

# Phytoremédiation par **Jardins Filtrants** d'un **sol** pollué par des **métaux lourds**



Approche de la phytoremédiation dans des casiers végétalisés par des plantes de milieux humides et étude des mécanismes de remobilisation/immobilisation du zinc et du cuivre

**Tatiana Kirpichtchikova**



# Sol

- épiderme vivant et vital des continents de la Terre
- très mince (de quelques cm à quelques m)
- source de vie, ressource limitée
- fragile et vulnérable face aux activités humaines

XX<sup>e</sup> siècle

# Dégradation

- appauvrissement en nutriments
- salinisation, alcalinisation, acidification
- érosion, destruction par les constructions
- pollutions organiques, métalliques

France (2007)

4 033 sites pollués  
300 000 sites potentiels

(BASOL, BASIAS)

## Cas de la plaine agricole de Pierrelaye

- Irrigation par des eaux usées non-traitées (1899-1999)
- Pollution polymétallique et ancienne **Zn Cu Pb Cr**

horizon de labour (0-50 cm)

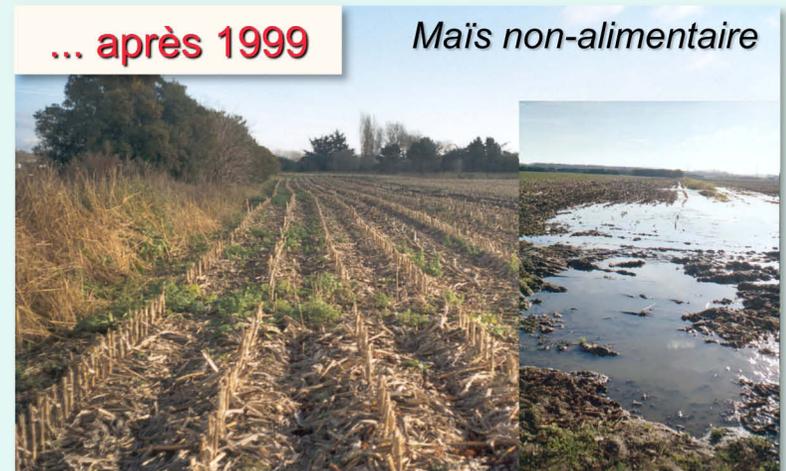
avant 1999 ...

Cultures maraîchères

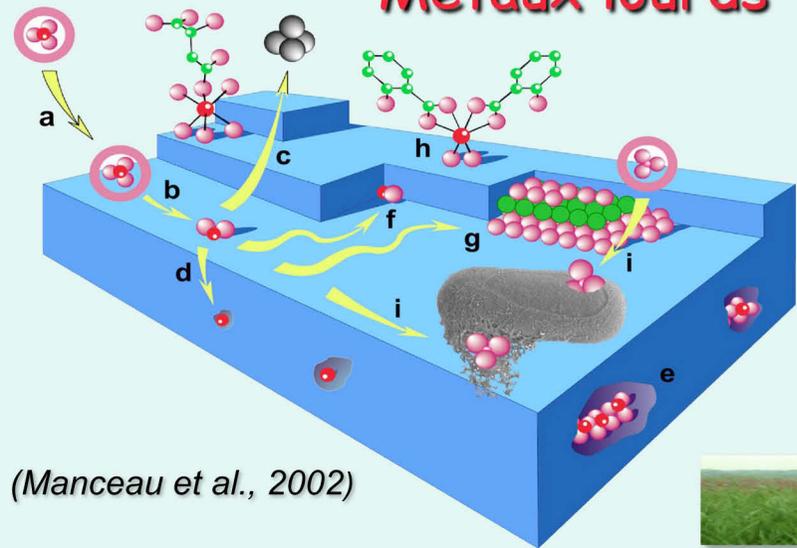


... après 1999

Mais non-alimentaire



# Métaux lourds



(Manceau et al., 2002)

forme chimique  
 ↓  
 solubilité/mobilité  
 ↓  
 biodisponibilité  
 ↓  
 toxicité

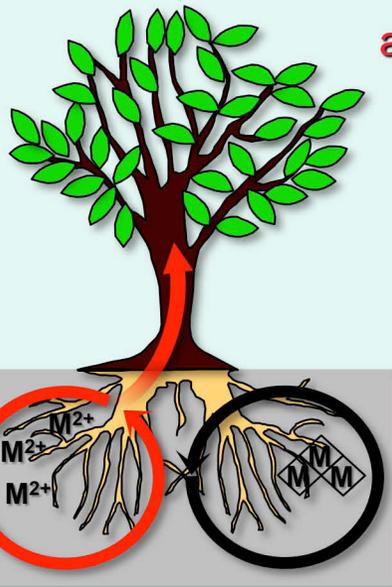
## Traitements classiques

- Stabilisation (40-100 €/t)
  - Lavage (20-700 €/t)
  - Confinement (30-50 €/t)
  - Mise en décharge (50-150 €/t)
  - Incinération (300-1300 €/t)
- (ADEME, 2005)



'phyto' = plante

## Sol-Plante



### phytoextraction

accumulation dans les parties aériennes de la plante

⊖ temps de dépollution

hyperaccumulatrices plantes tolérantes +/- chélatants



*Thlaspi caerulescens*

⊕ accumulation ⊖  
 ⊖ biomasse ⊕



*Brassica juncea*

### phytostabilisation

immobilisation *in situ*

⊖ risque de remobilisation

plantes tolérantes +/- amendements



(Mench et al., 2002)

## Nouvelle approche ?

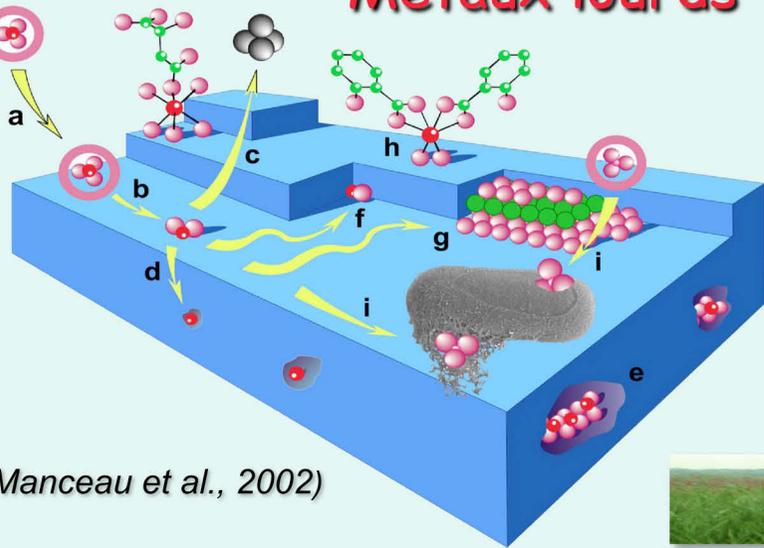
# Métaux lourds



## Traitements classiques

- Stabilisation (40-100 €/t)
  - Lavage (20-700 €/t)
  - Confinement (30-50 €/t)
  - Mise en décharge (50-150 €/t)
  - Incinération (300-1300 €/t)
- (ADEME, 2005)

(Manceau et al., 2002)

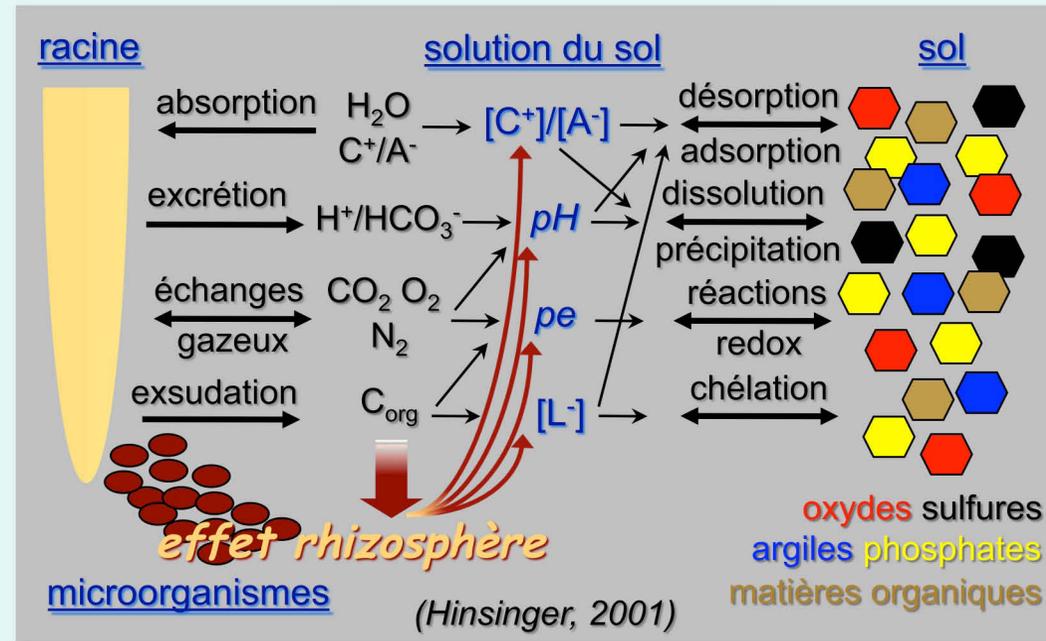
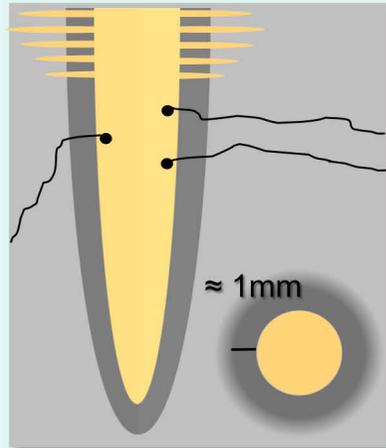
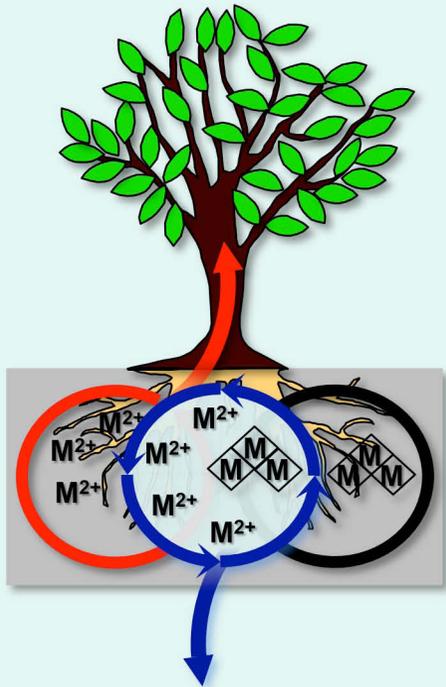


'rhizo' = racine

## Sol-Plante

géométrie variable

**Rhizosphère :** volume de sol autour d'une racine  
 (Darrah, 1993; Hinsinger, 1998) influencé par son activité



phytolixiviation®

Jardins Filtrants®

(Hinsinger, 2001)



Caen (2004)



Honfleur (2005)



## Espaces paysagers pour dépolluer eaux, boues, sédiments, sols ...

depuis 1990 (Site & Concept), 2004 (Phytorestore)

plus de 150 réalisations

- **industriels** (Acetex, Akzo Nobel, Louis Vuitton, Hermès, Coca Cola, Orangina, Arcelor-Mittal, Rhodia, Club Med, Adonis, Carrefour ...)
- **collectivités** (Caen, Alençon, Honfleur, Escamps, Nanterre, Wuhan, Alger, Essaouira, Sao Paulo, Abu Dhabi ...)

Club Med, Ile Maurice (2007)



LVMH (2008)



Parc du Chemin de l'Île, Nanterre (2006)

- clôture de l'axe historique de Paris



## Principes de la conception

- **écosystèmes** artificiels du **milieu humide** recréés dans des **casiers végétalisés** (reconstitution des milieux)
- **biotechniques** associant les végétaux, l'eau et les substrats (génie végétal)
- **plantes de milieux humides** choisies en fonction du lieu d'implantation (préservation des espèces)
- **sites conservatoires** pour la flore et la faune avec des parcours pédagogiques (sauvegarde, sensibilisation)

## « La Bioferme »

### Projet industriel :

Elaboration d'un Centre de **phytorestauration** selon **Jardins Filtrants®** des matrices polluées (sols, sédiments, boues)

phytostore



### Travail de thèse :

Etude pilote de la phytoremédiation par **Jardins Filtrants®** *ex situ* d'un sol contenant une pollution polymétallique (sol issu de la plaine de Pierrelaye)

- Objectifs :
- mise en œuvre de l'approche de la phytoremédiation du sol dans un **JF** grandeur nature
  - compréhension des mécanismes biogéochimiques de remobilisation/immobilisation des métaux lourds (Zn & Cu) impliqués dans la phytoremédiation

# Approche de la phytoremédiation

forme chimique ↔ mobilité ↔ biodisponibilité ↔ toxicité

## phytolixiviation®



Favoriser la **remobilisation** et la **lixiviation** des métaux pour les **extraire** du sol, puis les **piéger** dans un filtre en tourbe

## 1. Plantes hélophytes

**de milieux humides**

➤ systèmes racinaires grands, traçants et ramifiés

⊕ volume de la rhizosphère

⊕ productivité biologique

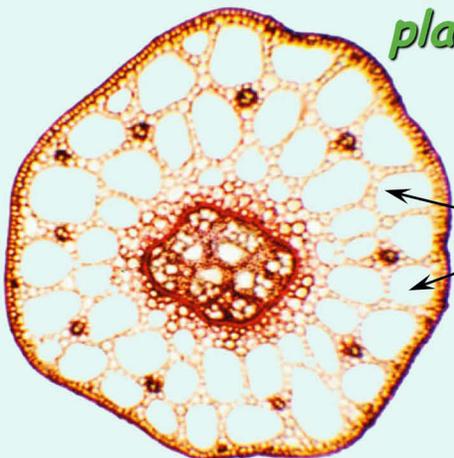
➤ tolérance vs. métaux

➤ adaptation aux conditions d'hydromorphie

⊕ rhizomes et racines adventives

⊕ transport interne et libération de O<sub>2</sub> par les racines via aéroenchymes (1-45 g/m<sup>2</sup>/jour) dans la rhizosphère

**plantes de milieux humides**



aéroenchymes

O<sub>2</sub> libre  
dans la rhizosphère



*Iris pseudacorus*



*Phragmites australis*



*Salix viminalis*



## Approche de la phytoremédiation

forme chimique ↔ mobilité ↔ biodisponibilité ↔ toxicité

**phytolixiviation®**

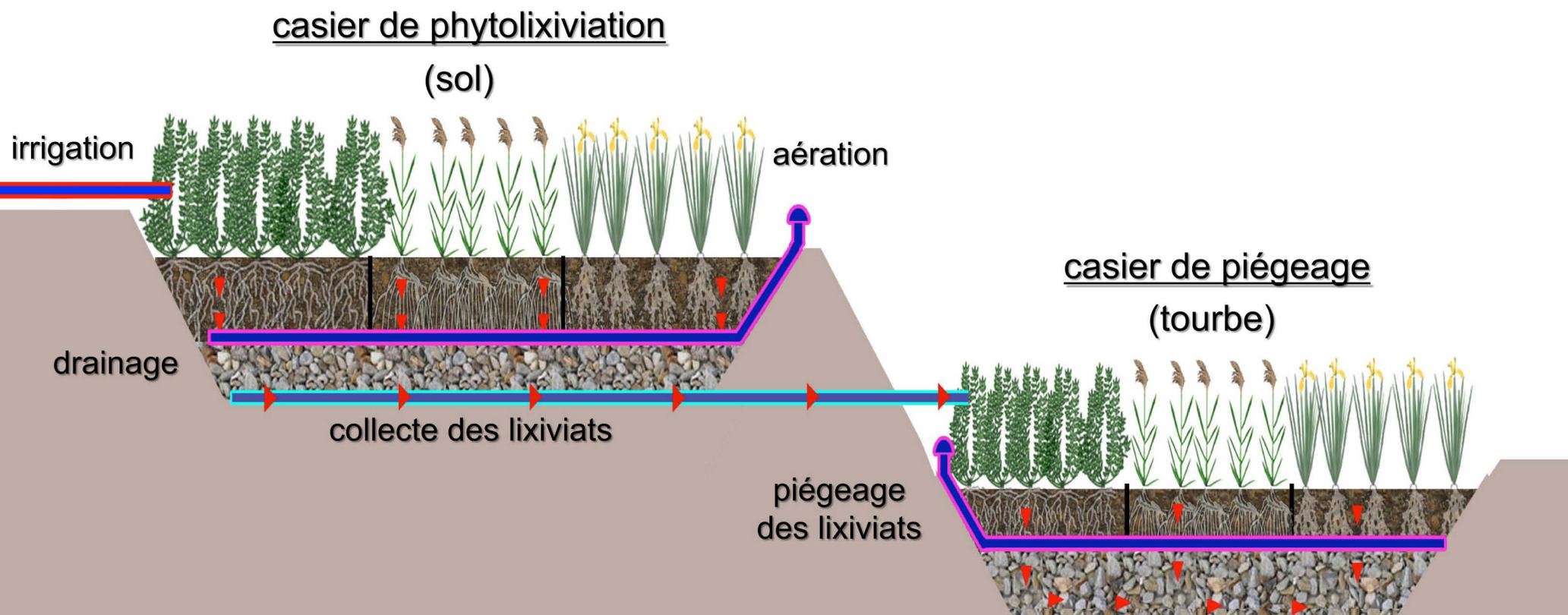


Favoriser la **remobilisation** et la **lixiviation** des métaux pour les **extraire** du sol, puis les **piéger** dans un filtre en tourbe

