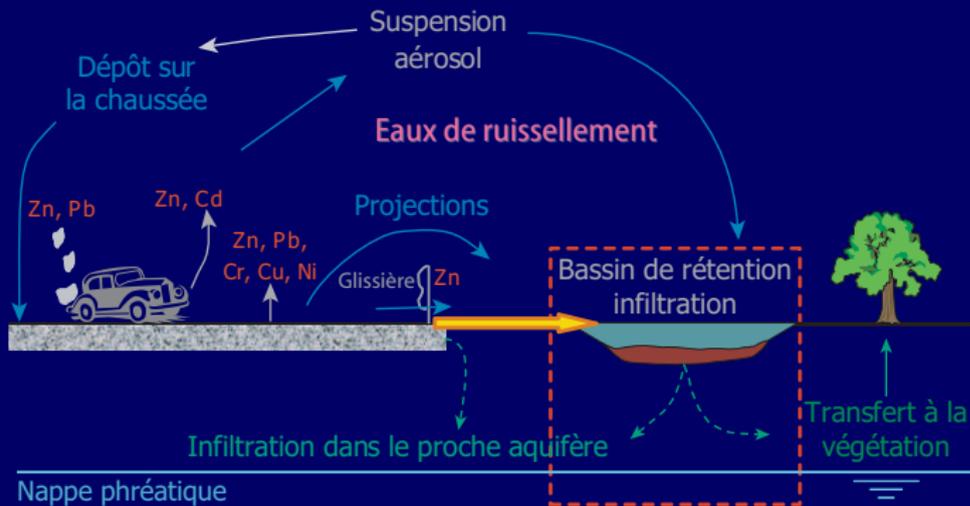
# Sommaire

- 1 Position de l'étude
  - Contexte
  - Enjeux
- 2 Ouvrage
  - Site et méthodes
  - Résultats
- 3 Simulateur
  - Appareil et expériences
  - Résultats
- 4 Particule
  - Méthodologie
  - Résultats

# Spécificité de la pollution en milieu routier



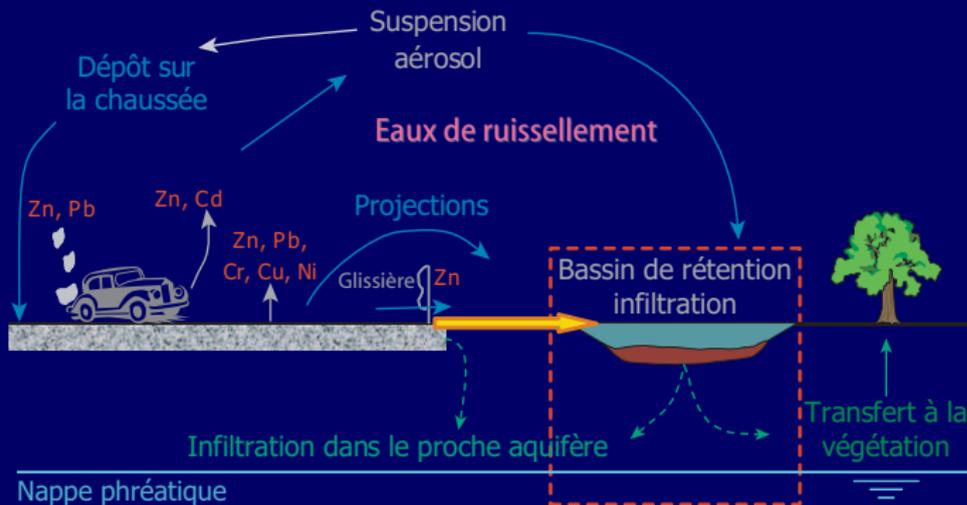
# Spécificité de la pollution en milieu routier



## Sources multiples

- véhicules
- chaussées
- exogènes

# Spécificité de la pollution en milieu routier



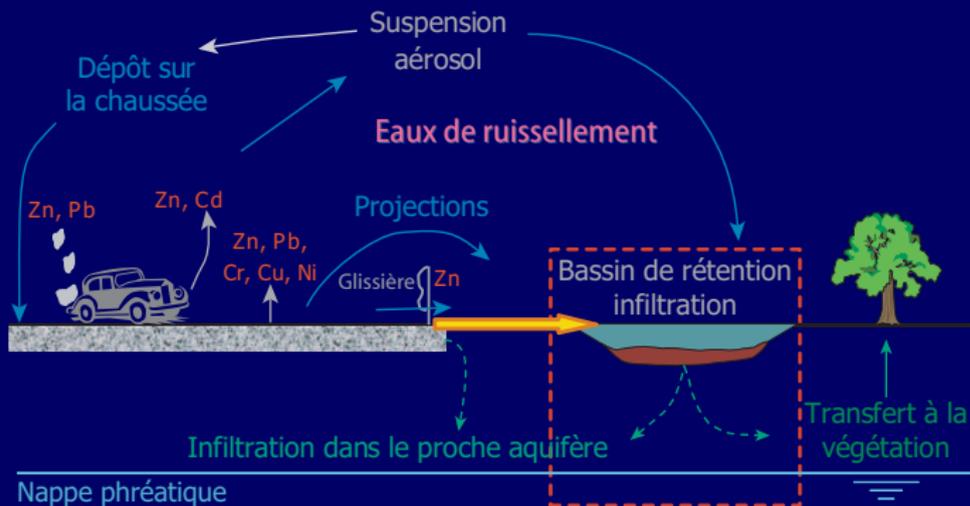
## Sources multiples

- véhicules
- chaussées
- exogènes

## Formes diverses

- particulaire
- colloïdale
- dissoute

# Spécificité de la pollution en milieu routier



## Sources multiples

- véhicules
- chaussées
- exogènes

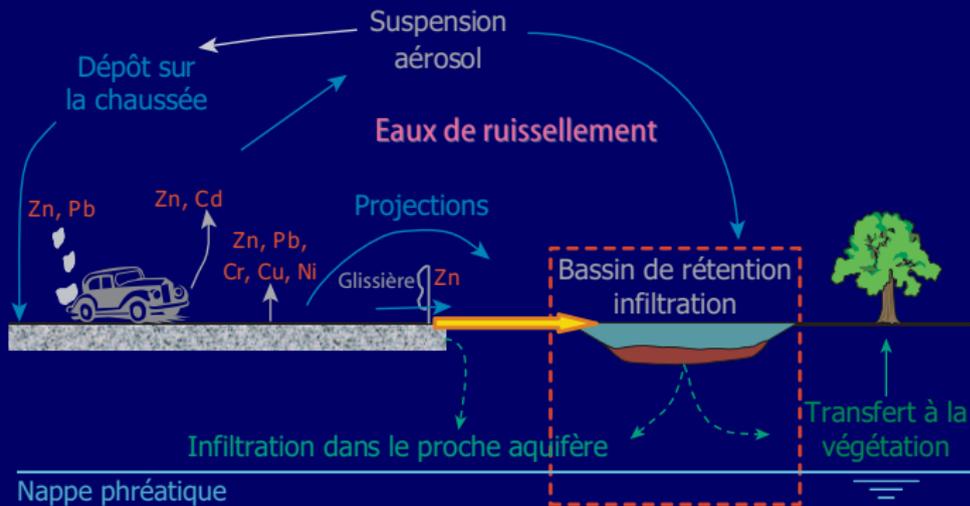
## Formes diverses

- particulaire
- colloïdale
- dissoute

## Pollution mixte

- organique
- métallique

# Spécificité de la pollution en milieu routier



## Sources multiples

- véhicules
- chaussées
- exogènes

## Formes diverses

- particulaire
- colloïdale
- dissoute

## Pollution mixte

- organique
- métallique

⇒ La **mobilité des polluants métalliques** reste à définir

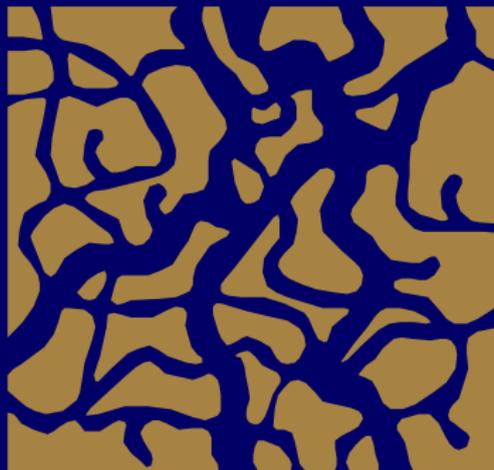
# Mobilité des éléments traces

- 1 Quels paramètres peuvent influencer le relargage?
  - *chimiques*: variation de la salinité
  - *physiques*: variation de charge hydraulique
- 2 Sous quelle forme?
  - impact sur les écosystèmes
  - capacités de dispersion  $\Rightarrow$  importance de la fraction colloïdale

» Passer

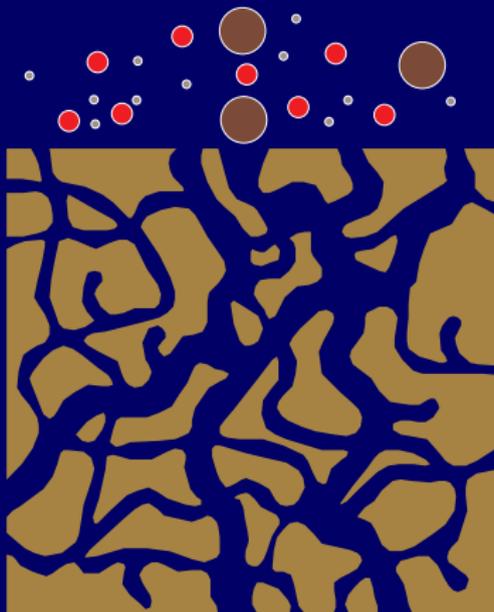
# Mobilité des éléments traces

» Passer



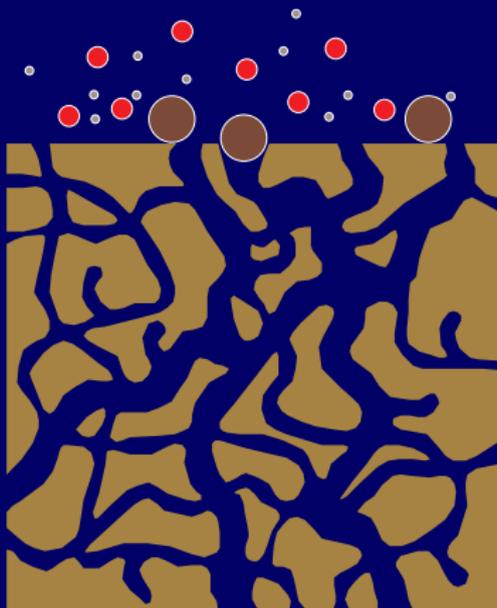
# Mobilité des éléments traces

» Passer



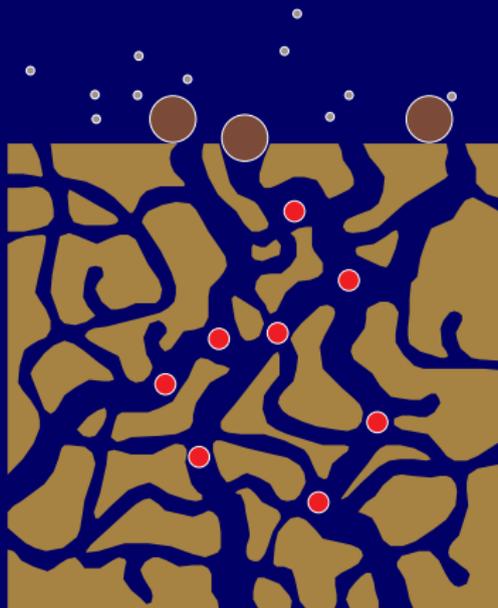
# Mobilité des éléments traces

» Passer



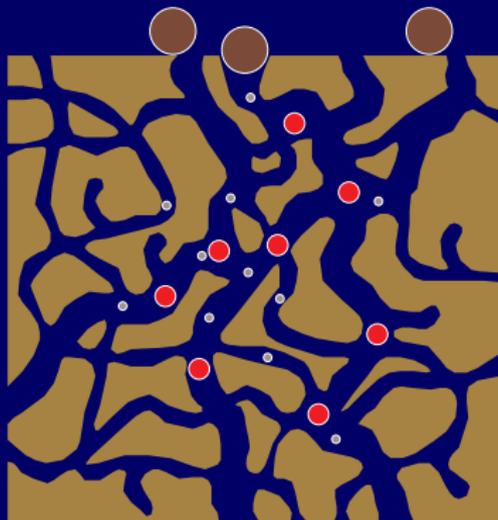
# Mobilité des éléments traces

» Passer



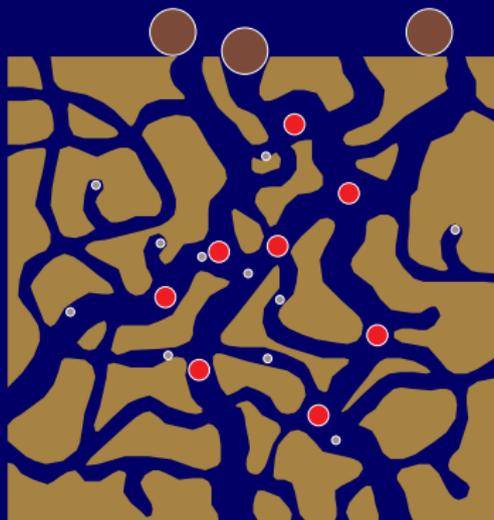
# Mobilité des éléments traces

► Passer



# Mobilité des éléments traces

» Passer



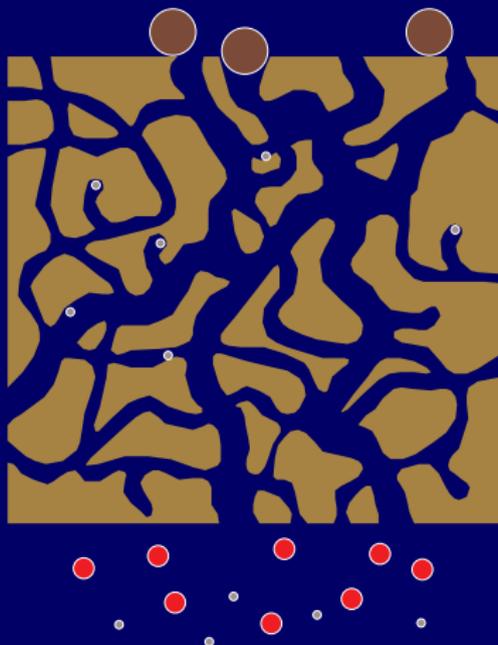
# Mobilité des éléments traces

► Passer



# Mobilité des éléments traces

» Passer



# Sommaire

- 1 Position de l'étude
  - Contexte
  - **Enjeux**
- 2 Ouvrage
  - Site et méthodes
  - Résultats
- 3 Simulateur
  - Appareil et expériences
  - Résultats
- 4 Particule
  - Méthodologie
  - Résultats

# Objectifs

## Cognitif

- 1 Quantifier le rôle de la fraction colloïdale dans le transfert des éléments traces

# Objectifs

## Cognitif

- 1 Quantifier le **rôle de la fraction colloïdale** dans le transfert des éléments traces
- 2 Qualifier la **nature des phases colloïdales**
  - Dominante organique : acides organiques, débris biologiques, produits de combustion
  - Dominante inorganique : oxydes, oxyhydroxydes, argiles

# Objectifs

## Cognitif

- 1 Quantifier le **rôle de la fraction colloïdale** dans le transfert des éléments traces
- 2 Qualifier la **nature des phases colloïdales**
  - Dominante organique : acides organiques, débris biologiques, produits de combustion
  - Dominante inorganique : oxydes, oxyhydroxydes, argiles
- 3 Déterminer les **paramètres prépondérants** contrôlant le transfert et les échanges dans les bassins

# Objectifs

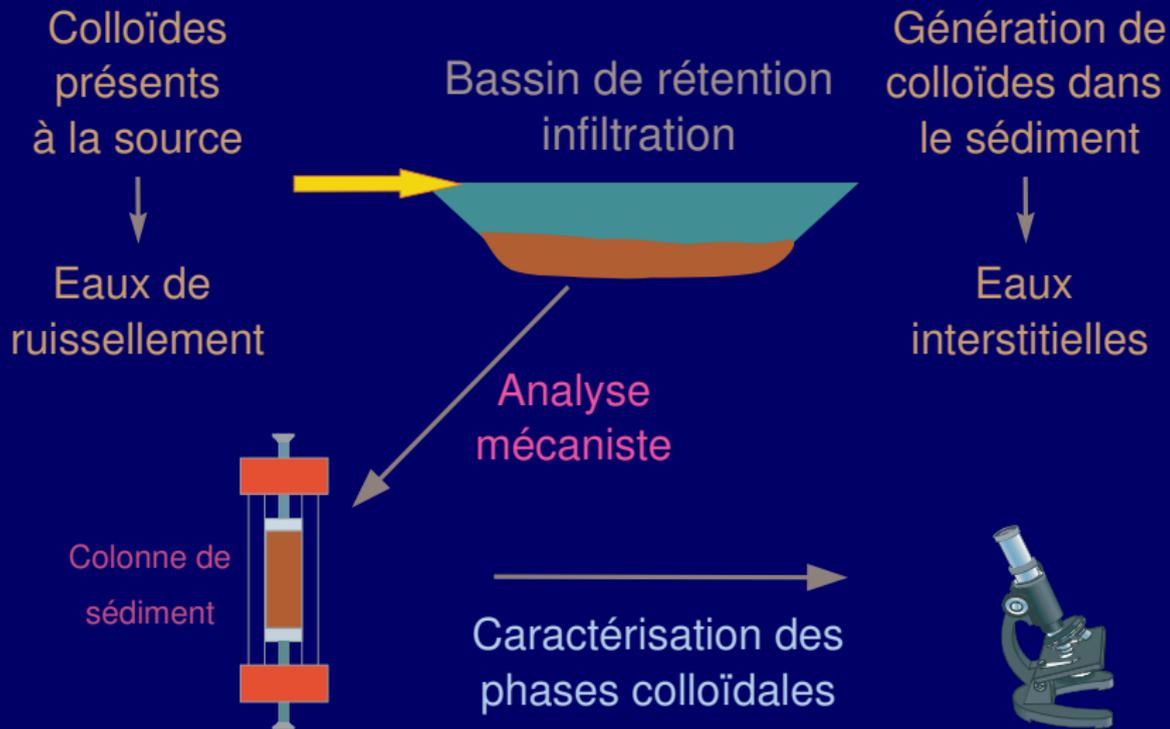
## Cognitif

- 1 Quantifier le **rôle de la fraction colloïdale** dans le transfert des éléments traces
- 2 Qualifier la **nature des phases colloïdales**
  - Dominante organique : acides organiques, débris biologiques, produits de combustion
  - Dominante inorganique : oxydes, oxyhydroxydes, argiles
- 3 Déterminer les **paramètres prépondérants** contrôlant le transfert et les échanges dans les bassins

## Opérationnel

### Gestion des bassins

# Moyens



# Sommaire

- 1 Position de l'étude
  - Contexte
  - Enjeux
- 2 Ouvrage
  - **Site et méthodes**
  - Résultats
- 3 Simulateur
  - Appareil et expériences
  - Résultats
- 4 Particule
  - Méthodologie
  - Résultats

# Site expérimental

## Bassin de rétention-infiltration du pont de Cheviré



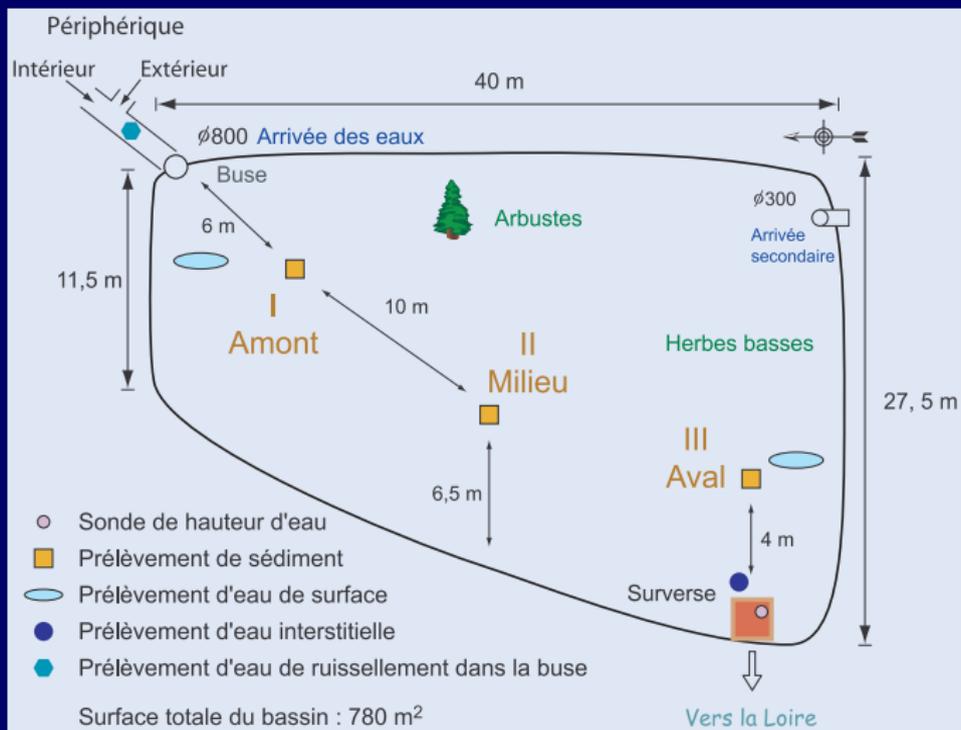
# Site expérimental

## Bassin de rétention-infiltration du pont de Cheviré

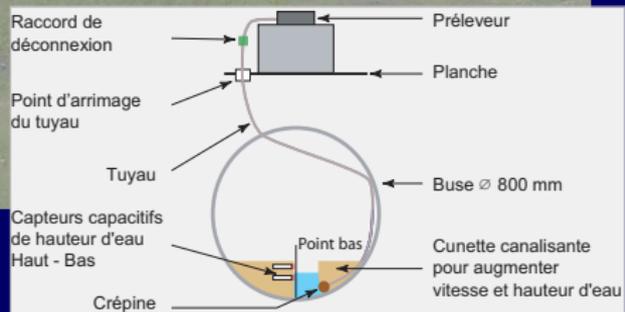
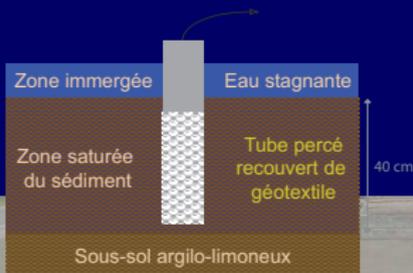