**2. Casiers étanches** ➤ volumes de sol délimités, comparables au volume de systèmes racinaires

⊕ volume de sol soumis à l'influence des racines (près de 100 %)

⊕ lixiviation des métaux du sol, puis leur piégeage dans un filtre (tourbe)



## Approche de la phytoremédiation

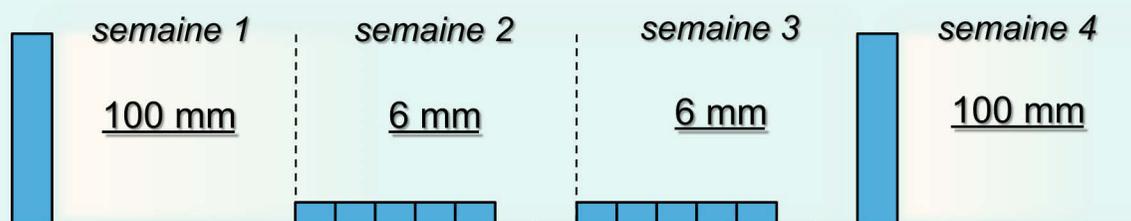
forme chimique ↔ mobilité ↔ biodisponibilité ↔ toxicité

### phytolixiviation®

Favoriser la **remobilisation** et la **lixiviation** des métaux pour les **extraire** du sol, puis les **piéger** dans un filtre en tourbe

### 3. Irrigation

➤ alternance : inondation (réduction) / assèchement (oxydation)



⊕ facteurs physico-chimiques du milieu : stimuli pour les plantes

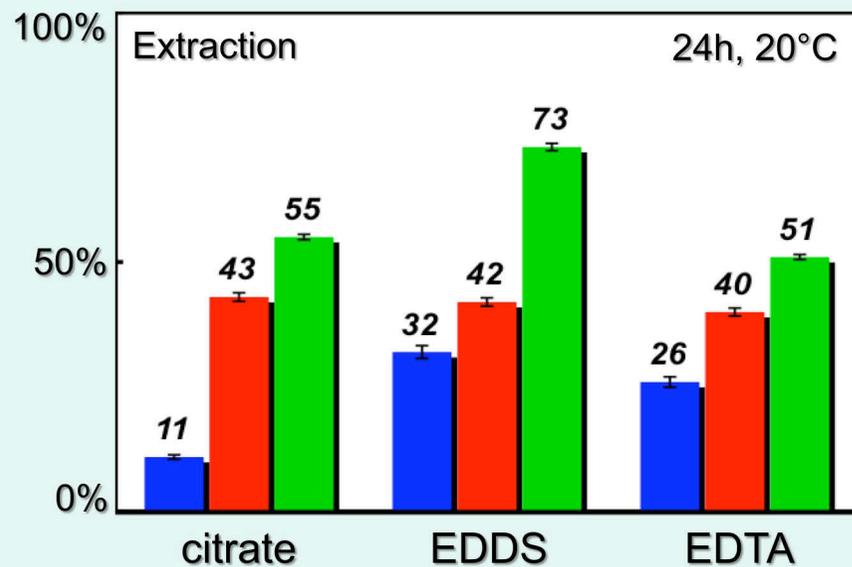
⊕ déstabilisation des formes sensibles au redox (oxydes de Fe, Mn, matière organique ...)

### Chélatant

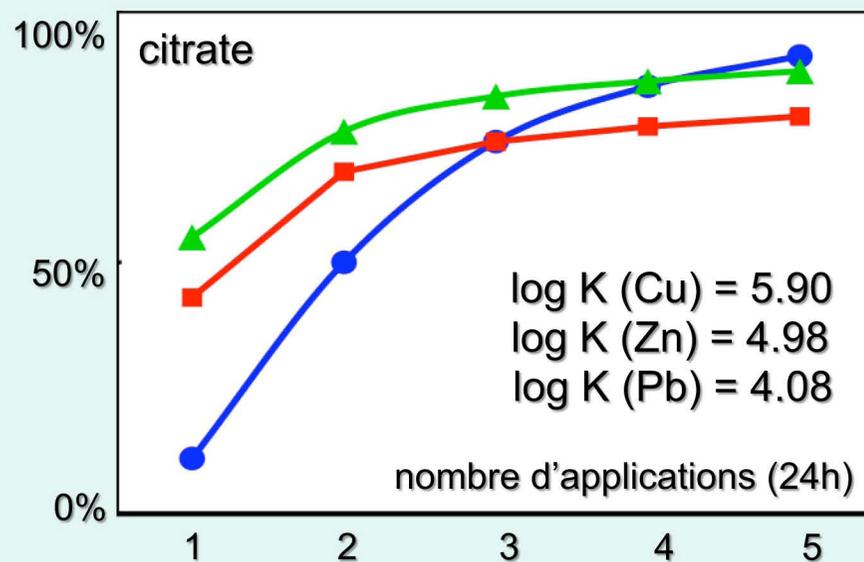
➤ citrate

⊕ formation des complexes métal-citrate solubles

⊕ bonne biodégradabilité, faible coût



Cu  
Zn  
Pb



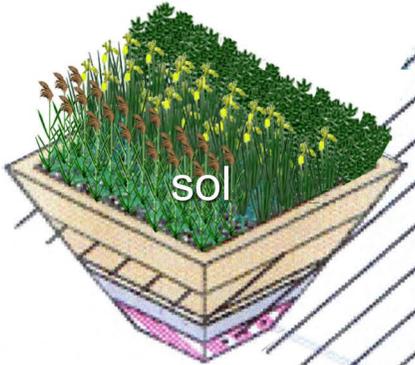
# Site pilote



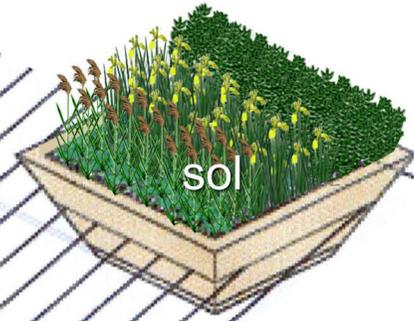
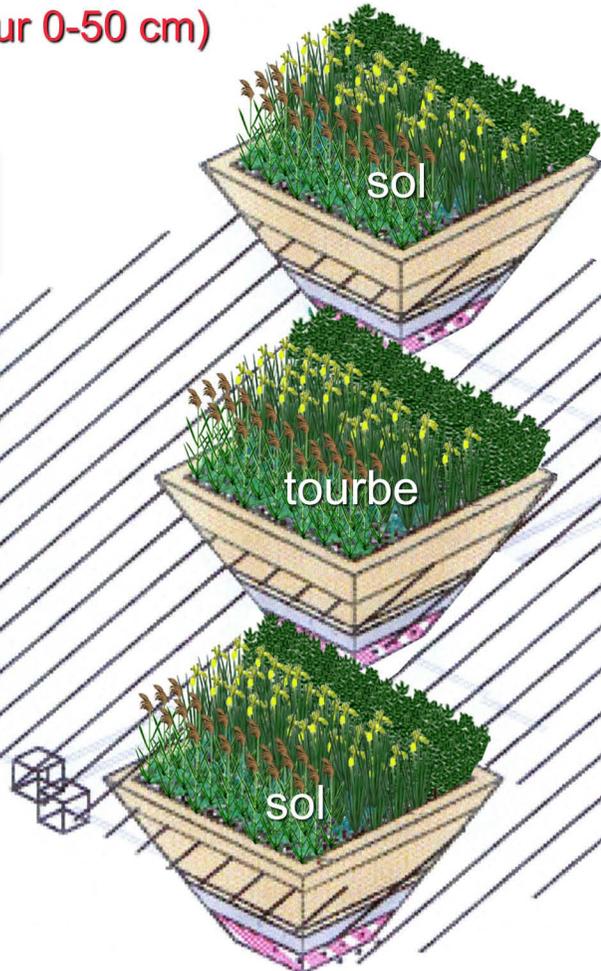
22 m<sup>3</sup> de sol (horizon de labour 0-50 cm)

irrigation 100 mm  
(fréquence bimensuelle)

irrigation 100 mm  
(fréquence bimensuelle)



casier  
« Témoin »



casier  
« Citrate »

+ traitement au citrate  
(1 mois)

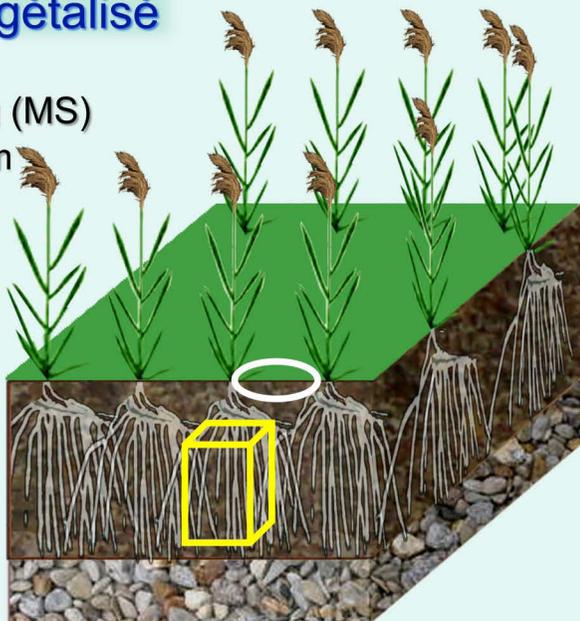
# Démarche analytique



## Quels sont les mécanismes mis en jeu ?

### compartiment végétalisé

volume de sol 1.8 m<sup>3</sup>  
 masse de sol 1881 kg (MS)  
 épaisseur de sol 0.5 m  
 10 plantes (2 p/m<sup>2</sup>)



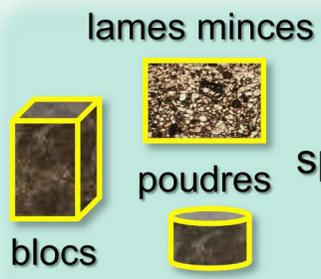
sol en surface  
(hors racines)

sol colonisé  
par racines

## Identification et quantification des formes chimiques (spéciation)



des métaux dans la phase solide du sol  
 avant et après phytoremédiation



### approche moléculaire

microfluorescence X (μSXRF)  
 spectroscopie d'absorption X (EXAFS)  
 microdiffraction X (μXRD)

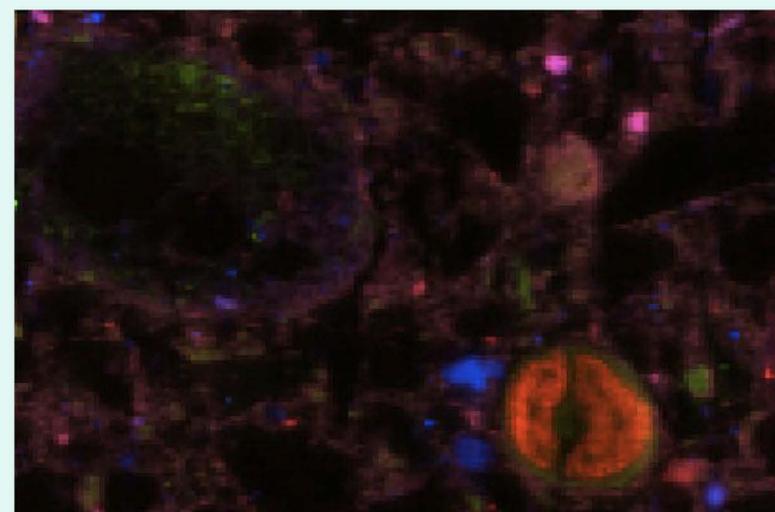
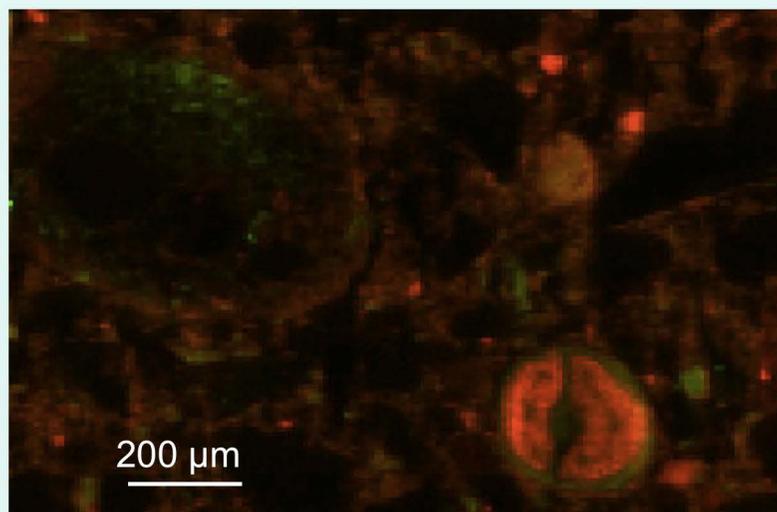
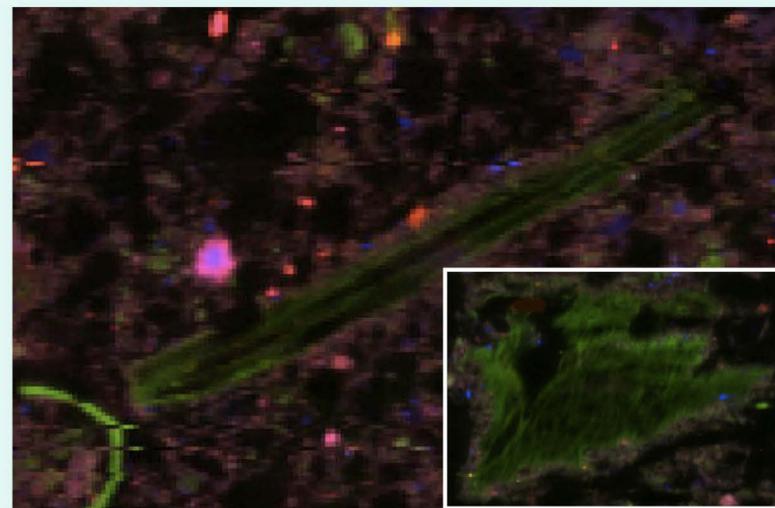
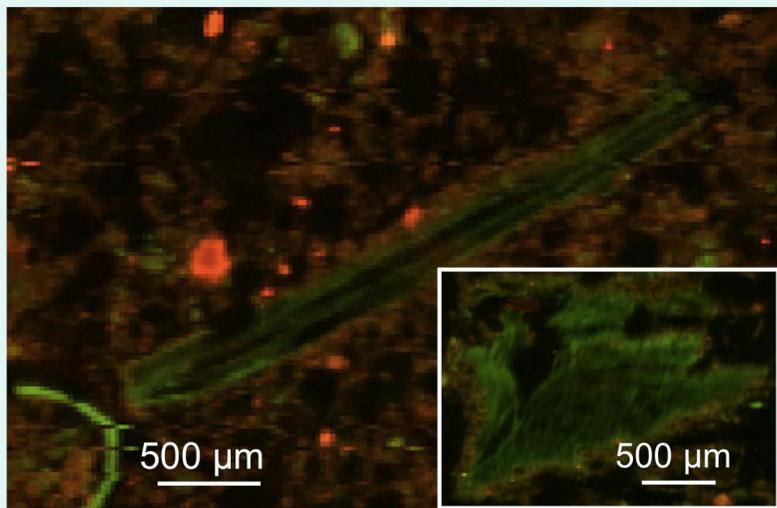
sources synchrotron : ALS de Berkeley  
 ESRF de Grenoble

# Associations géochimiques

μSXRF

Zn Cu

Zn Cu Fe

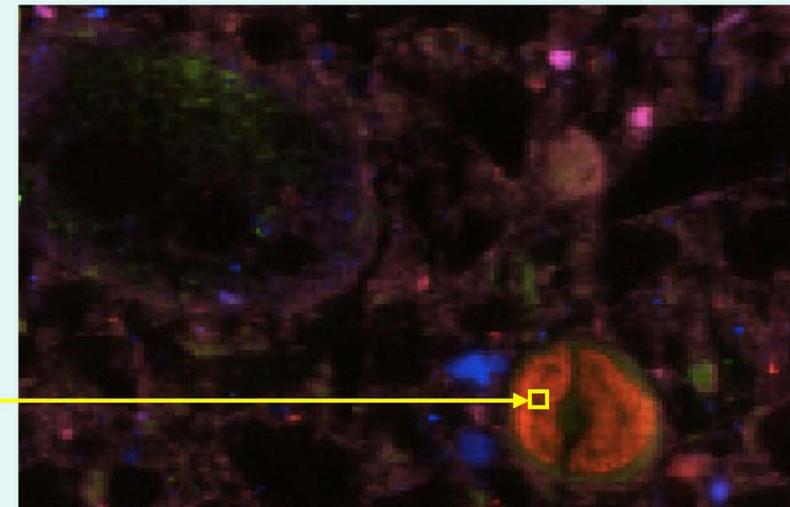
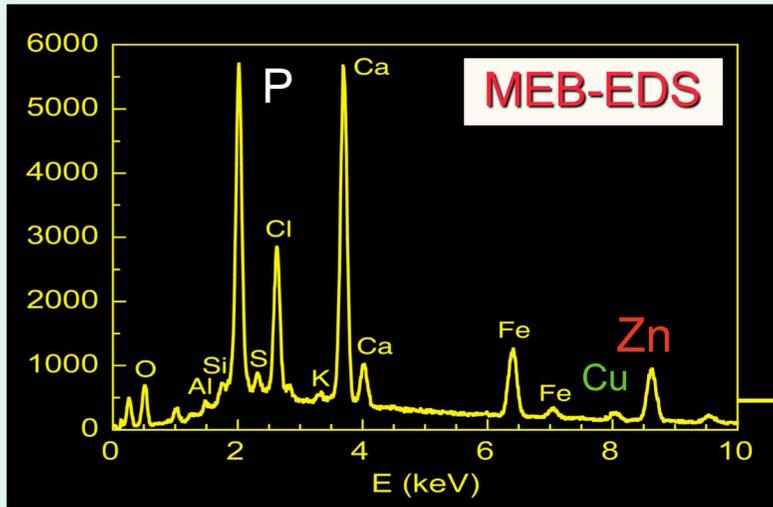
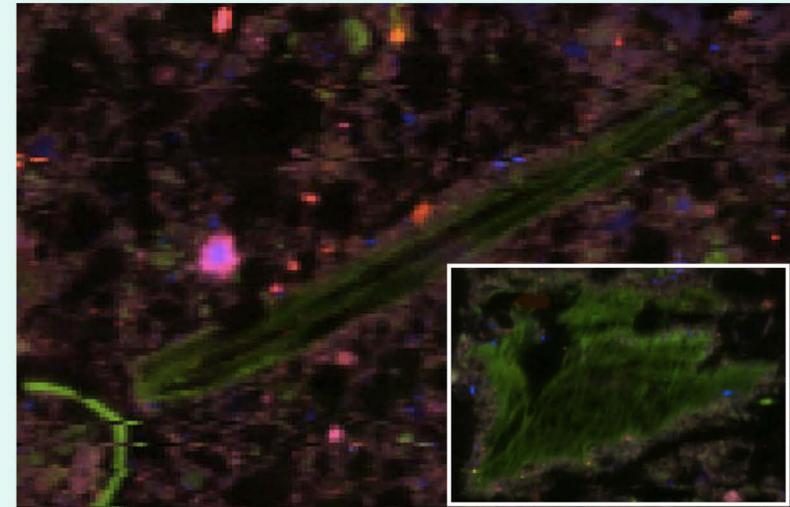
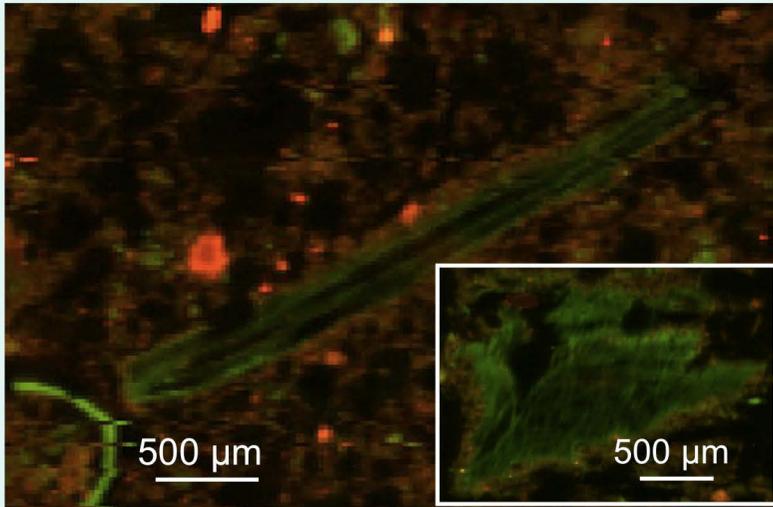
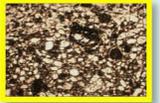


# Associations géochimiques

μSXRF

Zn Cu

Zn Cu Fe



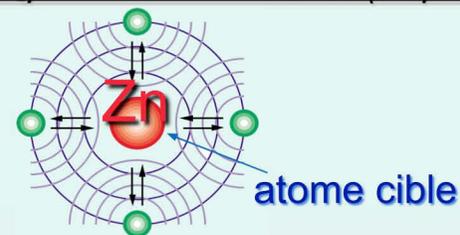
➔ Zn-Fe, Zn-matrice argileuse, Zn-P  
Cu-particules organiques

Sous quelle(s) forme(s) ?

# Formes chimiques

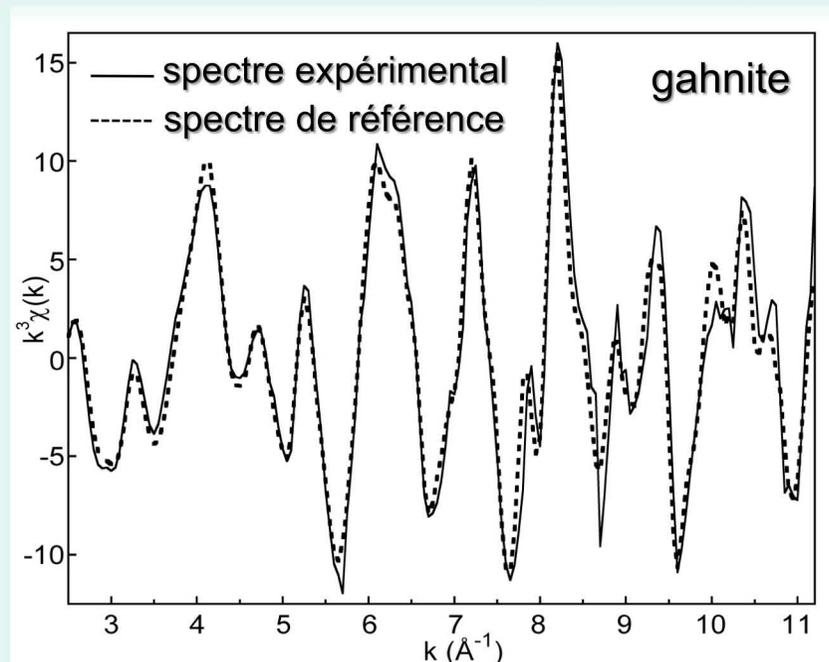
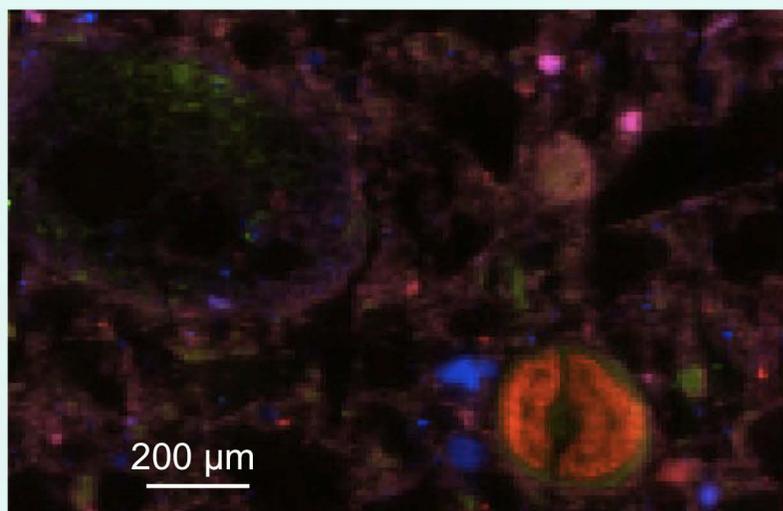
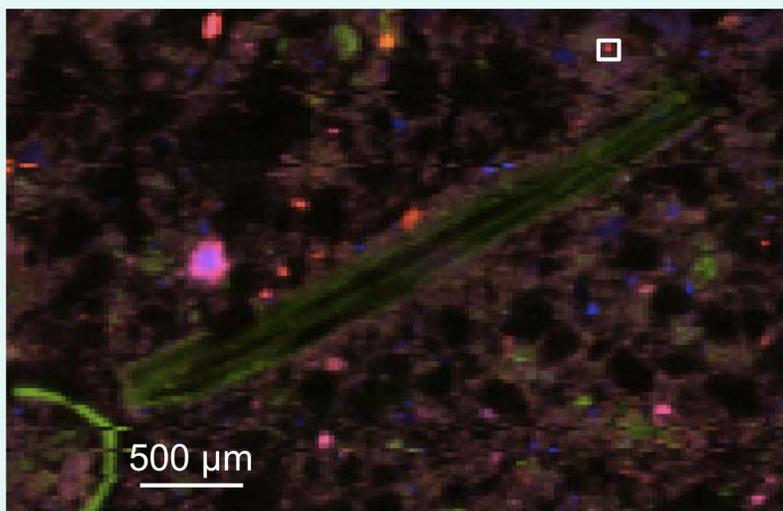
Zn Cu Fe

$\mu$ EXAFS



## Spectre EXAFS :

signature spectrale de l'environnement chimique et structural de l'élément cible à l'échelle atomique ( $\approx 3-4 \text{ \AA}$ )



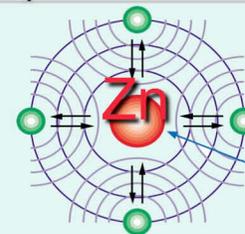
Espèce pure

Comparaison du spectre expérimental avec le spectre du composé de référence

**gahnite ( $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$ )**

# Formes chimiques

Zn Cu Fe



atome cible

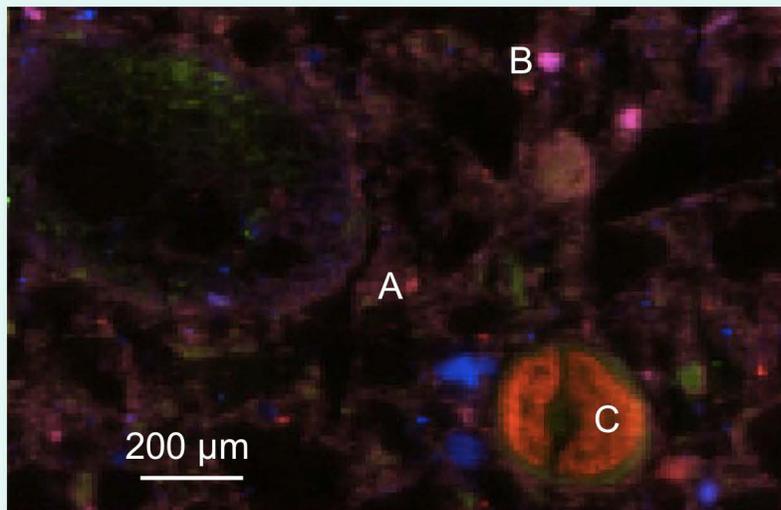
**μEXAFS**



Mélanges d'espèces

Simulations par  
combinaison linéaire

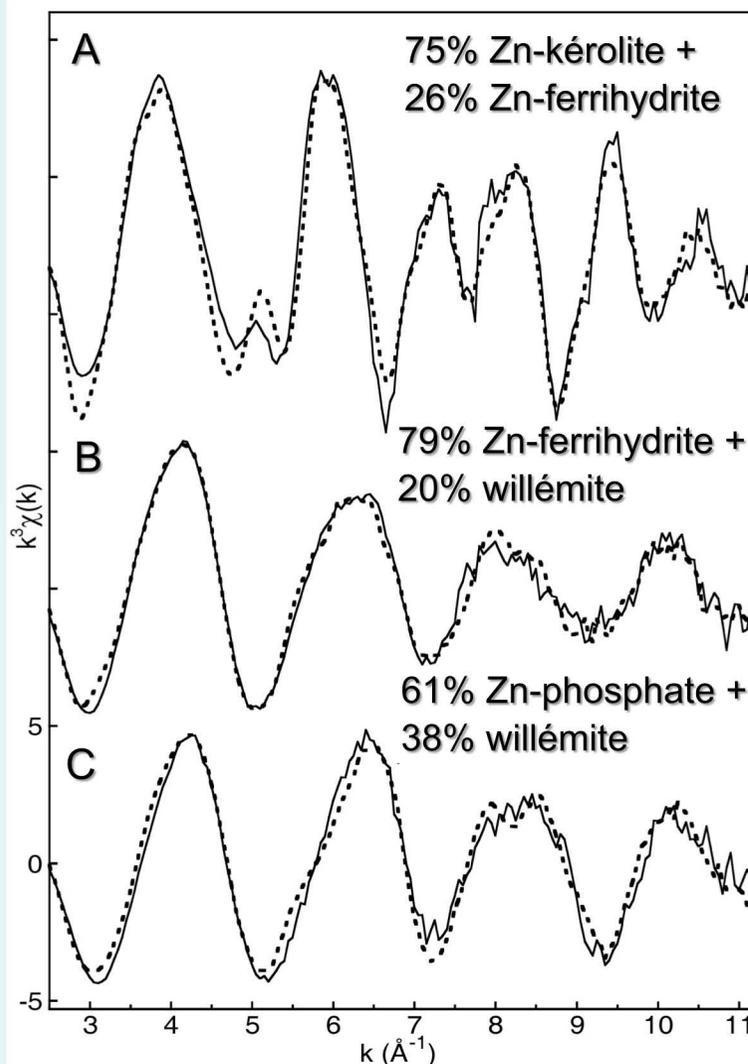
Analyse en  
Composantes  
Principales (ACP)  
sur l'ensemble des  
spectres  
expérimentaux



μEXAFS + ACP

5 formes de Zn :

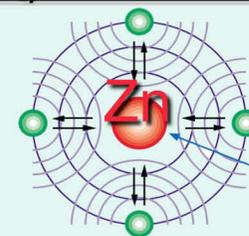
- Zn-ferrhydrite (oxyde de Fe)
- Zn-phosphate
- Zn-kérolite (phyllosilicate)
- willémite ( $Zn_2SiO_4$ )
- gahnite ( $ZnAl_2O_4$ )



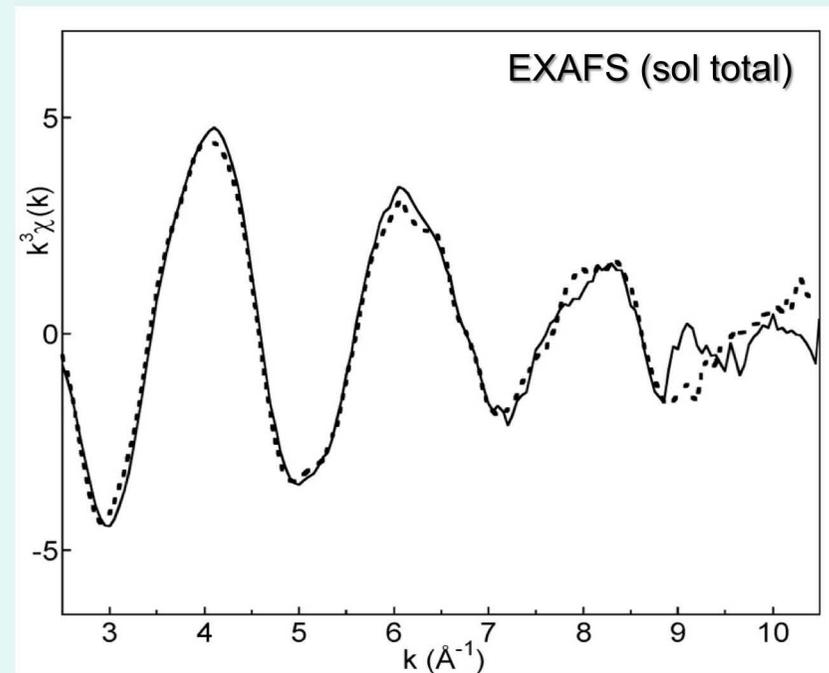
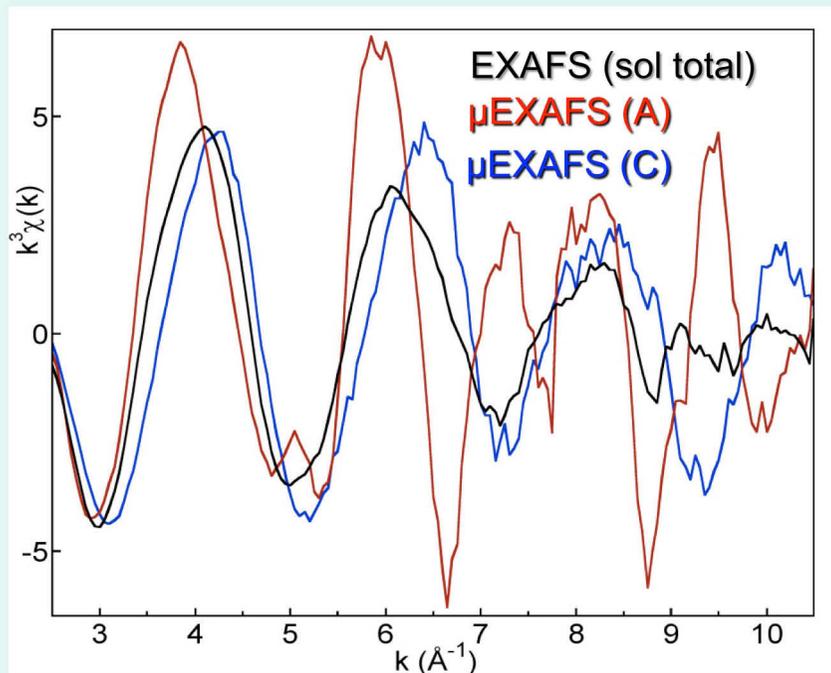
Quelles sont leurs proportions dans le volume de sol ?