# Site expérimental

## Bassin de rétention-infiltration du pont de Cheviré



# Eaux



# Sédiments

- Collecte en 3 points, à plusieurs profondeurs  $\Rightarrow$  répartition spatiale de la pollution

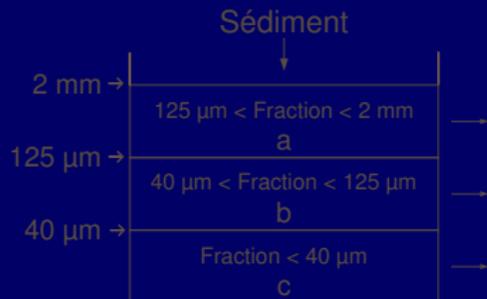
# Sédiments

- Collecte en 3 points, à plusieurs profondeurs  $\Rightarrow$  **répartition spatiale de la pollution**
- Séparation en 3 classes  $\Rightarrow$  **répartition granulométrique de la pollution**



# Sédiments

- Collecte en 3 points, à plusieurs profondeurs  $\Rightarrow$  **répartition spatiale de la pollution**
- Séparation en 3 classes  $\Rightarrow$  **répartition granulométrique de la pollution**



## Analyses

- Al, Fe, Si
- Ca, K, Mg, Mn, Na
- Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn
- Matière organique, COT

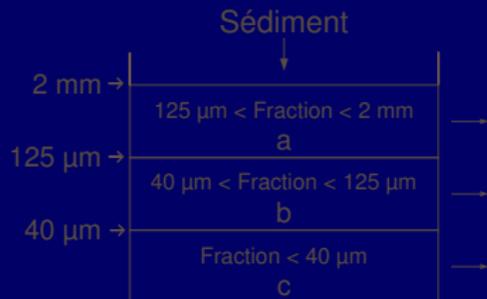
## Traitement

- Analyse en composantes principales
- Synthèse

- Analyse ESCA  $\Rightarrow$  précision sur la **spéciation des éléments traces**

# Sédiments

- Collecte en 3 points, à plusieurs profondeurs  $\Rightarrow$  **répartition spatiale de la pollution**
- Séparation en 3 classes  $\Rightarrow$  **répartition granulométrique de la pollution**



## Analyses

- Al, Fe, Si
- Ca, K, Mg, Mn, Na
- Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn
- Matière organique, COT

## Traitement

- Analyse en composantes principales
- Synthèse

- Analyse ESCA  $\Rightarrow$  précision sur la **spéciation des éléments traces**

$\Rightarrow$  **Connaissance affinée de la matrice poreuse**

# Sommaire

- 1 Position de l'étude
  - Contexte
  - Enjeux
- 2 Ouvrage
  - Site et méthodes
  - **Résultats**
- 3 Simulateur
  - Appareil et expériences
  - Résultats
- 4 Particule
  - Méthodologie
  - Résultats

# Eaux du bassin

## Eaux de ruissellement

[▶ ER](#)

- Influence de la **saison** pour **Cu, Pb**
  - Forme plutôt **particulaire** ( $> 0,45 \mu\text{m}$ ) pour **Cu, Pb, Zn**
  - Apports polluants plus importants en période hivernale
- ⇒ **Fraction colloïdale délicate à identifier**

## Eaux interstitielles

[▶ EI](#)

- Al, Fe, Mn à dominante particulaire
- Fraction **colloïdale** globalement peu importante sauf pour **Cu** et **Cd**
- Concentrations en éléments traces globalement faibles

# Eaux du bassin

## Eaux de ruissellement

[▶ ER](#)

- Influence de la **saison** pour **Cu, Pb**
  - Forme plutôt **particulaire** ( $> 0,45 \mu\text{m}$ ) pour **Cu, Pb, Zn**
  - Apports polluants plus importants en période hivernale
- ⇒ **Fraction colloïdale délicate à identifier**

## Eaux interstitielles

[▶ EI](#)

- Al, Fe, Mn à dominante particulaire
- Fraction **colloïdale** globalement peu importante sauf pour **Cu** et **Cd**
- Concentrations en éléments traces globalement faibles

**Colloïdes difficiles à caractériser ⇒ nécessité de plus de données**

# Sédiment

## Paramètres globaux



### Distribution granulométrique :

125 $\mu\text{m}$ - 2 mm	25 %
40 $\mu\text{m}$ - 125 $\mu\text{m}$	27 %
< 40 $\mu\text{m}$	48 %

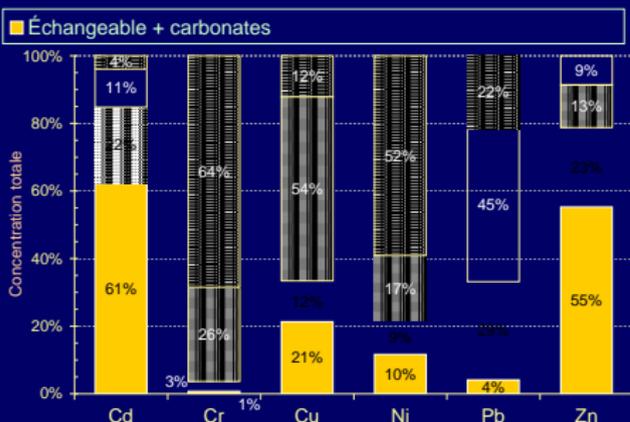
### Composition minéralogique :

Quartz*	40 %
Feldspath*	19 %
Micas + Argiles*	18 %
Carbonates	< 1 %
Métal (hydr)oxydes*	$\approx$ 2 %
Matière organique :	12 %

\*. Résultats issus d'études antérieures.

# Sédiment

## Paramètres globaux



## Distribution granulométrique :

125 $\mu\text{m}$ - 2 mm	25 %
40 $\mu\text{m}$ - 125 $\mu\text{m}$	27 %
< 40 $\mu\text{m}$	48 %

## Composition minéralogique :

Quartz*	40 %
Feldspath*	19 %
Micas + Argiles*	18 %
Carbonates	< 1 %
Métal (hydr)oxydes*	≈ 2 %
Matière organique :	12 %

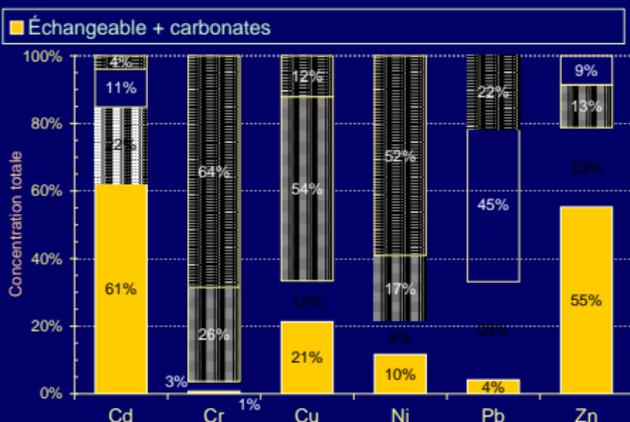
## Composition chimique :

Éléments	mg.kg <sup>-1</sup>					
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Concentration	2,6	98	318	36	446	2463
Intervention hollandaise	11	217	135	81	423	422

\*. Résultats issus d'études antérieures.

# Sédiment

## Paramètres globaux



## Distribution granulométrique :

125 $\mu\text{m}$ - 2 mm	25 %
40 $\mu\text{m}$ - 125 $\mu\text{m}$	27 %
< 40 $\mu\text{m}$	48 %

## Composition minéralogique :

Quartz*	40 %
Feldspath*	19 %
Micas + Argiles*	18 %
Carbonates	< 1 %
Métal (hydr)oxydes*	≈ 2 %
Matière organique :	12 %

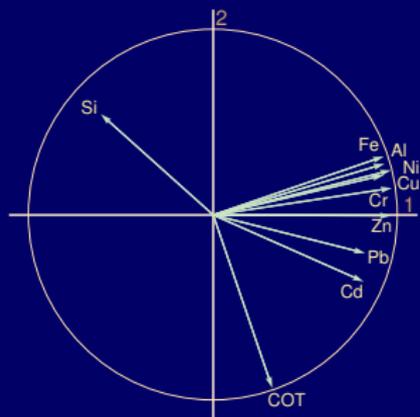
## Composition chimique :

Éléments	mg.kg <sup>-1</sup>					
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Concentration	2,6	98	318	36	446	2463
Intervention hollandaise	11	217	135	81	423	422

\*. Résultats issus d'études antérieures.

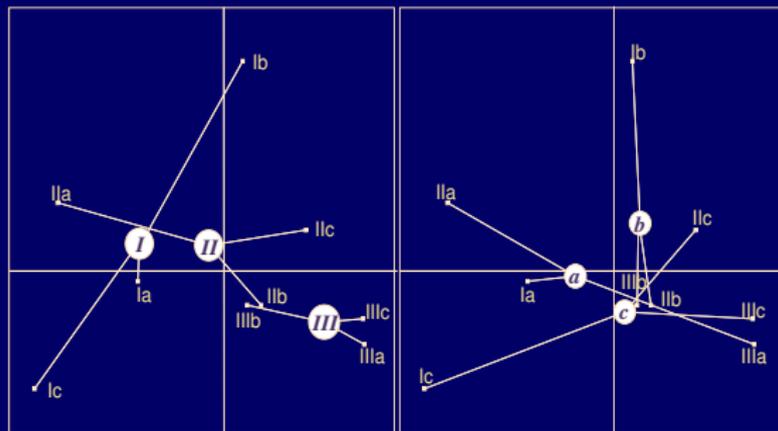
# Sédiment

## Analyse en composantes principales



axe 1 : 71,7 %

axe 2 : 16,2 %

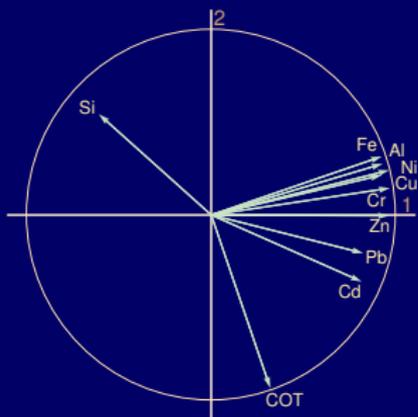


I: amont, II: milieu, III: aval

a: grossière, b: intermédiaire, c: fine

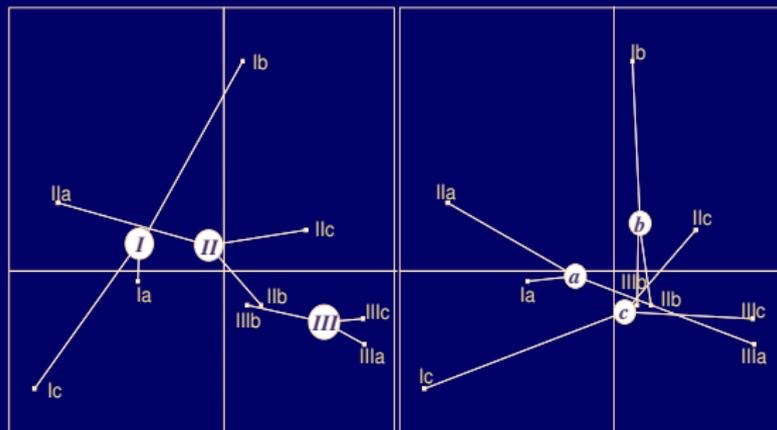
# Sédiment

## Analyse en composantes principales



axe 1 : 71,7 %

axe 2 : 16,2 %



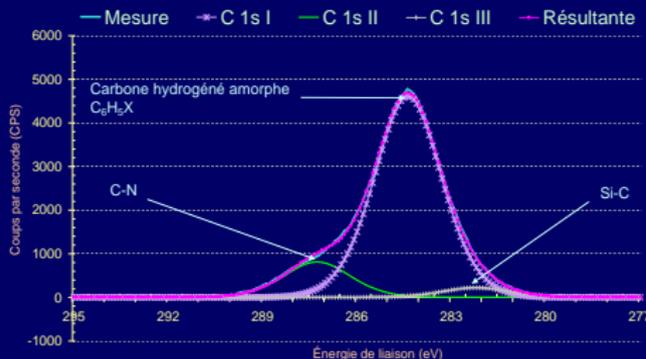
I : amont, II : milieu, III : aval

a : grossière, b : intermédiaire, c : fine

Pollution croissante de l'amont vers l'aval  
Pollution hétérogène sans lien avec la granulométrie

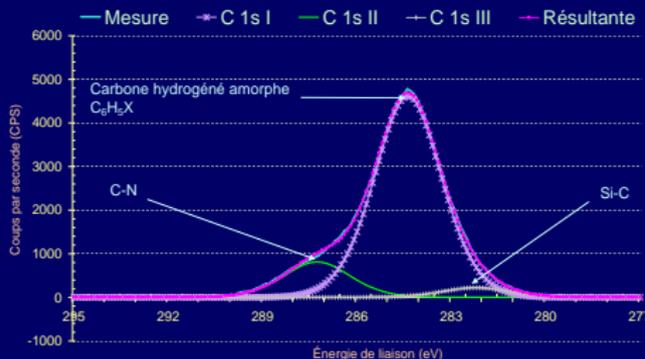
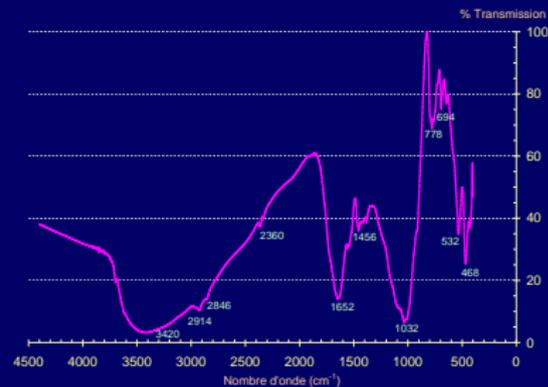
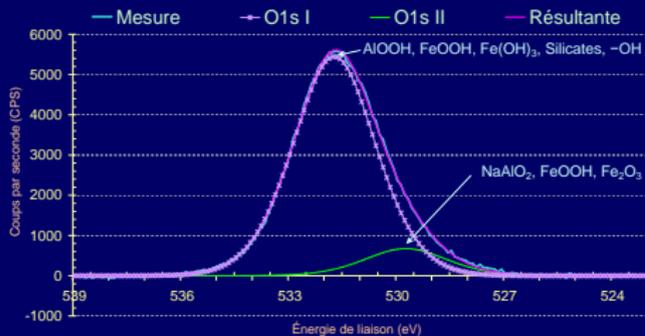
# Sédiment

## Analyses spectroscopiques



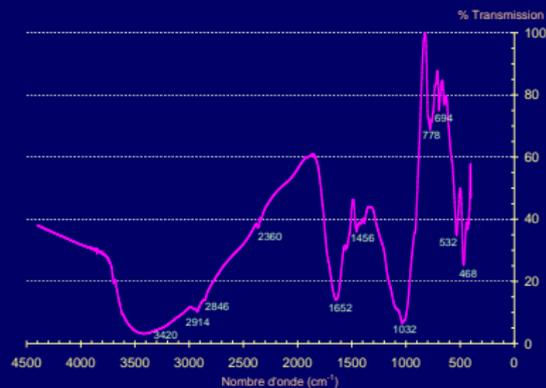
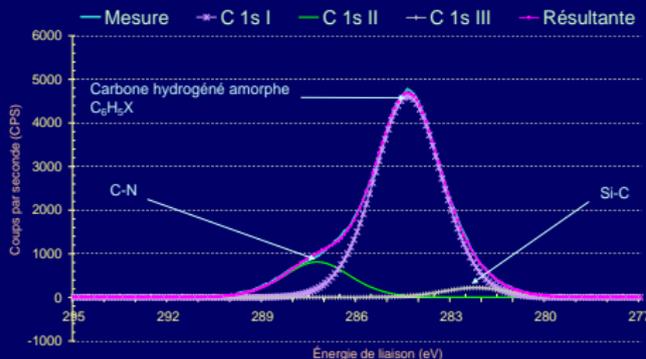
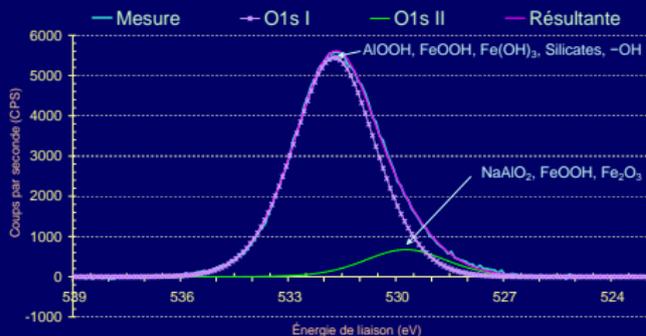
# Sédiment

## Analyses spectroscopiques



# Sédiment

## Analyses spectroscopiques



## Résultats

- Ossature minérale (quartz)
- Gangue organique d'origine anthropique et biologique

# Conclusion sur les résultats de terrain

## Eaux

- Résultats hétérogènes  $\Rightarrow$  nécessité d'un grand nombre de mesures
- Fraction colloïdale importante dans des eaux peu chargées
- Rôle global de la fraction colloïdale délicat à mettre en évidence

## Sédiment

- Matrice complexe et hétérogène  $\Rightarrow$  difficulté d'échantillonnage
- Matériau fin, perméable, d'ossature minérale et riche en matière organique d'origine naturelle ou anthropique
- Pollution croissante de l'amont vers l'aval

# Conclusion sur les résultats de terrain

## Eaux

- Résultats hétérogènes  $\Rightarrow$  nécessité d'un grand nombre de mesures
- Fraction colloïdale importante dans des eaux peu chargées
- Rôle global de la fraction colloïdale délicat à mettre en évidence

## Sédiment

- Matrice complexe et hétérogène  $\Rightarrow$  difficulté d'échantillonnage
- Matériau fin, perméable, d'ossature minérale et riche en matière organique d'origine naturelle ou anthropique
- Pollution croissante de l'amont vers l'aval

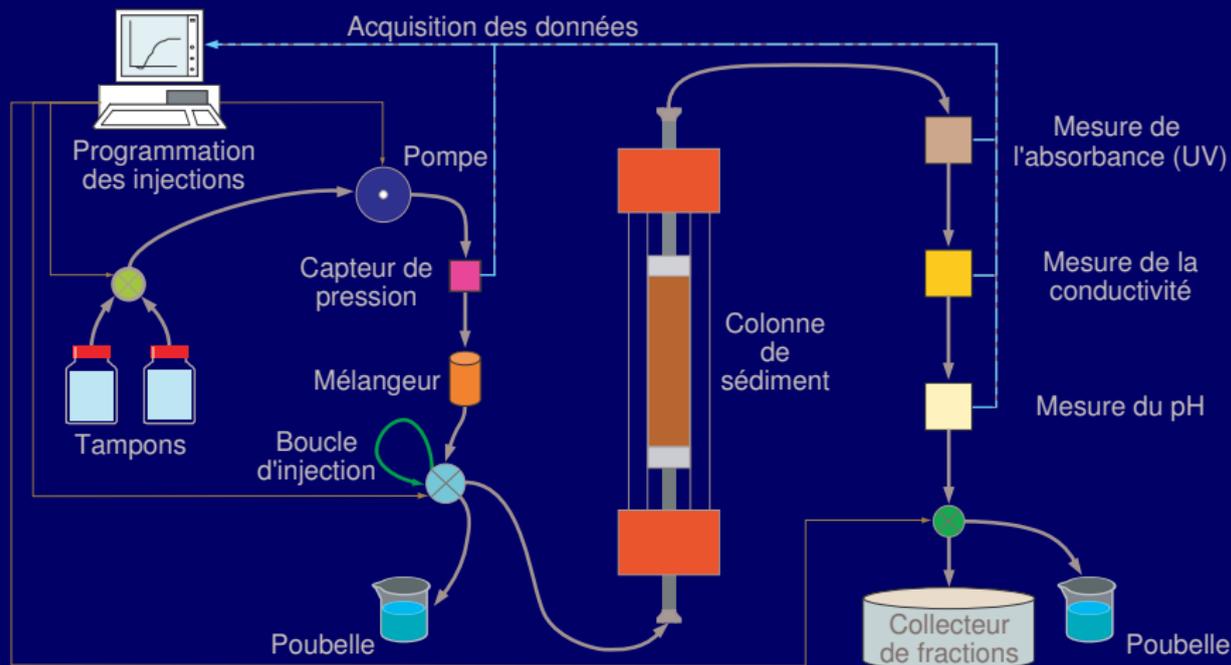
Complexité de l'échelle globale  $\Rightarrow$  étude sur **maquette**

# Sommaire

- 1 Position de l'étude
  - Contexte
  - Enjeux
- 2 Ouvrage
  - Site et méthodes
  - Résultats
- 3 **Simulateur**
  - **Appareil et expériences**
  - Résultats
- 4 Particule
  - Méthodologie
  - Résultats

# Dispositif expérimental

## Schéma fluide



# Dispositif expérimental

## Conditionnement

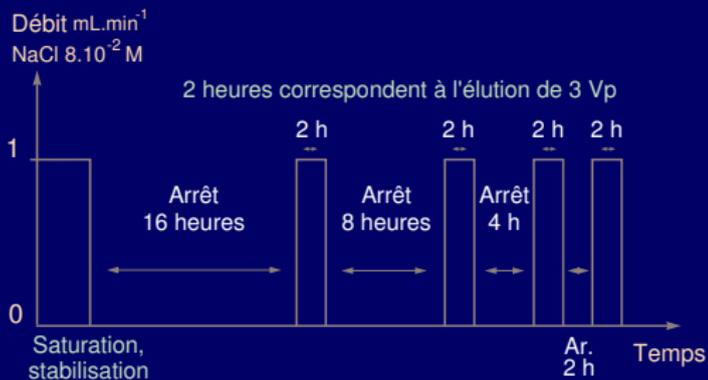


### Démarche

- ① Remplissage de la colonne avec du sédiment tamisé à  $200 \mu\text{m}$   
Volume de 43 à  $516 \text{ cm}^3$
- ② Dégazage avec du  $\text{CO}_2$
- ③ Saturation avec du  $\text{NaCl}$  à  $8.10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$
- ④ Stabilisation des signaux