## Quantification des formes

EXAFS



Enregistrement du spectre EXAFS de l'échantillon moyen de sol (poudre) avec un faisceau millimétrique



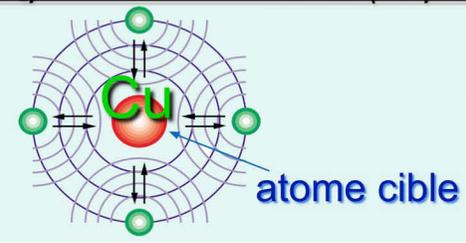
Spéciation moyenne de Zn :  
(précision ± 10 % de Zn total)

- Zn-ferrhydrite (oxyde de Fe) ≈ 30 %
- Zn-phosphate ≈ 28 %
- Zn-kérolite (phyllosilicate) ≈ 24 %
- willémite (Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) ≈ 11 %
- gahnite (ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) < 10 %



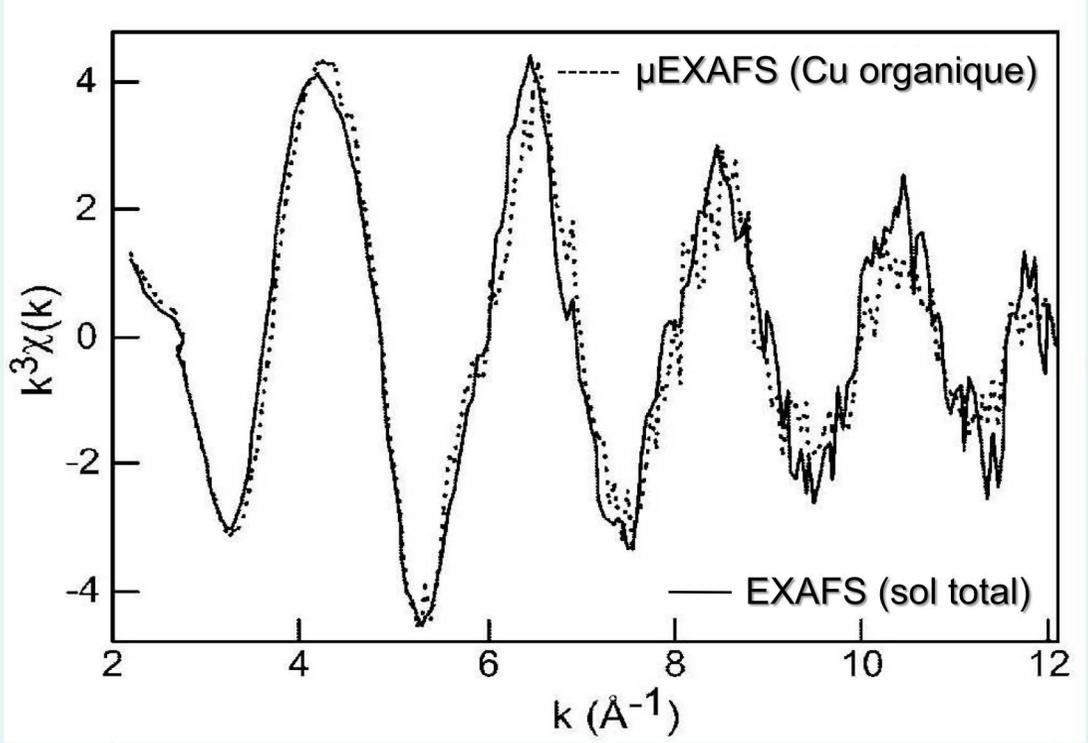
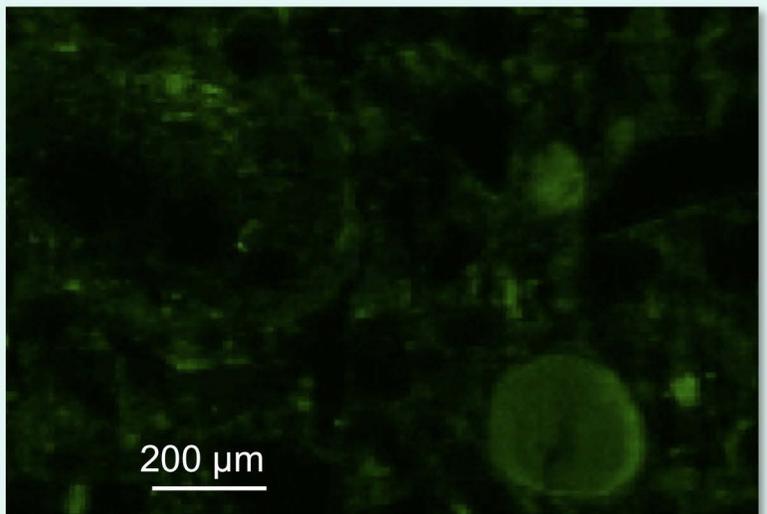
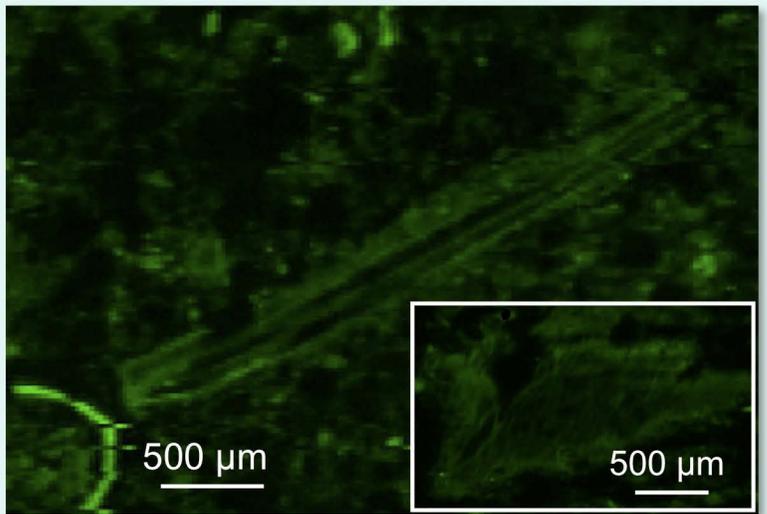
Zn est principalement sous formes minérales secondaires

# Spéciation de Cu



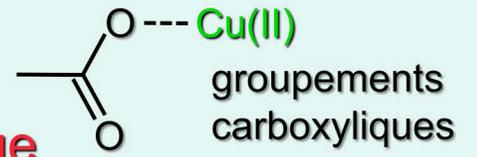
**μEXAFS**  
**EXAFS**

Cu



Tous les spectres μEXAFS sont similaires et se superposent au spectre EXAFS

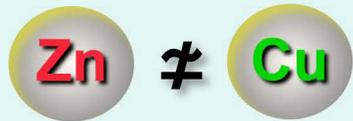
Cu organique : Cu(II)-MO  $\approx 100 \%$



Cu est sous une seule forme : Cu organique



## Spéciation initiale



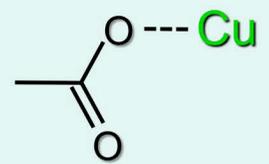
- même source
- différentes affinités
- différentes formes



ne sont pas corrélés au niveau moléculaire

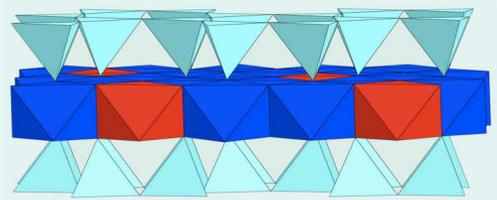


*uniforme & organique*  
Cu-MO ≈ 100 %



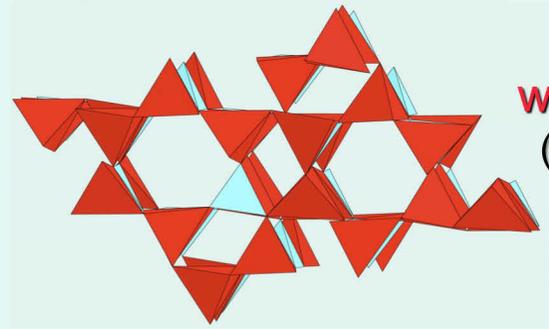
*multiforme & minéral*

**Zn-ferrhydrite (oxyde Fe) ≈ 30 %**  
(5Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O)  
- minéral secondaire  
- mal cristallisé, métastable



**Zn-phyllosilicate (kérolite) ≈ 24 %**  
(Si<sub>4</sub>(Mg<sub>1.65</sub>Zn<sub>1.35</sub>)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O)  
- minéral secondaire  
- faible solubilité

**Zn-phosphate ≈ 28 %**  
(Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O)  
- minéral secondaire  
- faible solubilité



**willémite ≈ 11 %**  
(Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)

- minéraux primaires
- faible solubilité

**gahnite < 10 %**  
(ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)

Que deviennent les métaux dans nos casiers ?

# Effets de la phytoremédiation

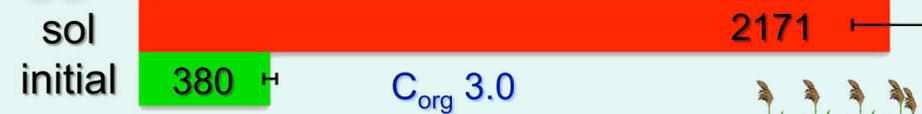
concentrations

avant traitement

Casier Témoin

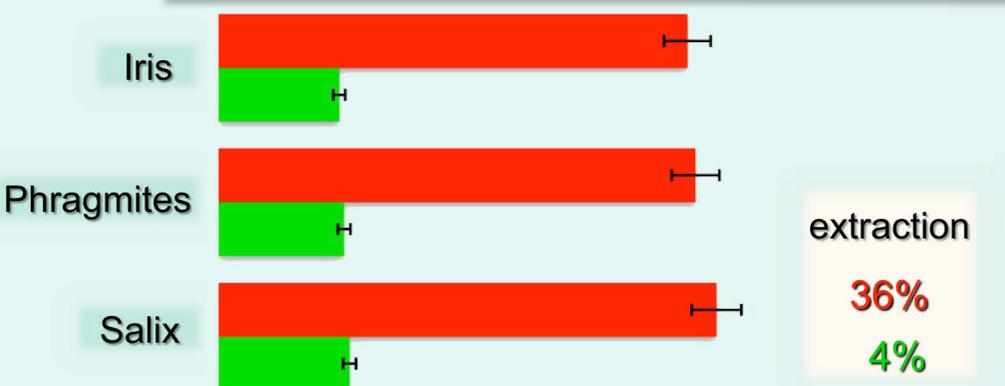
Zn Cu

Casier Citrate

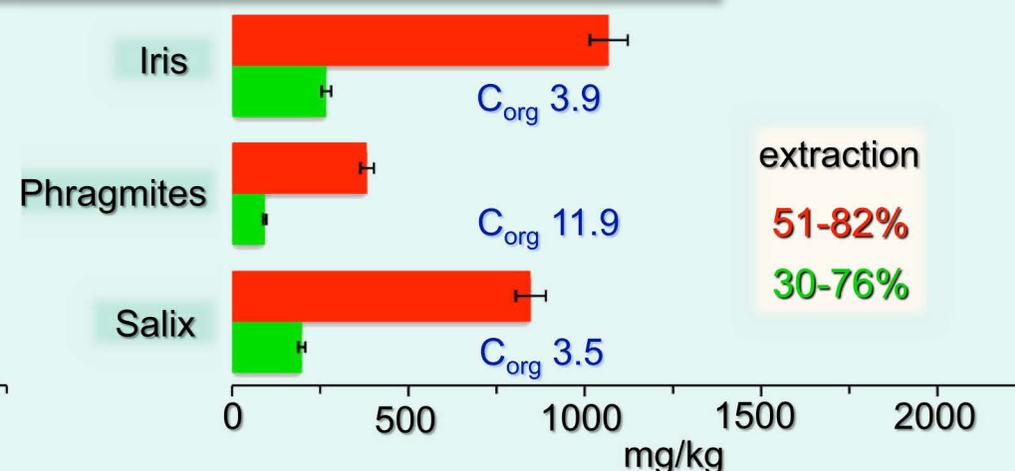
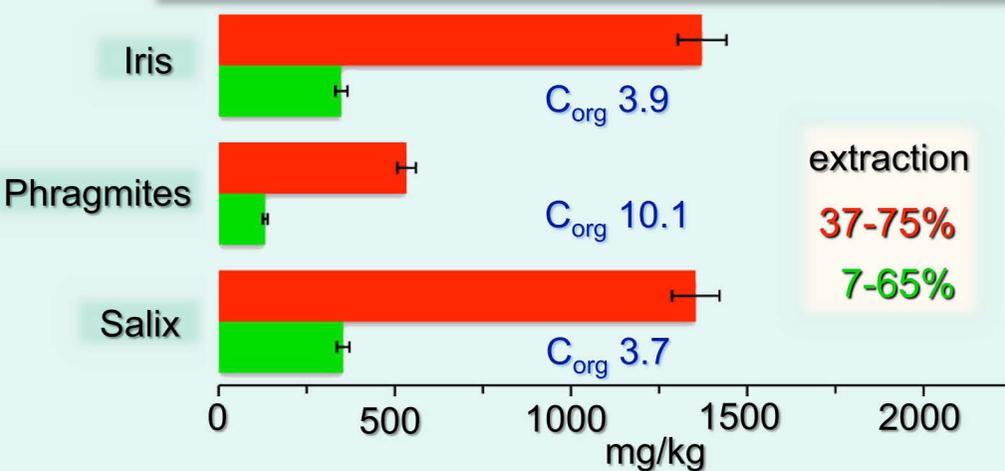


après traitement

sols en surface



sols colonisés par les racines



Remobilisation des métaux

Quels sont les effets sur la spéciation ?

# Effets de la phytoremédiation

## spéciation



*Iris pseudacorus*

Zn Cu Ca

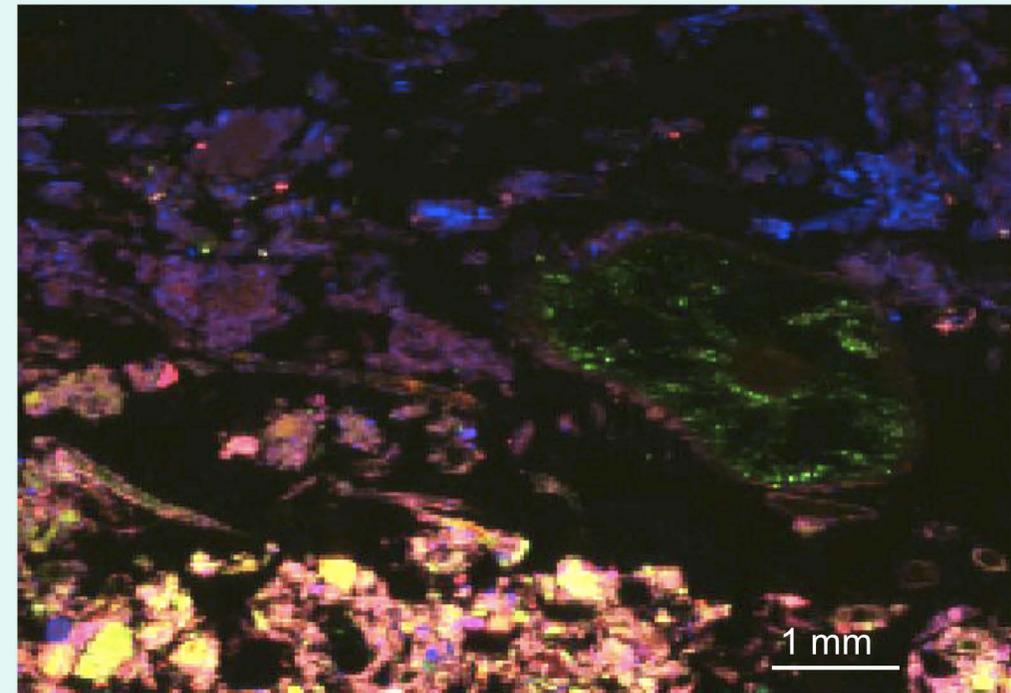
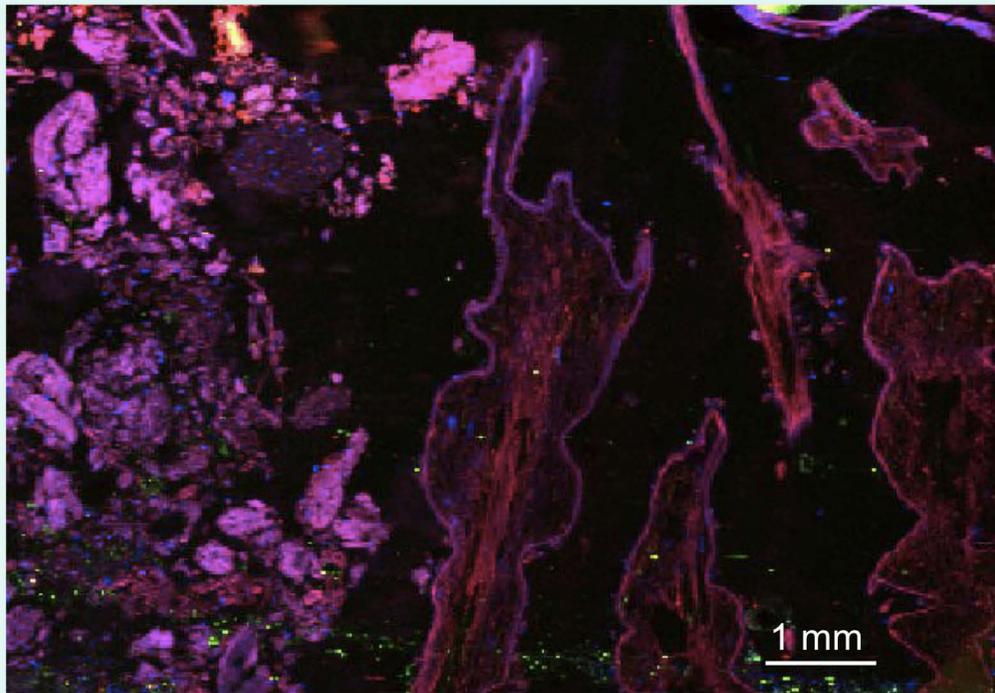


rhizosphère mise en lumière (X)