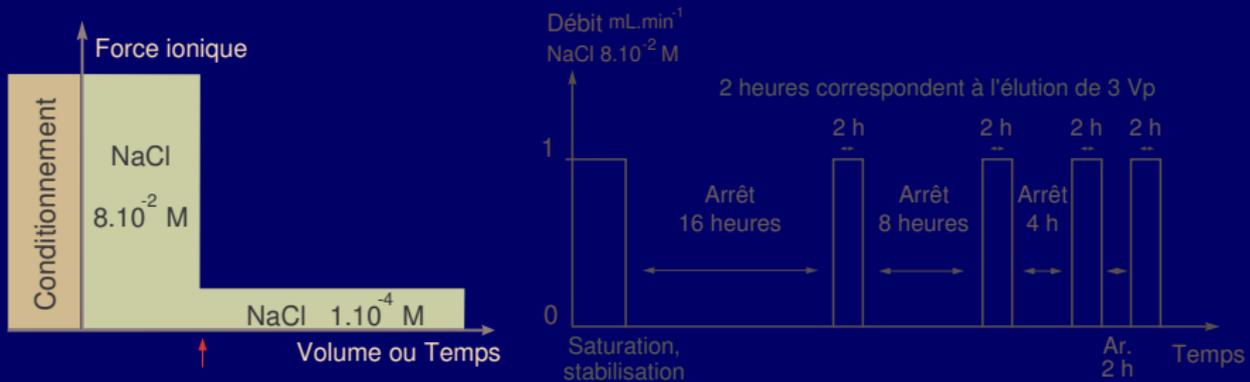
# Simulation

- Alternance des périodes de pluie et de temps sec  $\Rightarrow$  cycles arrêt-reprise du débit



# Simulation

- Alternance des périodes de pluie et de temps sec  $\Rightarrow$  cycles arrêt-reprise du débit
- Effet du salage  $\Rightarrow$  choc de force ionique

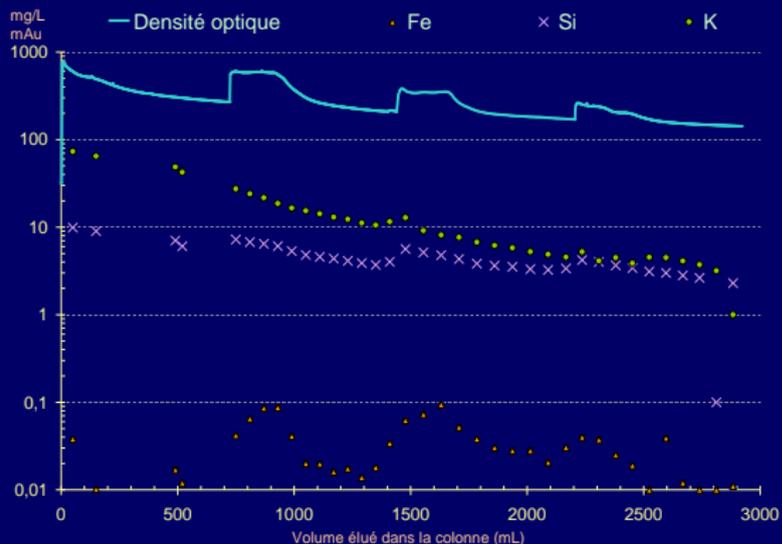


# Sommaire

- 1 Position de l'étude
  - Contexte
  - Enjeux
- 2 Ouvrage
  - Site et méthodes
  - Résultats
- 3 **Simulateur**
  - Appareil et expériences
  - **Résultats**
- 4 Particule
  - Méthodologie
  - Résultats

# Arrêt-reprise du débit

## Éléments majeurs

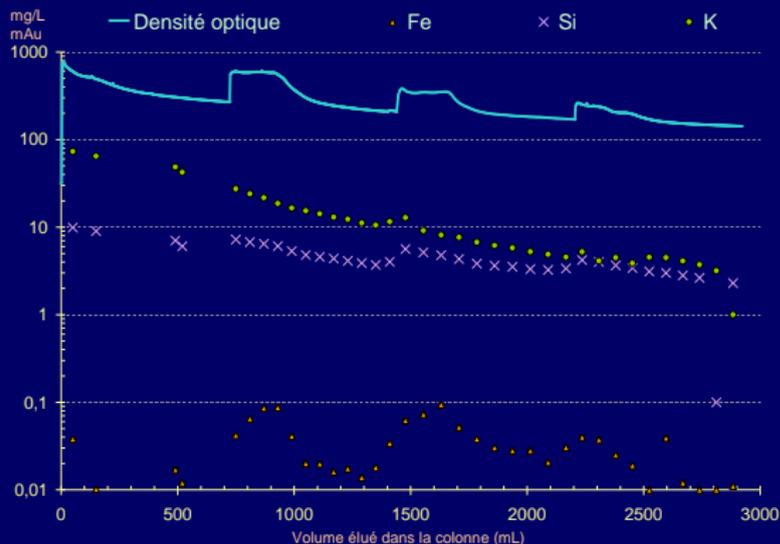


## Résultats

- Densité optique sensible aux modifications de débit
- Épuisement fort : Ca, K, Mg
- Épuisement faible : Mn, Si
- Corrélé aux cycles : Fe

# Arrêt-reprise du débit

## Éléments majeurs



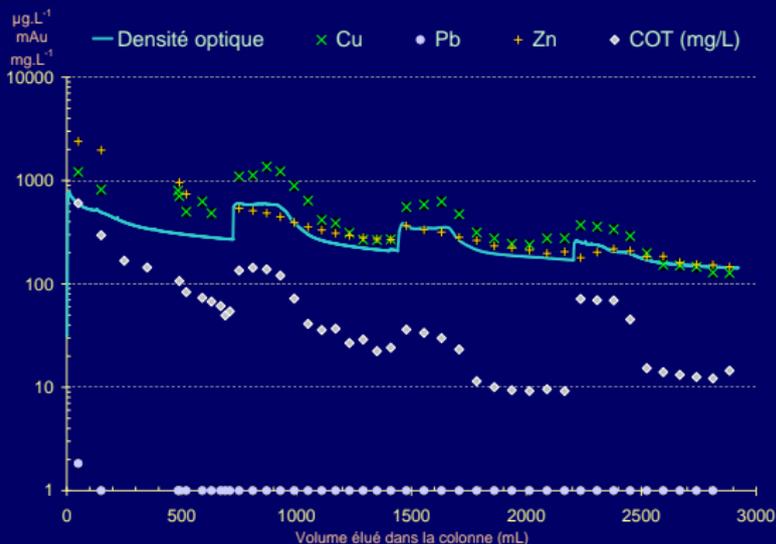
## Résultats

- Densité optique sensible aux modifications de débit
- Épuisement fort : Ca, K, Mg
- Épuisement faible : Mn, Si
- Corrélé aux cycles : Fe

- Ca, K, Mg  $\Rightarrow$  échange d'ions avec Na
- Mn, Si  $\Rightarrow$  dissolution de la matrice
- Effet de cisaillement

# Arrêt-reprise du débit

## Éléments traces

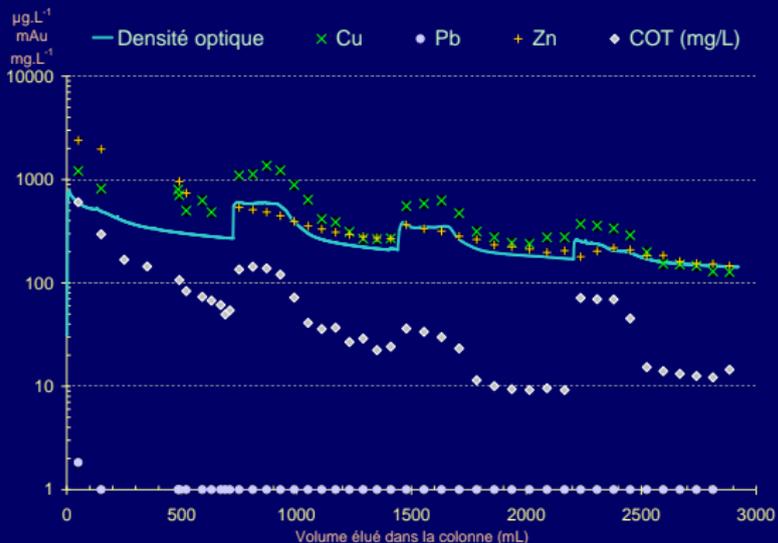


## Résultats

- Peu ou à peine décelables : Pb, Cr, Cd
- Sensibilité faible : Zn
- Corrélés aux cycles : COT, Cu, Ni

# Arrêt-reprise du débit

## Éléments traces



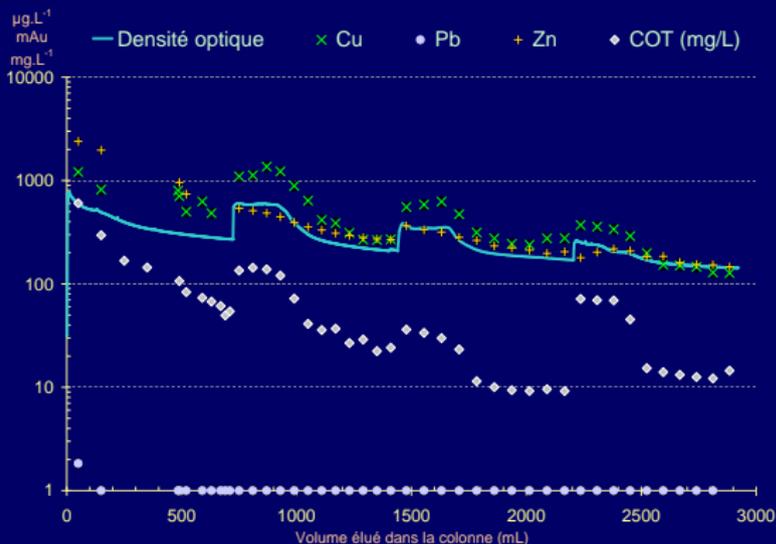
## Résultats

- Peu ou à peine décelables : Pb, Cr, Cd
- Sensibilité faible : Zn
- Corrélés aux cycles : COT, Cu, Ni

$$Pb \ll Zn < Cu < COT$$

# Arrêt-reprise du débit

## Éléments traces



## Résultats

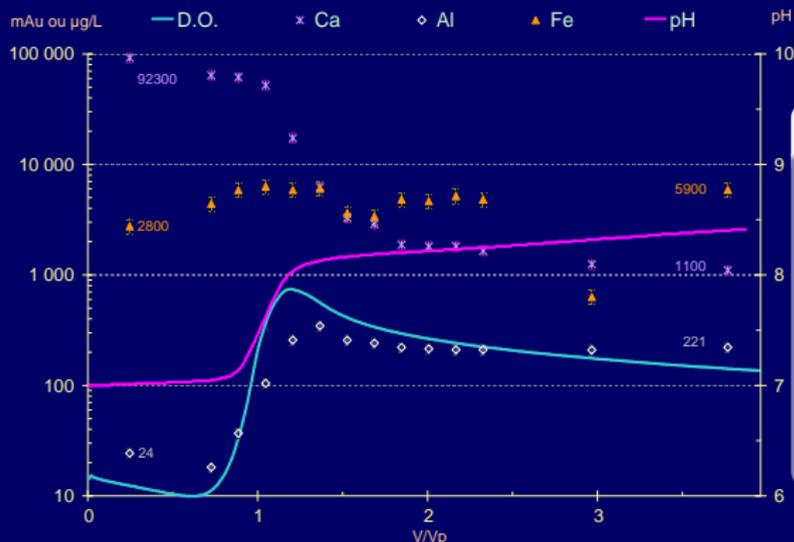
- Peu ou à peine décelables : Pb, Cr, Cd
- Sensibilité faible : Zn
- Corrélés aux cycles : COT, Cu, Ni

$$Pb \ll Zn < Cu < COT$$

- Comportement similaire du COT et du Cu
- Diffusion de particules organiques supports de Cu
- Rôle du compartiment microbien