*Phragmites australis*

Zn Cu Fe



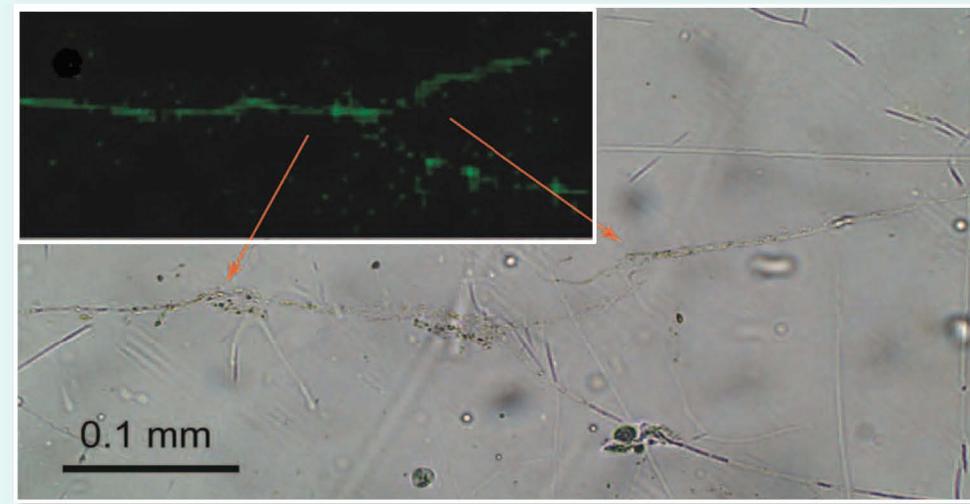
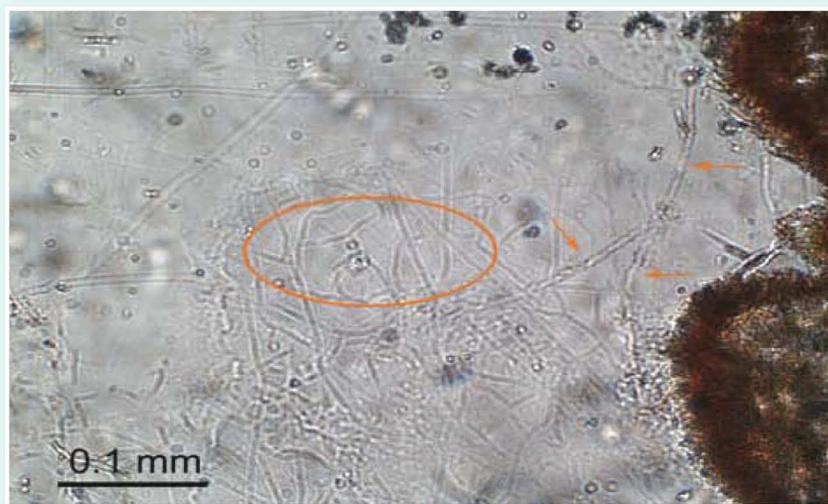
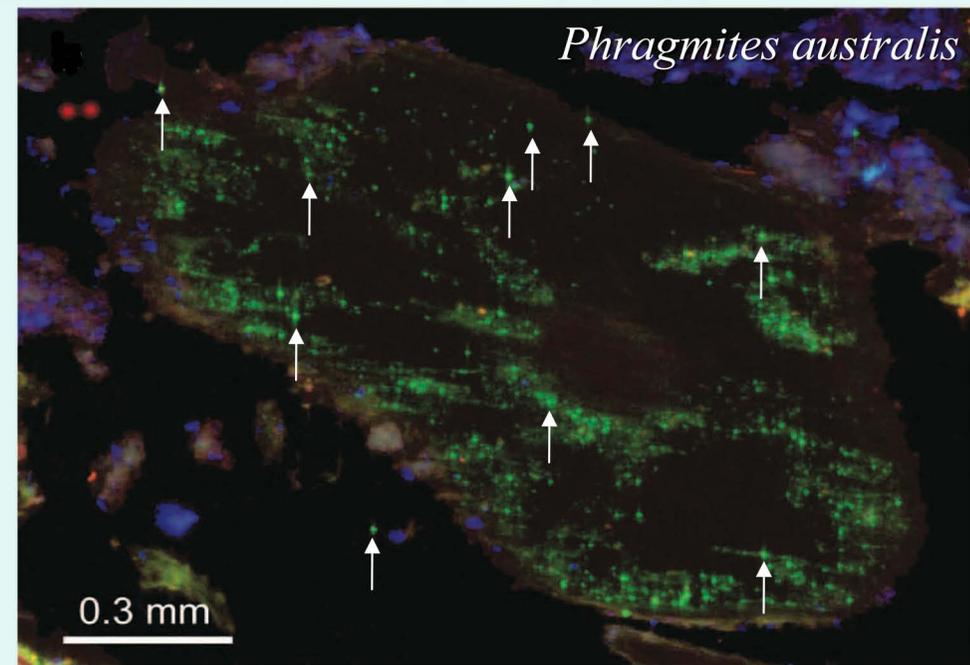
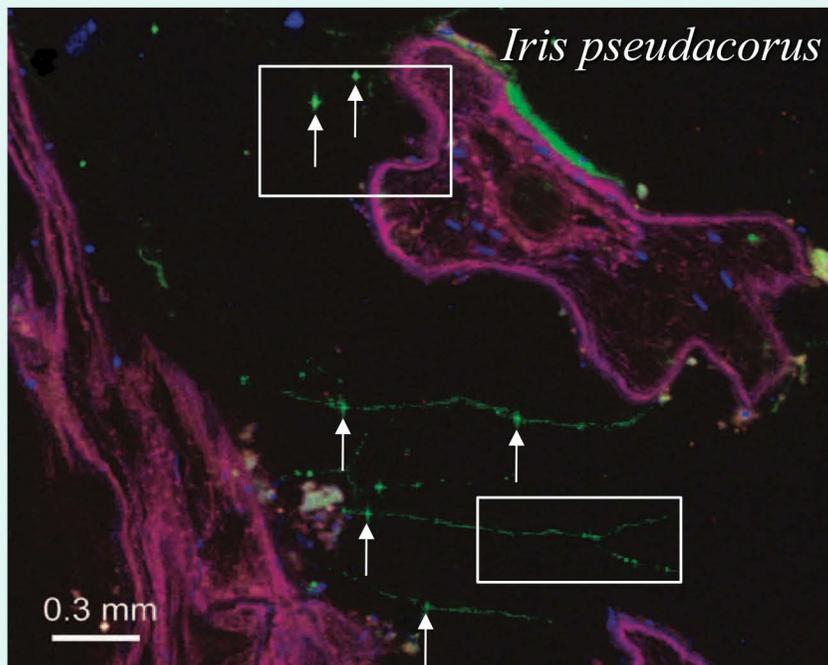
➔ **Activité racinaire modifie la distribution des métaux**

Changements des formes ?

Zn Cu Ca

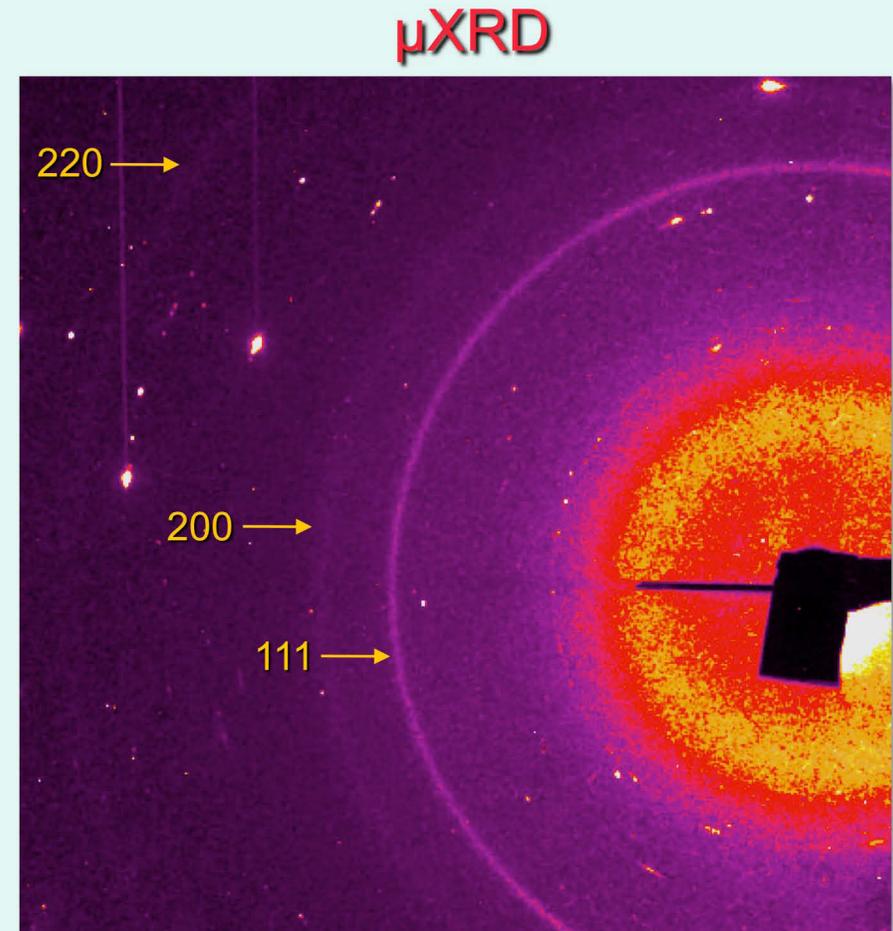
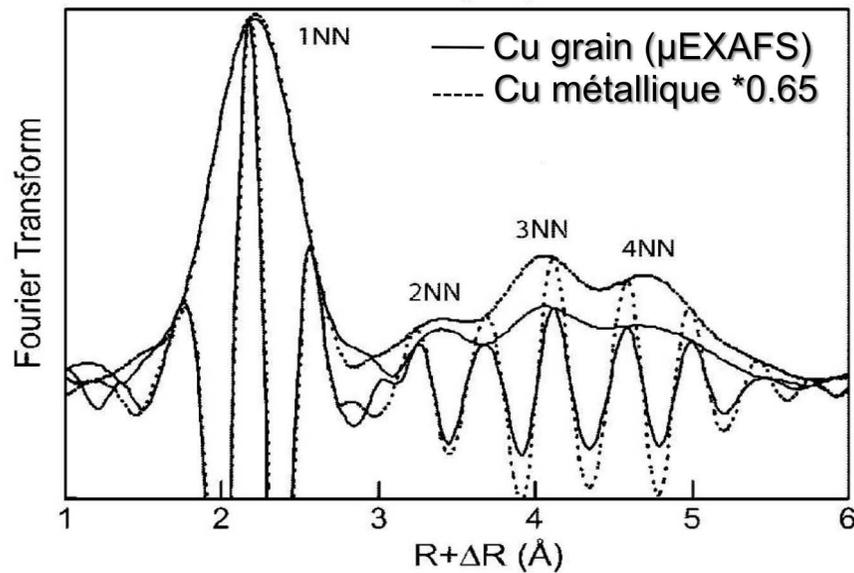
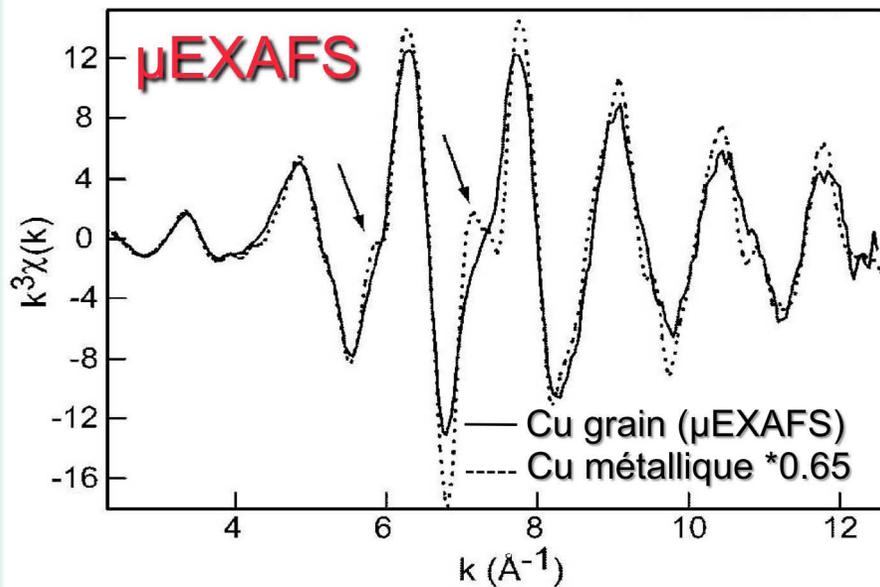
Spéciation de Cu

Zn Cu Ca



Grains de Cu à l'intérieur et à l'extérieur des racines (avec mycorrhizes)

## Spéciation de Cu

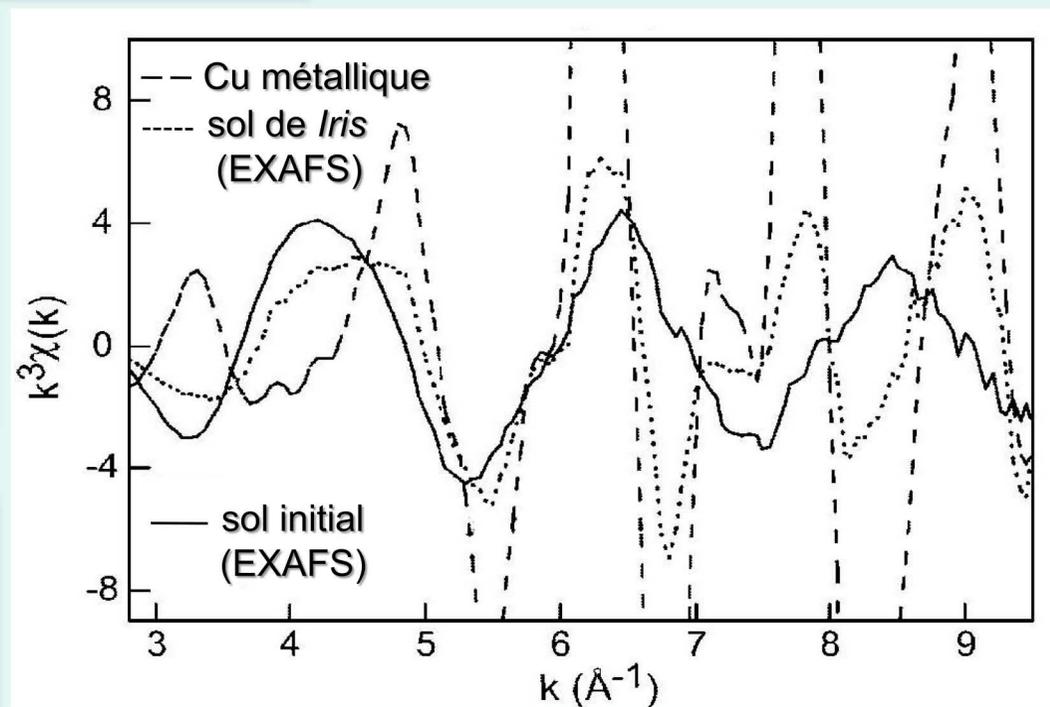
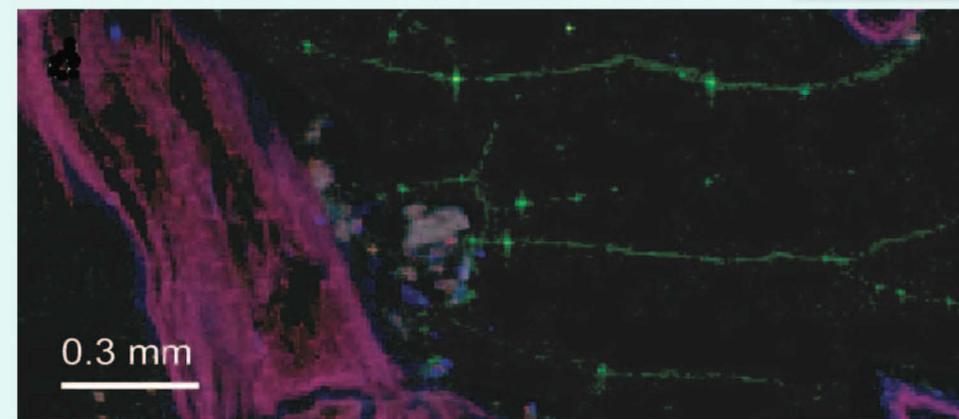