# Choc de force ionique

## Éléments majeurs

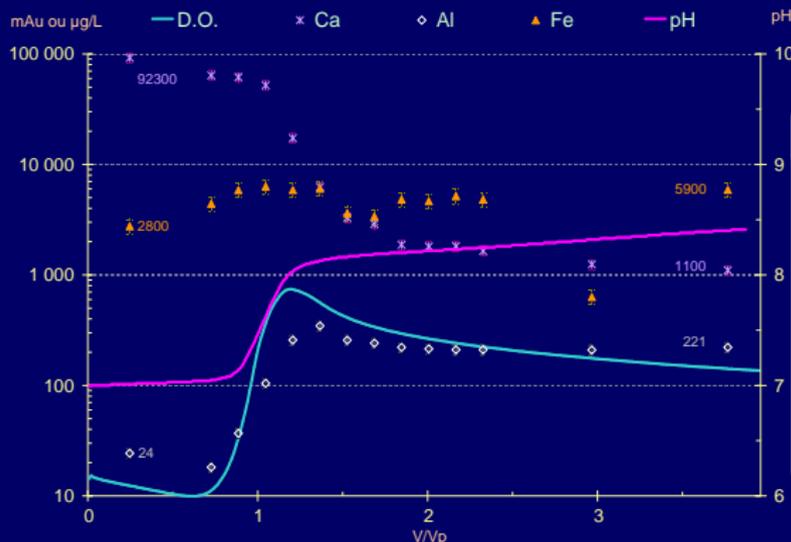


## Résultats

- Pic de densité optique
- Augmentation du pH
- Chute : Na, Ca, Mg, Mn
- Neutre : Fe
- Augmentation : Al

# Choc de force ionique

## Éléments majeurs



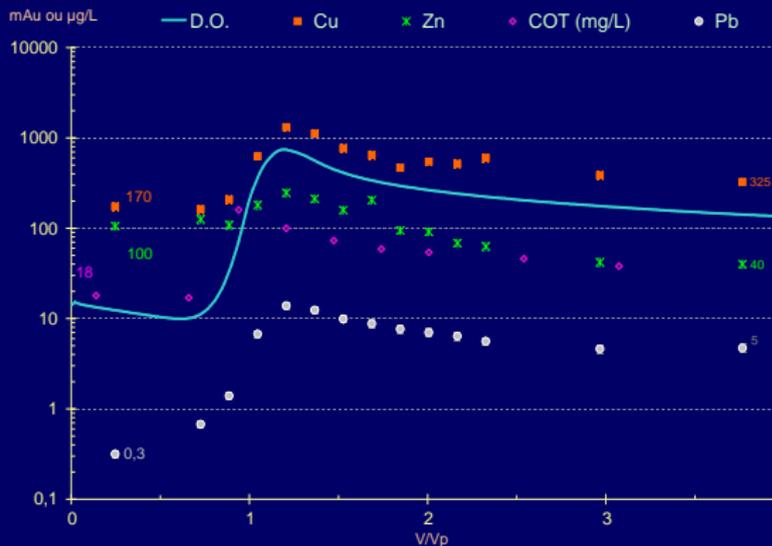
## Résultats

- Pic de densité optique
- Augmentation du pH
- Chute : Na, Ca, Mg, Mn
- Neutre : Fe
- Augmentation : Al

- Ca, K, Mg, Mn  $\Rightarrow$  échange d'ions avec Na
- Fe, Al  $\Rightarrow$  inversion de la charge de surface par augmentation du pH
- Effet de cisaillement

# Choc de force ionique

## Éléments traces

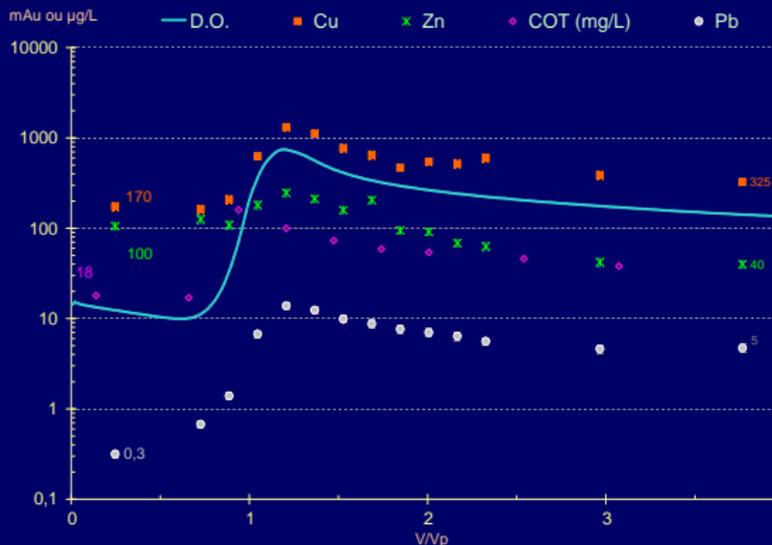


## Résultats

- Très sensibles : Pb, Cu, Cr, COT
- Peu sensible : Zn
- Insensible : Cd

# Choc de force ionique

## Éléments traces



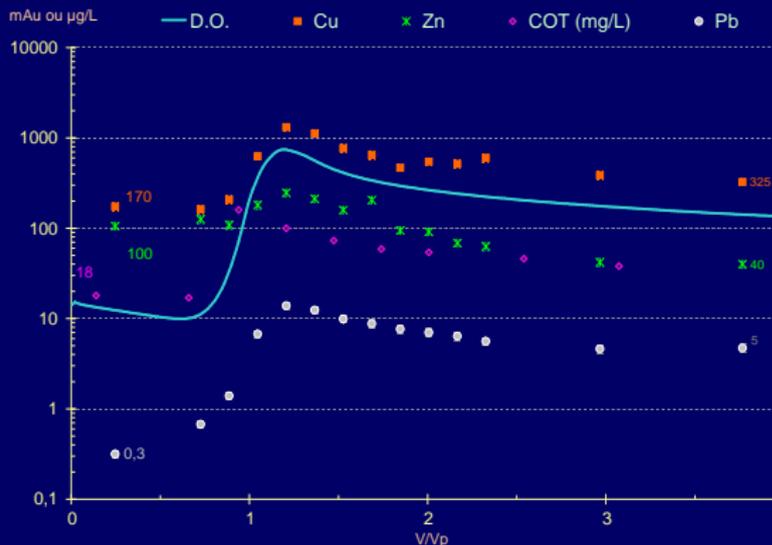
## Résultats

- Très sensibles : Pb, Cu, Cr, COT
- Peu sensible : Zn
- Insensible : Cd

$$Zn \ll Cu \approx COT \ll Pb$$

# Choc de force ionique

## Éléments traces



### Résultats

- Très sensibles : Pb, Cu, Cr, COT
- Peu sensible : Zn
- Insensible : Cd

$$Zn \ll Cu \approx COT \ll Pb$$

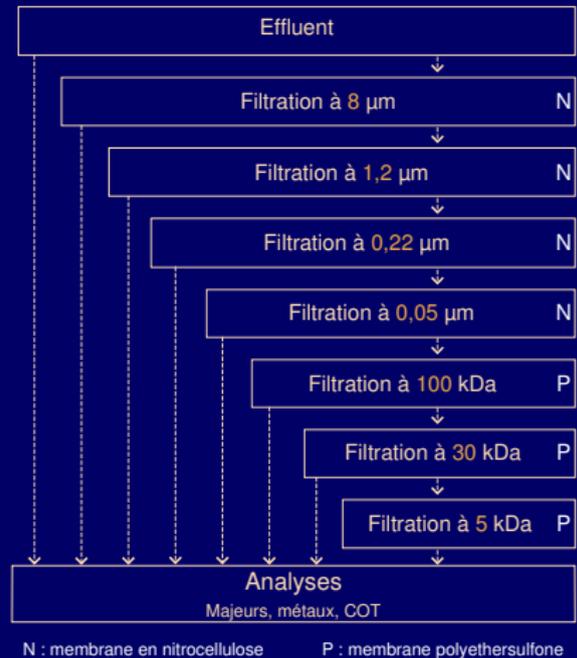
- Concomitance de Pb, Cu, Cr, COT
- Augmentation de l'épaisseur de la double couche  $\Rightarrow$  mobilisation par cisaillement

# Sommaire

- 1 Position de l'étude
  - Contexte
  - Enjeux
- 2 Ouvrage
  - Site et méthodes
  - Résultats
- 3 Simulateur
  - Appareil et expériences
  - Résultats
- 4 Particule
  - **Méthodologie**
  - Résultats

# Séparation des phases colloïdales

Cellule de filtration  $\Rightarrow$  fractionnement de la solution



# Étude des phases colloïdales

## Matériel

### Suspension

- Brut
- Fractionnement
  - filtrats-rétentats
  - FFF

### Membranes

## Analyses

### Élémentaire

- ICP-AES
- ICP-MS
- SAA

### Morphologie

- MEB-EDS
- MEBE
- MET-EDS-DEAS

### Groupes fonctionnels

- UV-Visible

### Liaisons chimiques

- XPS-ESCA

### Volume

- MALLS

## Modélisation

### Spéciation

(CHESS)

### Géochimie

► Passer

# Étude des phases colloïdales

## Matériel

### Suspension

- Brut
- Fractionnement
  - filtrats-rétentats
  - FFF

### Membranes

## Analyses

### Élémentaire

- ICP-AES
- ICP-MS
- SAA

### Morphologie

- MEB-EDS
- MEBE
- MET-EDS-DEAS

### Groupes fonctionnels

- UV-Visible

### Liaisons chimiques

- XPS-ESCA

### Volume

- MALLS

## Modélisation

Spéciation  
(CHESS)  
Géochimie

► Passer

# Étude des phases colloïdales

## Matériel

### Suspension

- Brut
- Fractionnement
  - filtrats-rétentats
  - FFF

### Membranes

## Analyses

### Élémentaire

- ICP-AES
- ICP-MS
- SAA

### Morphologie

- MEB-EDS
- MEBE
- MET-EDS-DEAS

### Groupes fonctionnels

- UV-Visible

### Liaisons chimiques

- XPS-ESCA

### Volume

- MALLS

## Modélisation

Spéciation  
(CHESS)  
Géochimie

► Passer

# Étude des phases colloïdales

## Matériel

### Suspension

- Brut
- Fractionnement
  - filtrats-rétentats
  - FFF

### Membranes

## Analyses

### Élémentaire

- ICP-AES
- ICP-MS
- SAA

### Morphologie

- MEB-EDS
- MEBE
- MET-EDS-DEAS

### Groupes fonctionnels

UV-Visible

### Liaisons chimiques

- XPS-ESCA

### Volume

- MALLS

## Modélisation

### Spéciation

(CHESS)

### Géochimie

► Passer

# Étude des phases colloïdales

## Matériel

### Suspension

- Brut
- Fractionnement
  - filtrats-rétentats
  - FFF

## Membranes

## Analyses

### Élémentaire

- ICP-AES
- ICP-MS
- SAA

### Morphologie

- MEB-EDS
- MEBE
- MET-EDS-DEAS

### Groupes fonctionnels

UV-Visible

### Liaisons chimiques

- XPS-ESCA

### Volume

- MALLS

## Modélisation

Spéciation  
(CHESS)  
Géochimie

► Passer

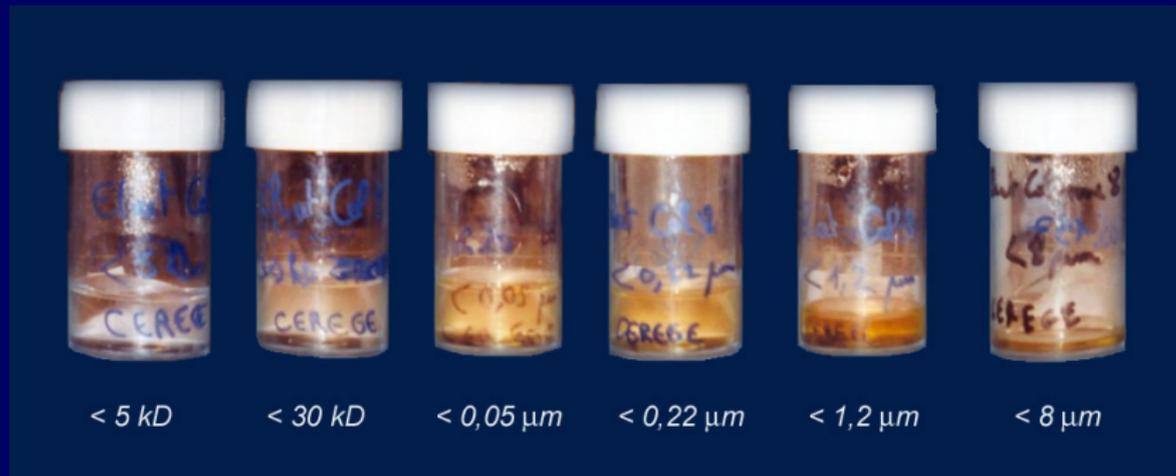
# Sommaire

- 1 Position de l'étude
  - Contexte
  - Enjeux
- 2 Ouvrage
  - Site et méthodes
  - Résultats
- 3 Simulateur
  - Appareil et expériences
  - Résultats
- 4 Particule
  - Méthodologie
  - Résultats

# Cascade de filtration

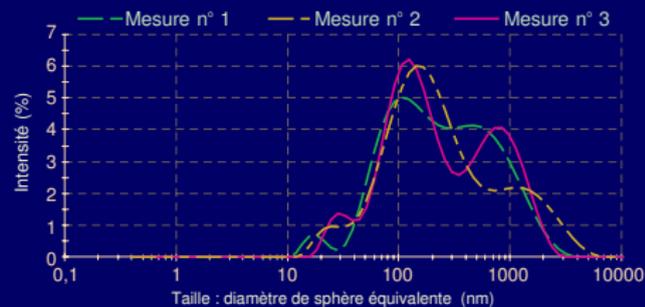
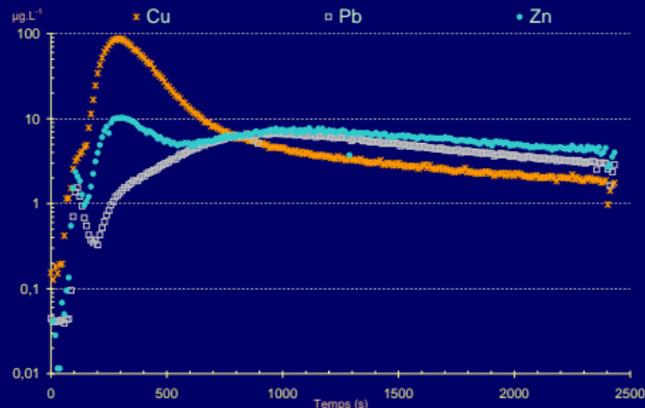
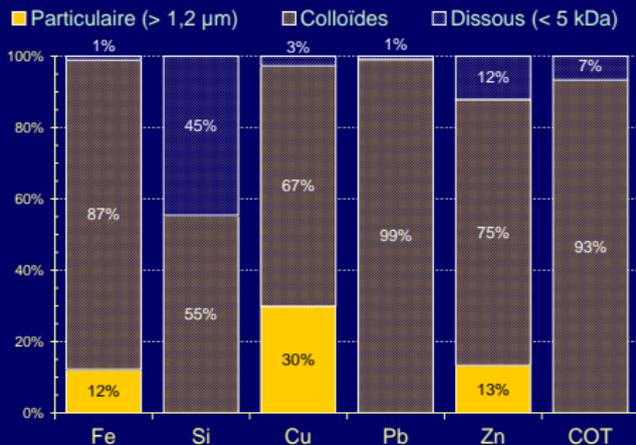
Éluat de colonne ayant subi un choc de salinité

Évolution de l'éluat au cours de la filtration



Filtrats

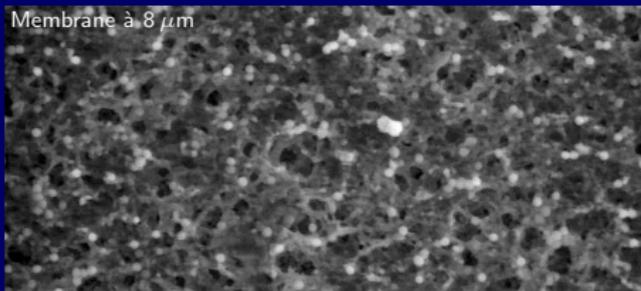
# Taille des particules - Modélisation



Espèces aqueuses	µg.L <sup>-1</sup>	Minéraux et colloïdes	µg.L <sup>-1</sup>
SiO <sub>2</sub> (aq)	4648,1	> AHA	91002
HSiO <sub>3</sub> [-]	78,8	> Quartz	11829
NaHSiO <sub>3</sub> (aq)	57,5	Nontronite-Na	6434,7
CuCO <sub>3</sub> (aq)	17,8	Tenorite	723,2
Zn[2+]	9,2	Pyrolusite	123,4
PbCO <sub>3</sub> (aq)	20,4	Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	161,7
CuOH[+]	2,6	Mesolite	101,3

# Morphologie

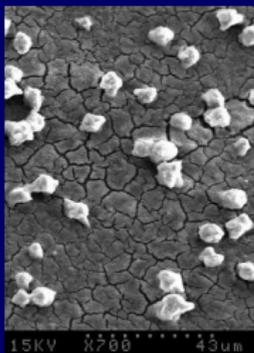
## Comparaison MEB-MEBE

Membrane à 8  $\mu\text{m}$ 

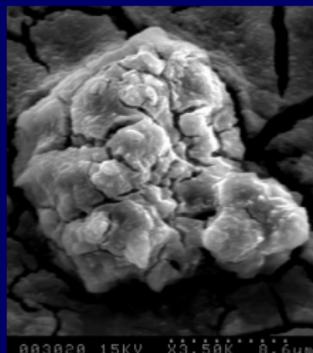
HV	Mag	Det	Sig	WD	Pressure	100.0 $\mu\text{m}$	
20.0 kV	600x	LFD	SE	9.7 mm	1.00 Torr	05-217	

Membrane à 8  $\mu\text{m}$ 

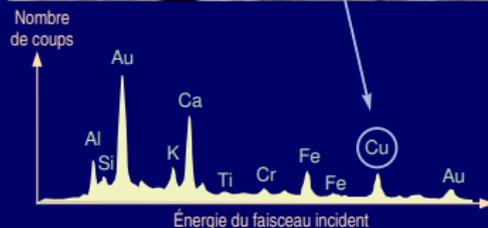
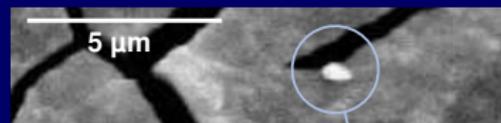
HV	Mag	Det	Sig	WD	Pressure	10.0 $\mu\text{m}$	
20.0 kV	5000x	LFD	SE	9.6 mm	1.00 Torr	05-217-2	



15KV X700 4.0  $\mu\text{m}$

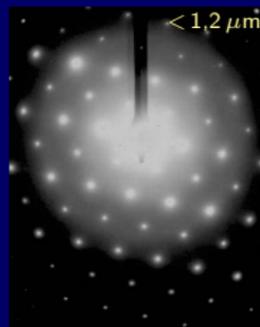


003020 15KV X3,50K 0.6  $\mu\text{m}$

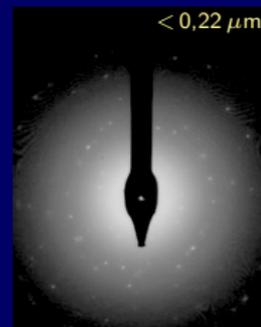


# Morphologie

MET



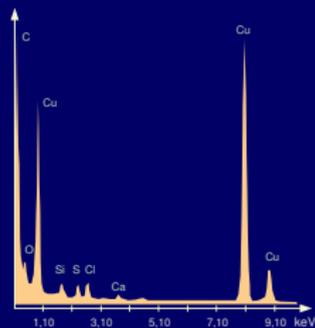
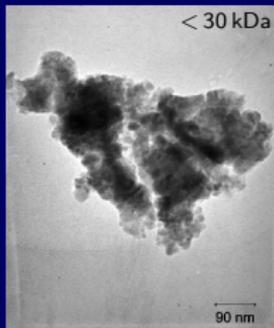
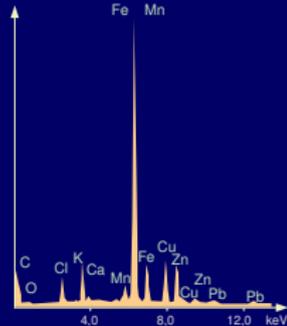
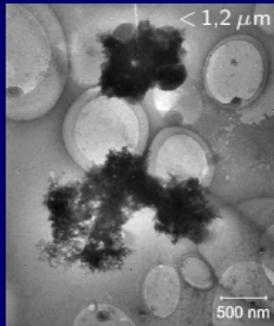
Cristal de plomb



Silicate de cuivre

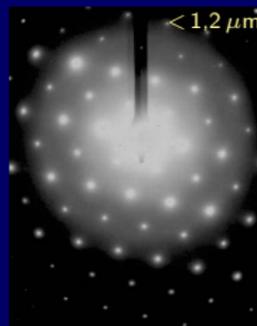
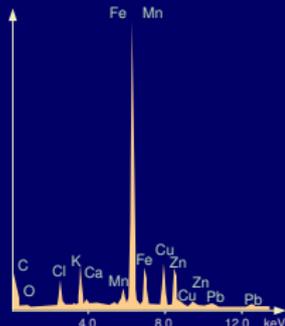
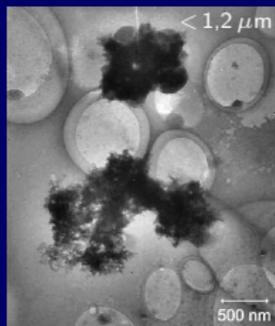
# Morphologie

## MET

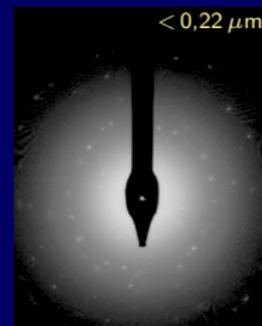


# Morphologie

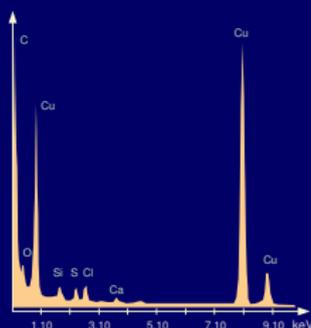
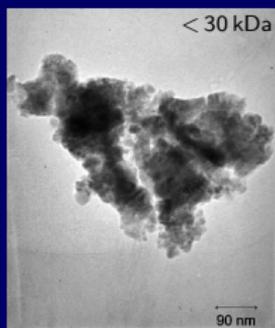
## MET