Grains micrométriques de Cu sont des agrégats constitués de nanoparticules de Cu métallique



**Néoformation de Cu métallique à l'interface sol-racine**

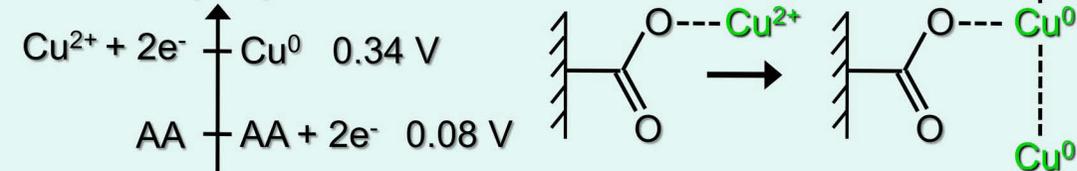
## Spéciation de Cu



### Mécanisme : *défense biologique*

rhizosphère oxygénée (O<sub>2</sub> ↗ par racines)  
 → oxydation/décomposition de MO  
 → excès de [Cu<sup>2+</sup>] toxique → détoxification Cu<sup>0</sup>  
**bioréduction/biominéralisation**

### Modèle proposé :



antioxydant (acide ascorbique AA)  
 substrat cellulaire (racines, hyphes)  
 catalyseur (MO)

sol initial : **Cu(II)-MO** 100 ± 10 %  
 (380 ± 57 mg/kg)

sol de Iris :

<b>Cu(II)-MO</b> 80 ± 10 %	<b>Cu(0)</b> 20 ± 10 %
(279 ± 52 mg/kg)	(70 ± 52 mg/kg)

≈ 18 % du stock initial

➔ Ces plantes de milieux humides transforment Cu en particules métalliques en quantité importante

Zn Cu Fe

# Spéciation de Zn

Zn<sup>0</sup> pur

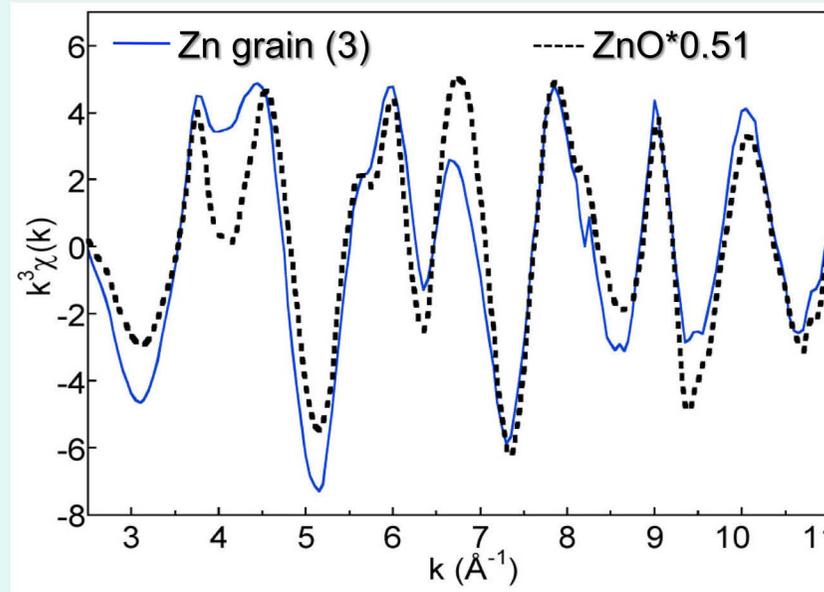
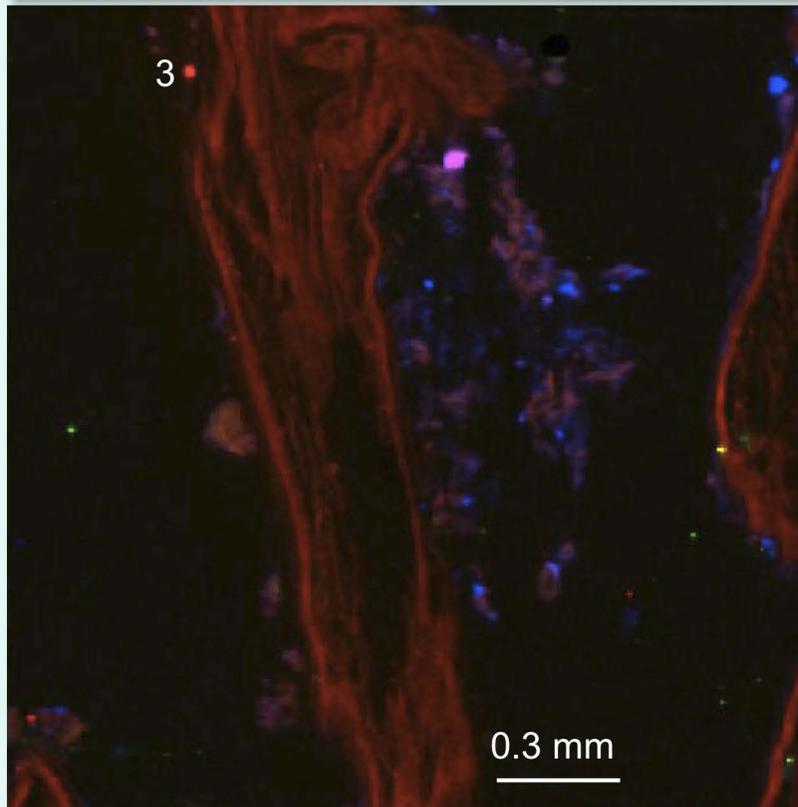
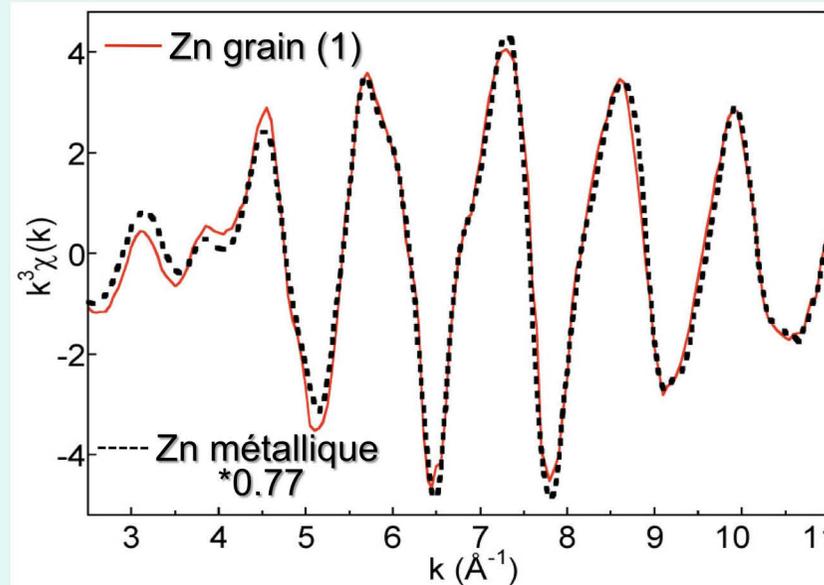
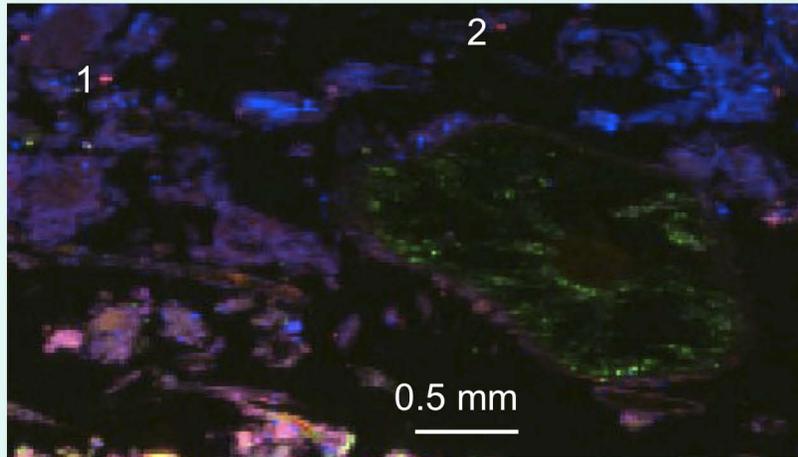
microcristallin

à < 2 mm  
de la racine

ZnO pur

nanocristallin

à la surface  
de la racine



Zn Cu Fe

# Spéciation de Zn

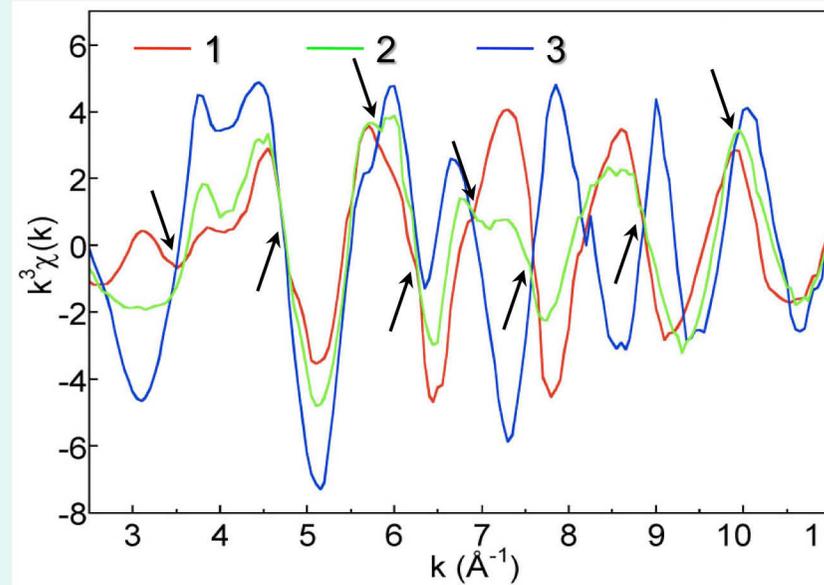
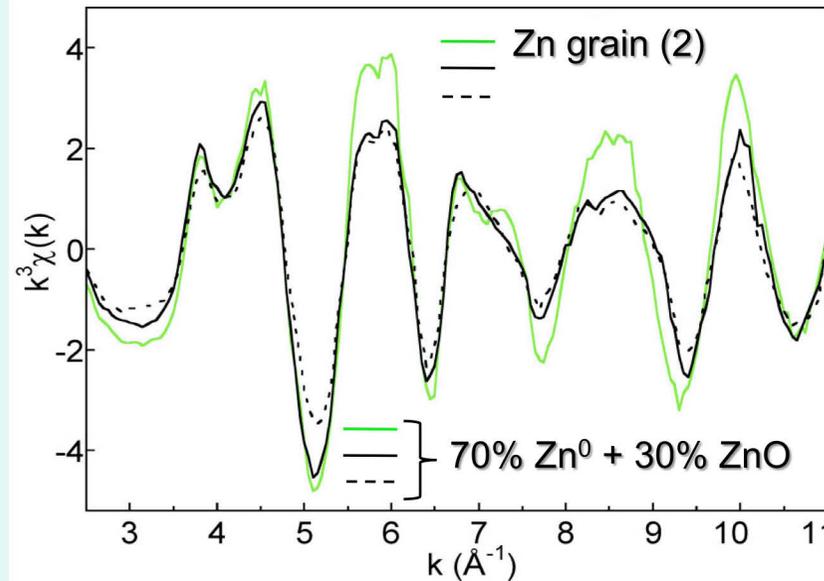
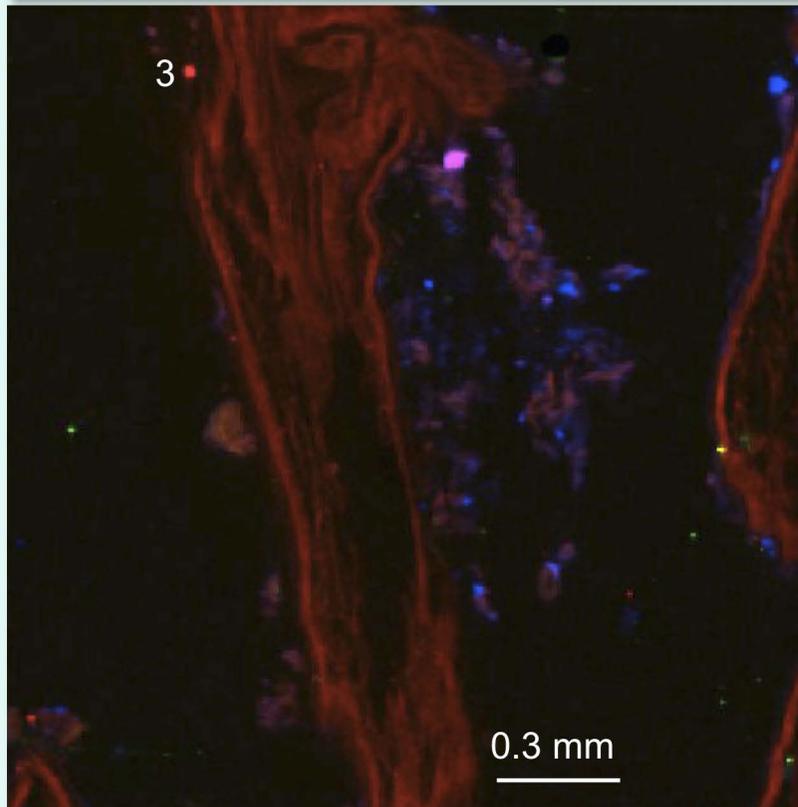
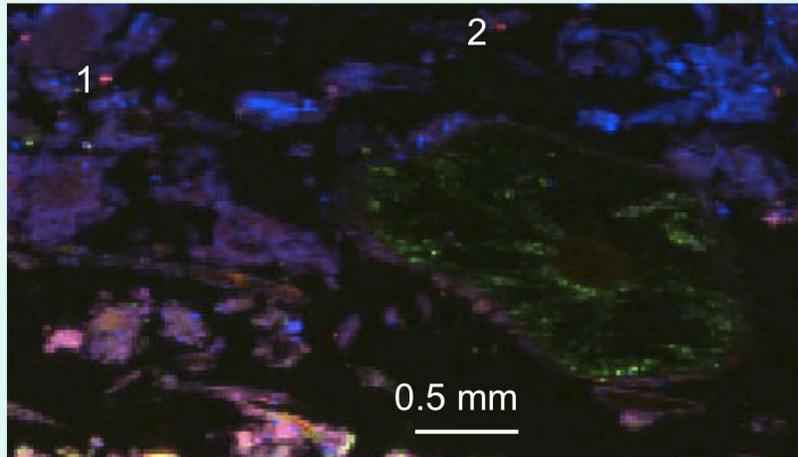
mélanges  
Zn<sup>0</sup>-ZnO

crystallinité  
moyenne variable

système binaire  
Zn<sup>0</sup>-ZnO :  
Zn(2) =  $\alpha$ Zn(1) +  $\beta$ Zn(3)

proportions  
variables

oxydation de Zn<sup>0</sup>  
en fonctions des  
conditions locales



## Spéciation de Zn

Zn<sup>0</sup> Zn<sup>0</sup>-ZnO ZnO

Formation ?

- nouvelles espèces
- coexistence à l'échelle de quelques dizaines μm
  - ➔ forte hétérogénéité des conditions locales dans la rhizosphère

Zn<sup>0</sup>-ZnO oxydation de surface des particules Zn<sup>0</sup>

- taux d'oxydation de Zn<sup>0</sup> variable
- cristallinité variable
  - ➔ différentes voies d'évolution des particules Zn<sup>0</sup> en fonction des conditions locales



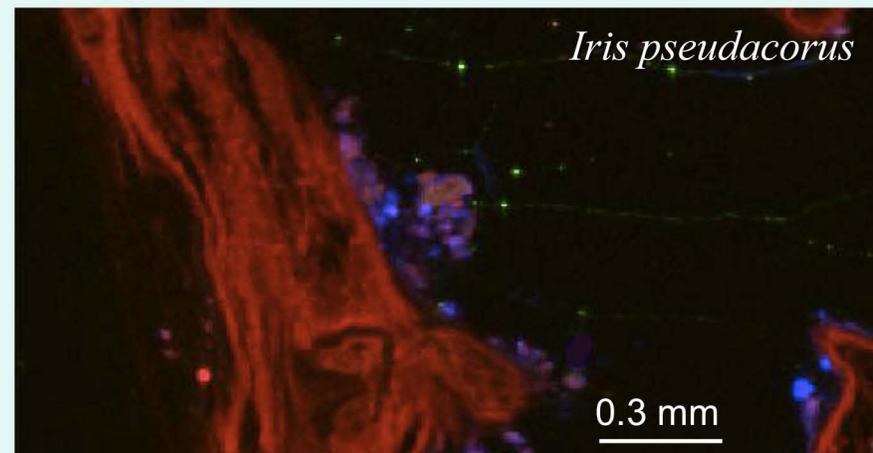
Zn<sup>0</sup> mécanisme possible : bioréduction

- Cu<sup>0</sup> et Zn<sup>0</sup> n'ont pas la même distribution
  - ➔ bioréduction n'implique pas les mêmes agents (?)

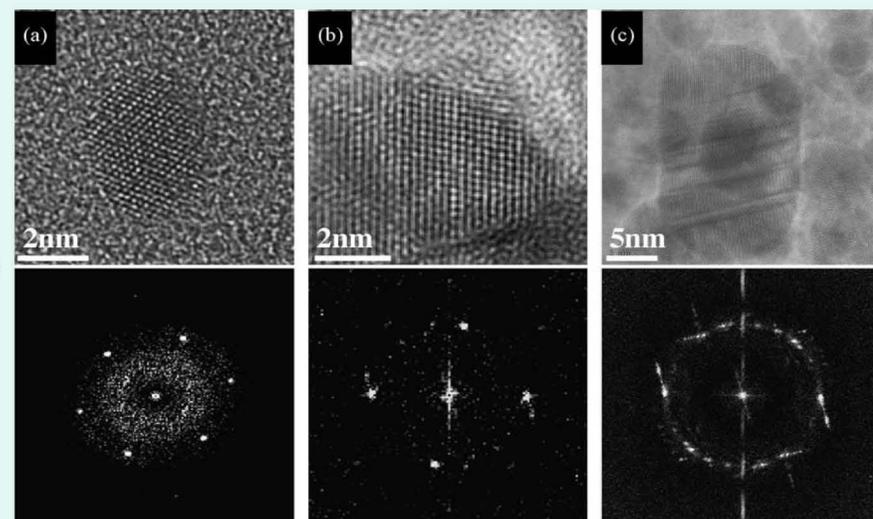


(Sun and Pad, 2004/ J. Mater. Res. 19)

Zn Cu Fe



Nanoparticules Zn<sup>0</sup> formées au contact de la biomasse sèche de *Medicago sativa* (alfalfa)

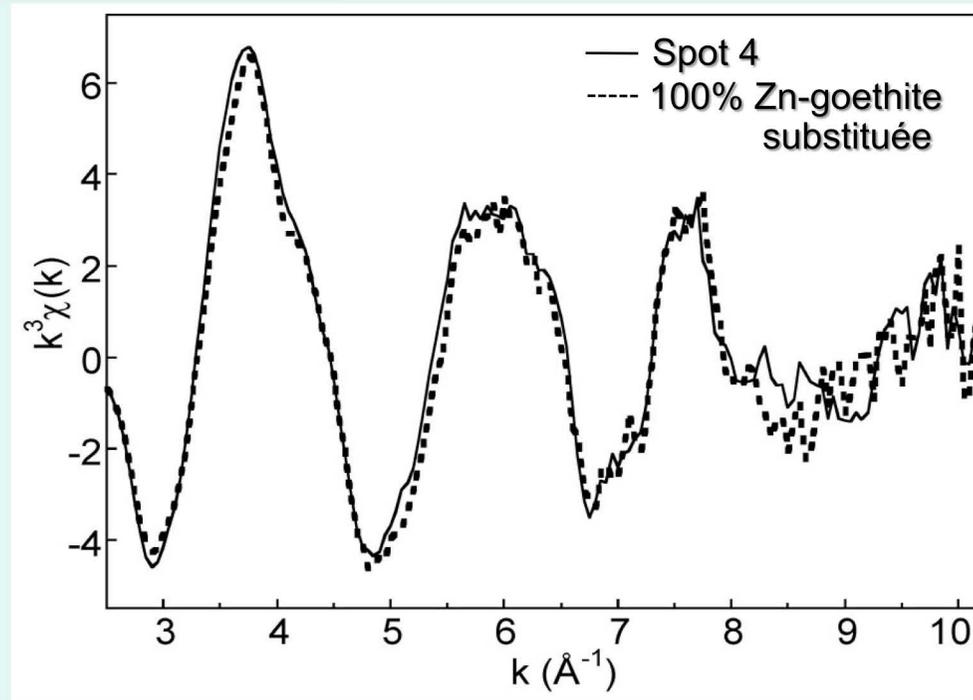
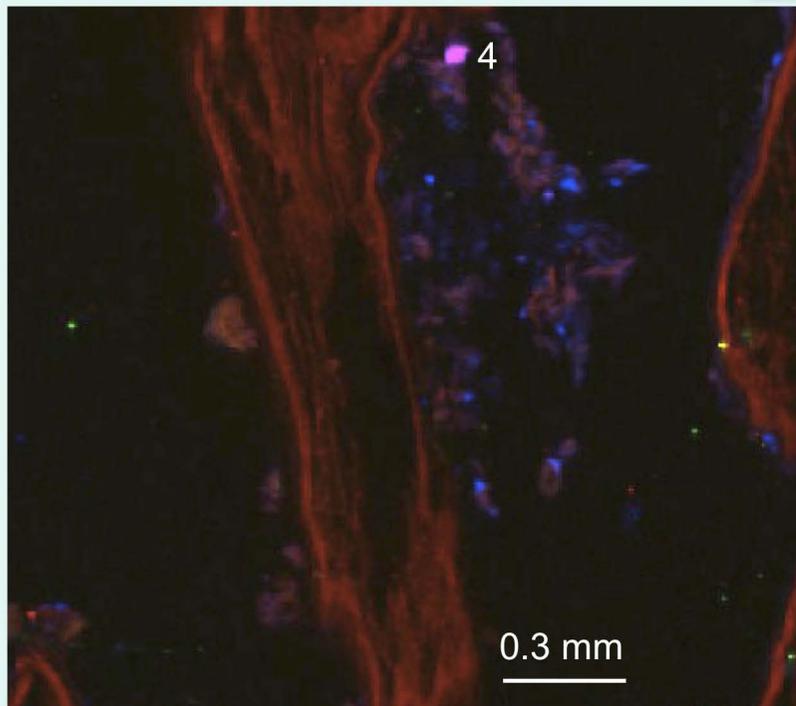


(Canizal et al., 2006/Mater. Chem. Phys. 97)

Autres microorganismes ? Implication des tanins ?

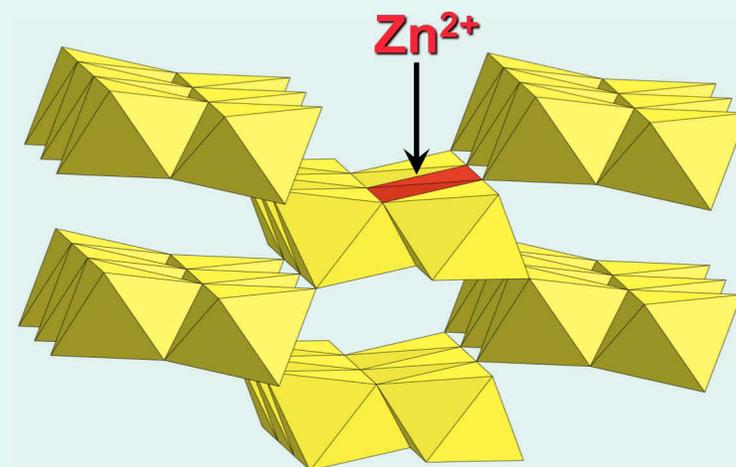
Zn Cu Fe

## Spéciation de Zn



- nouvelle espèce
- Zn est incorporé dans le réseau cristallin
- ➔ coprécipitation de Zn et Fe libérés en solution des phases porteuses initiales

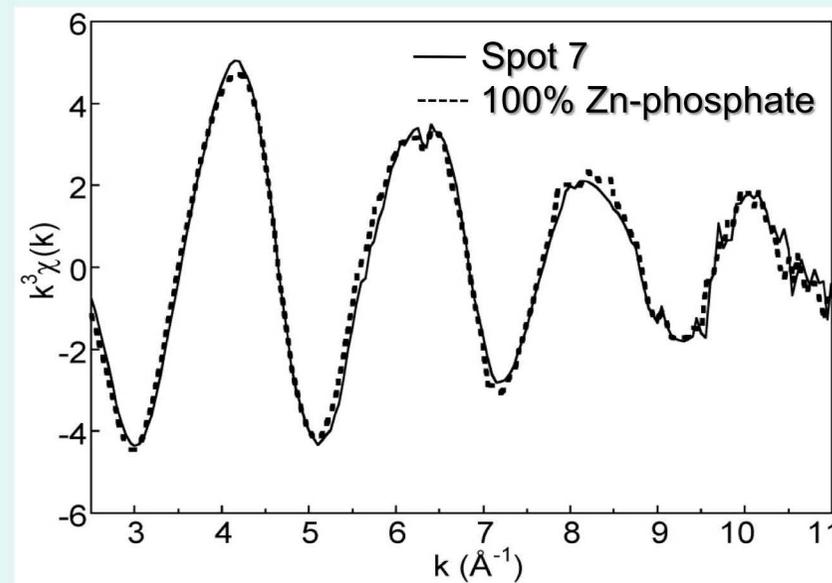
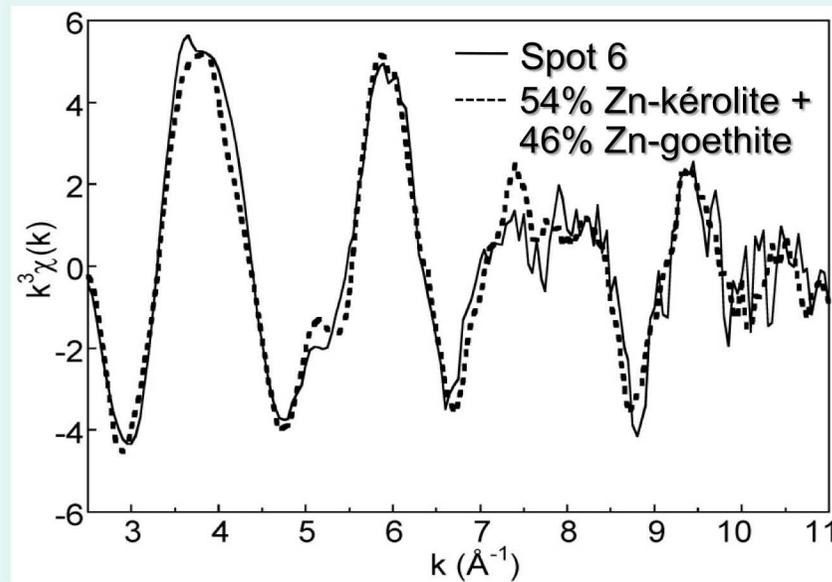
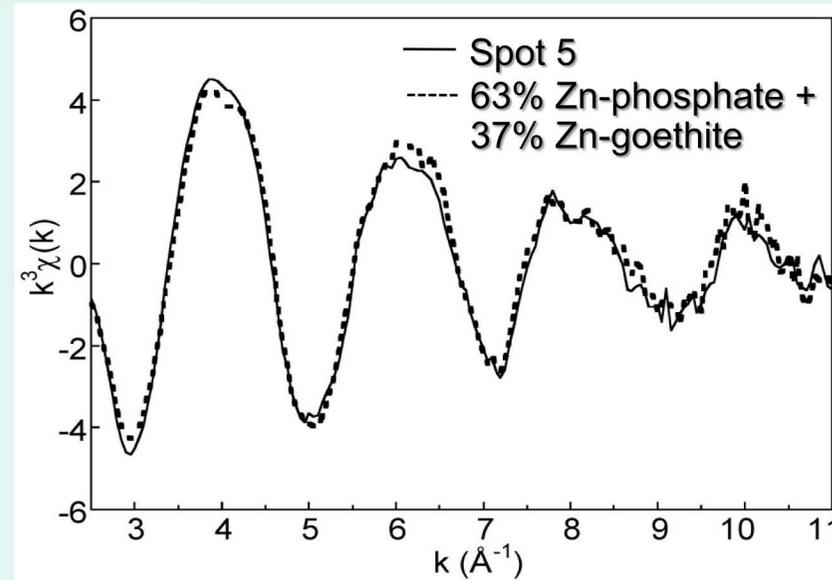
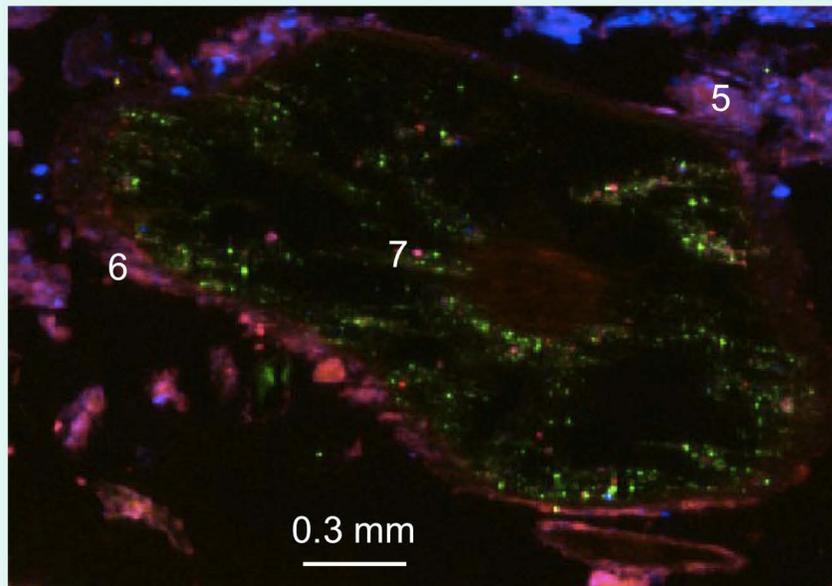
**Zn-goethite substituée**



**Néoformation de Zn-goethite à l'interface sol-racine**

Zn Cu Fe

Spéciation de Zn



Zn-goethite dans les précipités racinaires (origine biologique ?)

## Spéciation de Zn

A l'échelle microscopique :

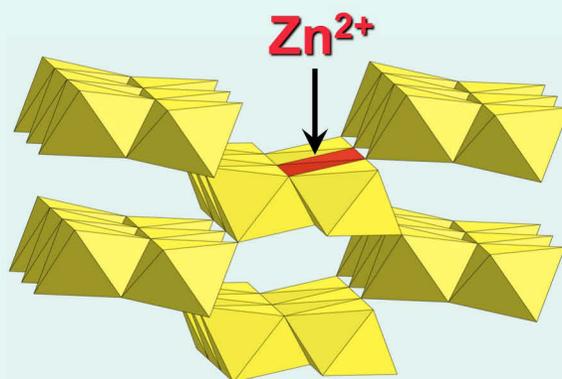
avant phytoremédiation ...

- Zn-ferrihydrate
- Zn-phosphate
- Zn-kérolite
- willémitte
- gahnite

Zn-goethite substituée  
 $\alpha(\text{Fe,Zn})\text{OOH}$

- incorporation dans le réseau cristallin

transformation  
 d'oxyhydroxydes  
 de Fe



... après phytoremédiation

- Zn-phosphate
- Zn-kérolite
- willémitte
- gahnite
- Zn métallique
- ZnO
- Zn-goethite

nouvelles  
 espèces

- absence de Zn-ferrihydrate
- absence de Zn-hématite

➔ dissolution de Zn-ferrihydrate ➔ précipitation de Zn-goethite

Quelle est la représentativité des espèces dans le volume de sol ?

Par rapport au sol initial ?

Transformation Zn-ferrihydrate → Zn-goethite (complète ou partielle) ?