Cristal de plomb



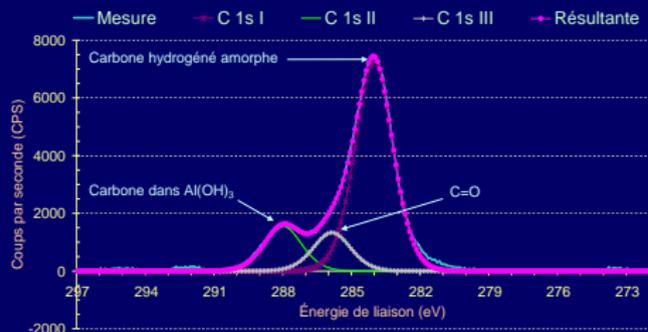
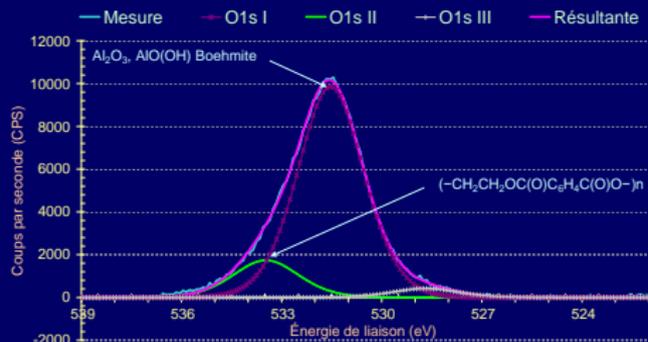
Silicate de cuivre



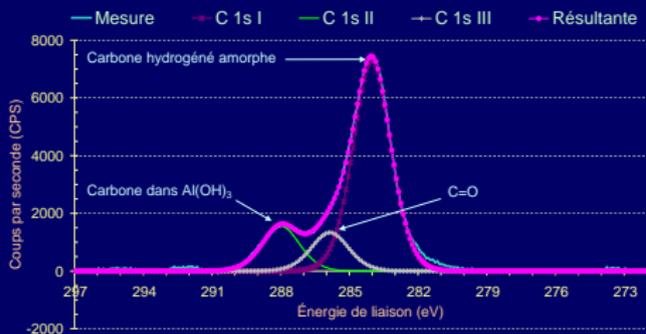
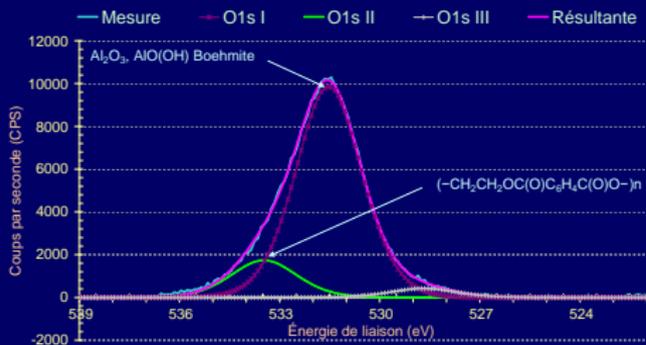
## Résultats

Structures fines  
Cristallisées  
Amorphes  
Organiques

# Groupes fonctionnels - Spéciation



# Groupes fonctionnels - Spéciation



## Résultats

- Très bonne corrélation entre absorbance à 254 nm et concentration en COT
- Absorbance de composés organiques beaucoup plus forte qu'un oxyde de fer
- Mise en évidence d'acide humique et fulvique
- Composés organiques d'origine biologique
- Minéraux, oxydes

# Conclusion sur les investigations de laboratoire

## Mécanismes de mobilisation

- Stimulation physique  $\Rightarrow$ 
  - Diffusion dans les pores et entraînement par le flux
  - Transport facilité de Cu et Ni
- Stimulation chimique  $\Rightarrow$ 
  - Augmentation de l'épaisseur de la double couche
  - Inversion de la charge de surface
  - Transport facilité de Pb, Cu et Cr

## Caractérisation des colloïdes

- Existence avérée de la fraction colloïdale
- Trois modes « granulométriques » identifiés
- Type mixte à dominante organique
- Suspension stable  $\Rightarrow$  transport facilité

# Apports de l'étude

## Cognitif

### Terrain

- Difficulté à isoler la fraction colloïdale dans les eaux  $\Rightarrow$  développement de protocoles robustes pour la collecte de plus de données
- Comportement singulier de **Cu**, toujours présent
- Sédiment : matrice hétérogène, d'ossature minérale, cimenté par une gangue organique

### Simulateur

- Mise en évidence du rôle des variations de salinité sur une matrice complexe
- Échelle de mobilité différente selon la sollicitation
- Rôle majeur de la fraction colloïdale

## Pratique

- Développement méthodologique
- Complémentarité des techniques d'analyses

# Perspectives

## *Approfondissement*

### Caractérisation plus précise des apports : qualitatif, quantitatif

- Base de données  $\Rightarrow$  traitement statistique
- Analyses spectroscopiques

### Phase organique

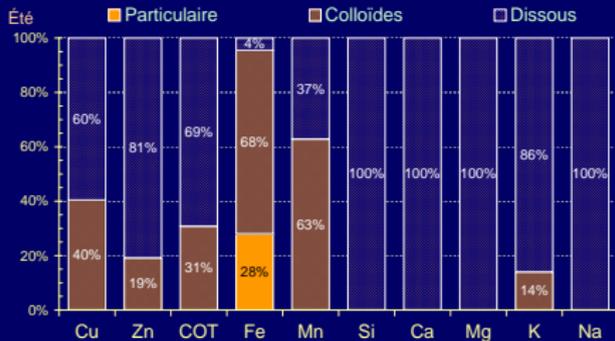
- Compartiment microbien
- Dégradation des polluants organiques
- Estimer l'évolution temporelle du sédiment

## *Élargissement*

- Confronter nos résultats à des sites similaires
- Mise en évidence des mécanismes à confirmer par la modélisation
- Prendre en compte l'hétérogénéité des écoulements : saturation-désaturation

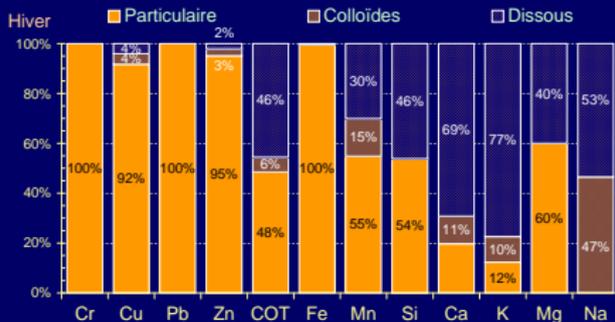


# Eaux de ruissellement



## Résultats généraux

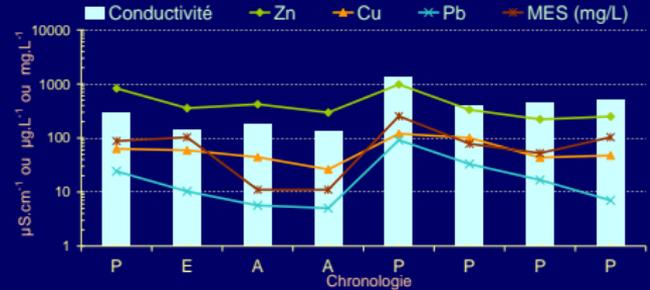
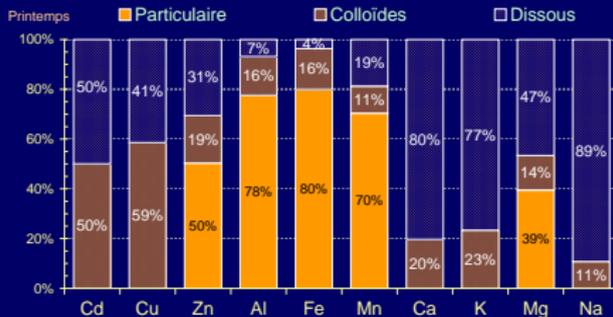
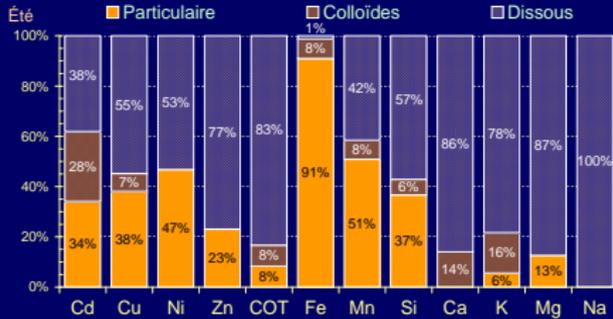
- Influence de la saison pour Cu, Pb
- Forme plutôt particulaire ( $> 0,45 \mu\text{m}$ ) pour Cu, Pb, Zn
- Apports polluants plus importants en période hivernale



## Résultats ponctuels

- Métaux sous forme particulaire ( $> 1,2 \mu\text{m}$ ) en hiver et sous forme dissoute ou colloïdale en été
- Variabilité à confirmer

# Eaux interstitielles

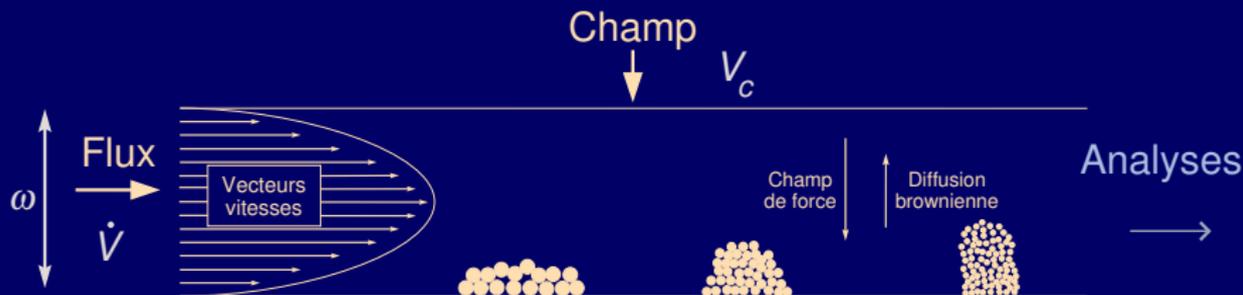


## Résultats

- Al, Fe, Mn à dominante particulaire
- Fraction **colloïdale** globalement peu importante sauf pour **Cu** et Cd
- Mise en *évidence in situ* du rôle de la **salinité**
- Concentrations faibles et **variabilité à vérifier**

# Fractionnement par champ de flux

## Field Flow Fractionation



$d$ , diamètre des particules

$$d = \frac{\pi \eta \omega^2 t_r V_c}{2 k_b T \dot{V}}$$

- $\eta$ , la viscosité du fluide porteur (Pa.s)
- $\omega$ , la largeur du capillaire (m)
- $t_r$ , le temps de retention (s)
- $V_c$ , débit volumique du flux perpendiculaire ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
- $\dot{V}$ , débit volumique du flux dans le capillaire ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

# Capacité d'extraction

Choc de salinité