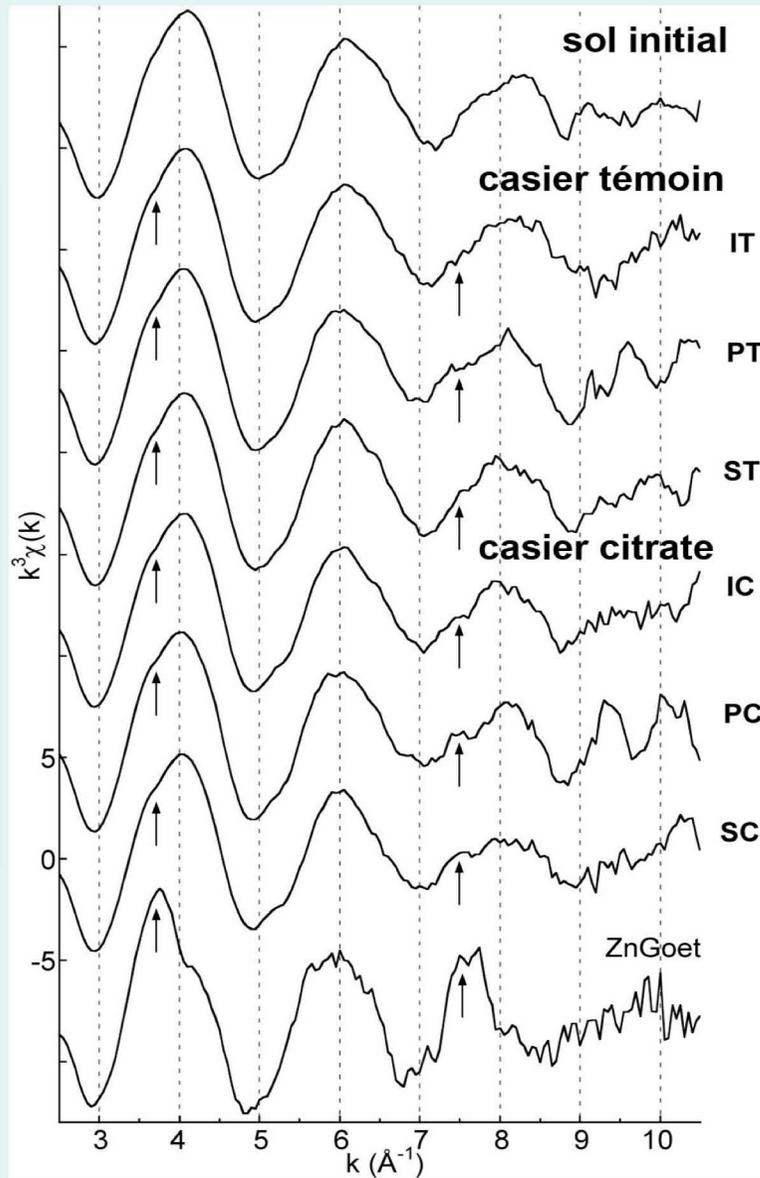
# Spéciation de Zn

A l'échelle macroscopique :

après traitement

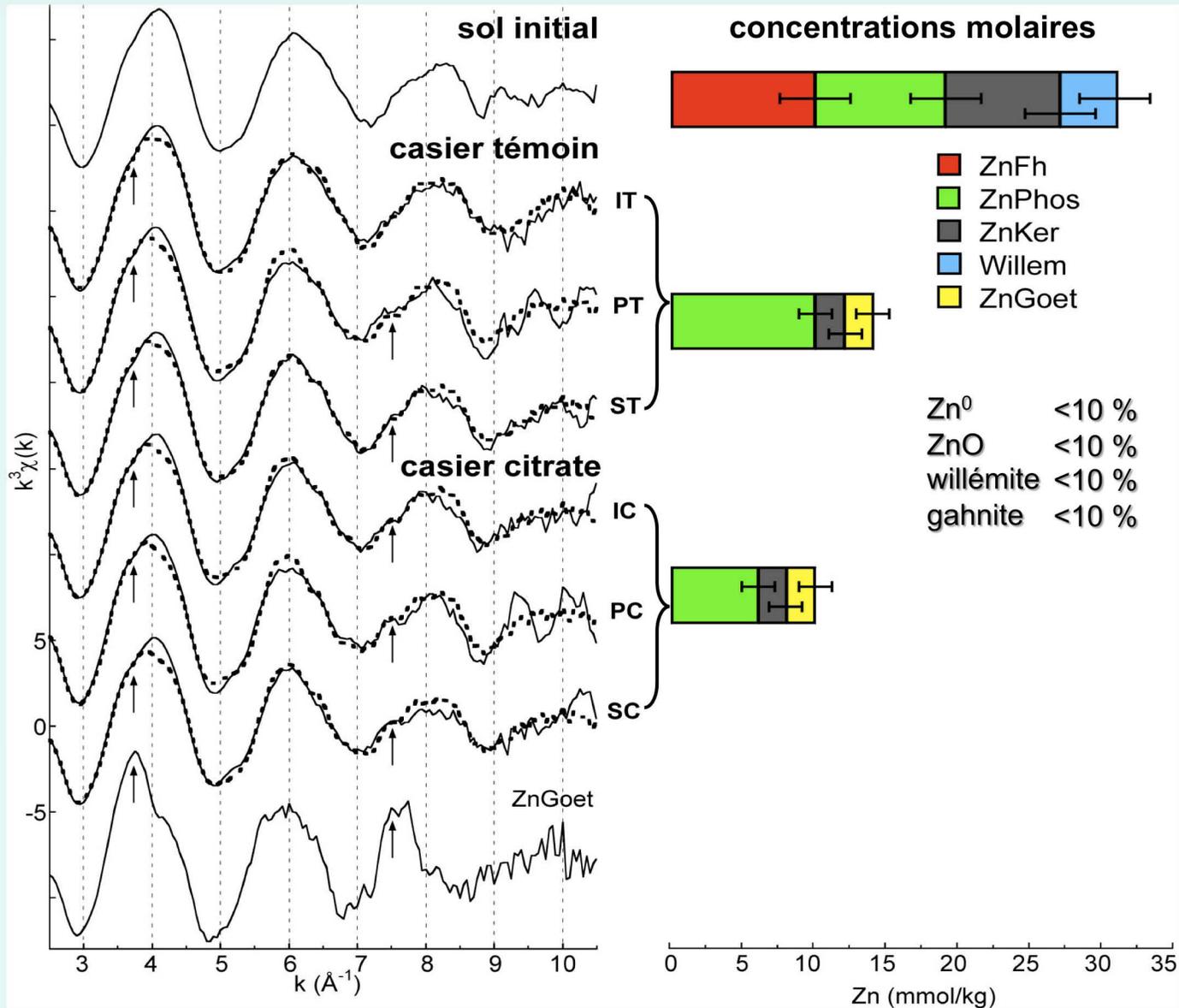
- spectres similaires entre eux pour les sols de trois plantes

- citrate produit un effet supplémentaire et similaire pour les sols de trois plantes



# Spéciation de Zn

A l'échelle macroscopique :



avant traitement

Zn-ferrihydrite  
≈ 30 %

après traitement

dissolution de  
Zn-ferrihydrite

lixiviation de Zn  
(quantité majeure)

précipitation de  
Zn-goethite  
(faible quantité)

effet du citrate

dissolution d'une  
partie de  
Zn-phosphate

lixiviation de Zn

après traitement

- spectres similaires entre eux pour les sols de trois plantes

- citrate produit un effet supplémentaire et similaire pour les sols de trois plantes

➡ Une quantité importante de Zn libéré en solution est lixiviée du sol

Zn

Zn(II) – minéraux  
(majorité ferrihydrite et phosphate)

# Effets de la phytoremédiation

Cu

Cu(II) – matière organique  
(MO)

spéciation initiale

## conditions imposées par le traitement

➤ fluctuations des conditions globales dans le milieu

hydromorphie-réduction ( $Eh \leq +100$  à  $-250$  mV)

assèchement-oxydation ( $Eh \geq +100$  à  $+300$  mV)

*effet irrigation* : facteurs physico-chimiques : **stress** réducteur/oxydant du milieu

*effet plante* : activité racinaire : **adaptation vitale** aux conditions du milieu

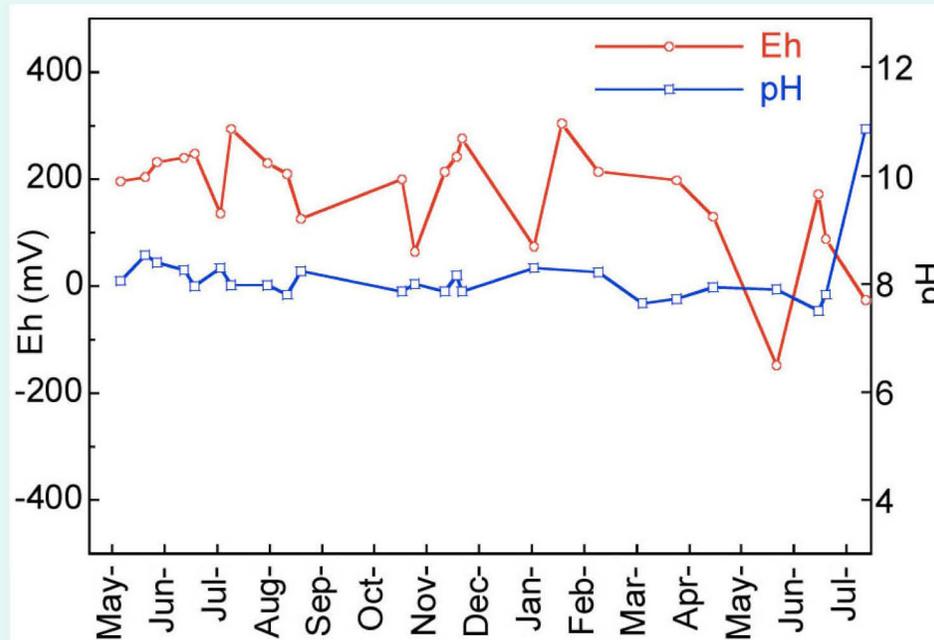
- respiration, émission de O<sub>2</sub> dans la rhizosphère
- exsudation des antioxydants ...

milieu  
ambiant

matière  
vivante

*environnement*

*biochimiquement actif*



Zn

Zn(II) – minéraux  
(majorité ferrihydrite et phosphate)

# Effets de la phytoremédiation

Cu

Cu(II) – matière organique  
(MO)

spéciation initiale

## conditions imposées par le traitement

➤ fluctuations des conditions globales dans le milieu

hydromorphie-réduction ( $Eh \leq +100$  à  $-250$  mV)

assèchement-oxydation ( $Eh \geq +100$  à  $+300$  mV)

*effet irrigation* : facteurs physico-chimiques : **stress** réducteur/oxydant du milieu

*effet plante* : activité racinaire : **adaptation vitale** aux conditions du milieu

- respiration, émission de O<sub>2</sub> dans la rhizosphère
- exsudation des antioxydants ...

milieu  
ambient

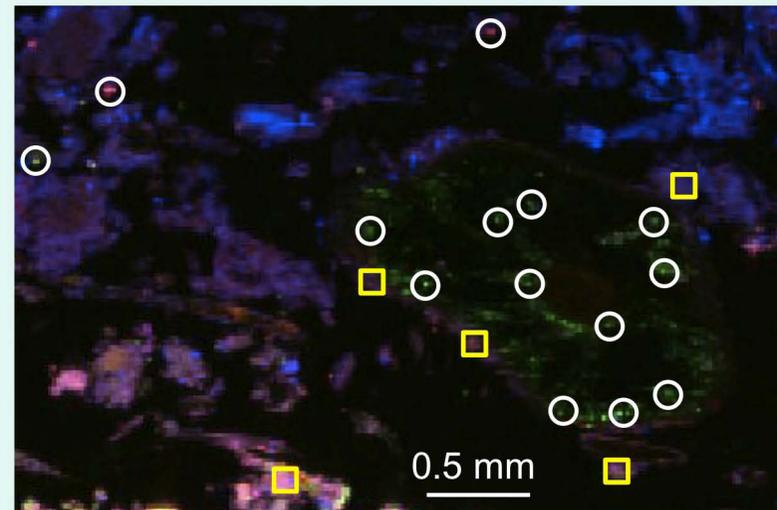
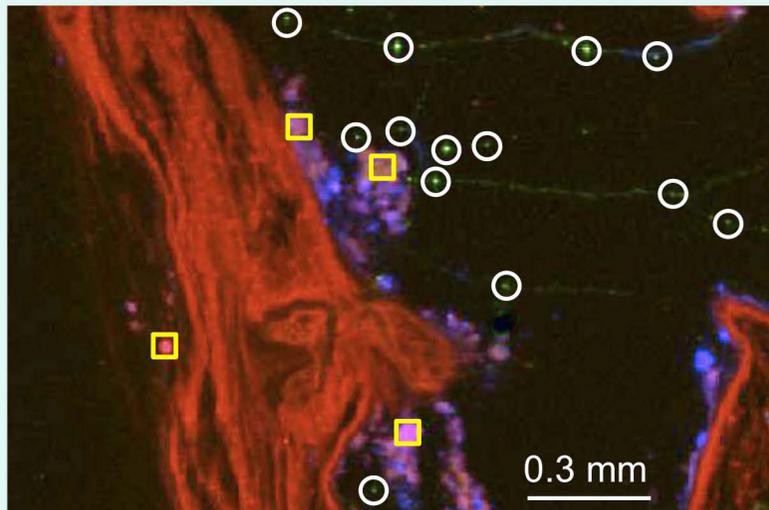
matière  
vivante

*environnement*

*biochimiquement actif*

➤ hétérogénéité des conditions locales dans la rhizosphère

coexistence des espèces réduites ○ et oxydées □



Zn

Cu

# Effets de la phytoremédiation

Zn(II) – minéraux

Cu(II) – matière organique

(majorité ferrihydrite et phosphate)

(MO)

spéciation initiale

## conditions imposées par le traitement

➤ fluctuations des conditions globales dans le milieu

hydromorphie-réduction ( $Eh \leq +100$  à  $-250$  mV)

assèchement-oxydation ( $Eh \geq +100$  à  $+300$  mV)

**effet irrigation** : facteurs physico-chimiques : **stress** réducteur/oxydant du milieu

**effet plante** : activité racinaire : **adaptation vitale** aux conditions du milieu

- respiration, émission de  $O_2$  dans la rhizosphère
- exsudation des antioxydants ...

milieu  
ambiant

matière  
vivante

environnement

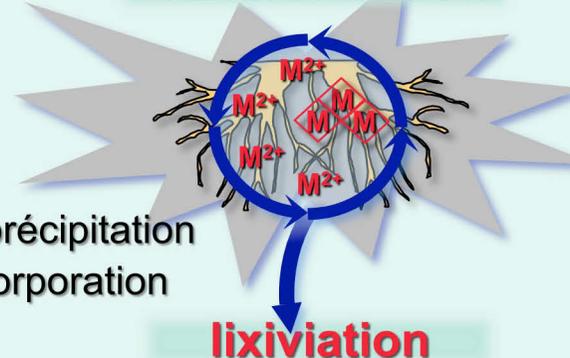
biochimiquement actif

➤ hétérogénéité des conditions locales dans la rhizosphère

mécanismes :

mécanismes :

transformation



lixiviation

➤ réduction/dissolution de Zn-ferrihydrite

➔ remobilisation de Zn associé



immobilisation

incorporation

➤ oxydation/décomposition de Cu-MO

➔ remobilisation de Cu associé



immobilisation

réduction

**effet citrate** : favorise la remobilisation des métaux

(dissolution d'une partie de Zn-phosphate, compétition avec MO)

**effet Phragmites australis** : forte remobilisation des métaux même sans citrate

(graminée)

(autres ligands organiques ? rôle des phytosidérophores ?)

## Bilan de la phytoremédiation

masse (g)

Stock initial (sol)

Zn	4084
Cu	715

Casier Témoin

Stock résiduel (sol)

Casier Citrate

	Iris	Phragmites	Salix	Iris	Phragmites	Salix
Zn	2571	1482	2596	2080	1202	1770
Cu	656	380	681	515	301	418

Plantes (parties aériennes + racines)

< 0.3 %  
du stock initial

	Iris	Phragmites	Salix	Iris	Phragmites	Salix
Zn	2.6	1.3	6.5	2.0	2.0	8.7
Cu	0.8	0.4	0.7	0.8	0.9	1.8

Lixiviation (estimation)

	Iris	Phragmites	Salix	Iris	Phragmites	Salix
Zn	1510	2601	1482	2002	2880	2305
Cu	57	334	33	199	413	295

# Bilan de la phytoremédiation

masse (g)

Stock initial (sol)

Zn 4084

Cu 715

Cu(II)MO initial  
≈ 100 %

< 0.3 %  
du stock initial

Spéciation (mesure)

Zn-ferrihydrate  
initiale éliminée

1225 ± 612

≈ 30 %

Cu(II)MO restant

525 ± 98

≈ 73 %

Casier Témoin

Iris

2571

656

Phragmites

1482

380

Stock résiduel (sol)

Salix

2596

681

Casier Citrate

Iris

2080

515

Phragmites

1202

301

Salix

1770

418

Plantes (parties aériennes + racines)

Iris

2.6

0.8

Phragmites

1.3

0.4

Salix

6.5

0.7

Iris

2.0

0.8

Phragmites

2.0

0.9

Salix

8.7

1.8

Lixiviation (estimation)

Iris

1510

57

Phragmites

2601

334

Salix

1482

33

Iris

2002

199

Phragmites

2880

413

Salix

2305

295

Cu<sup>0</sup> formé

131 ± 98

≈ 18 %



(phytoaccumulation)



phytolixiviation



phytotransformation  
phytodétoxication

## Conclusions

**Spéciation** des métaux lourds (Zn & Cu) dans le sol n'est pas une constante  
elle évolue profondément

sous **influence** de l'activité de la plante & des conditions physico-chimiques du milieu  
dans un temps court

Nouvelle(s) méthode(s) de **phytoremédiation** par des **plantes de milieux humides**  
selon **Jardins Filtrants®**

### **phytolixiviation**

induisant la **solubilisation** des métaux dans le sol et leur **lixiviation**

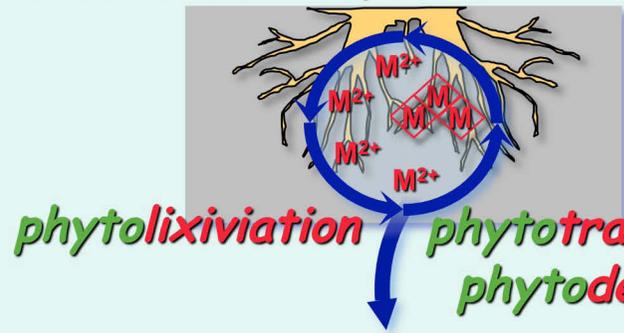
### **phytotransformation** & **phytodétoxication**

conduisant la **conversion** des métaux en **nouvelles formes** non-toxiques

pour ce sol issu de la **plaine de Pierrelaye** :

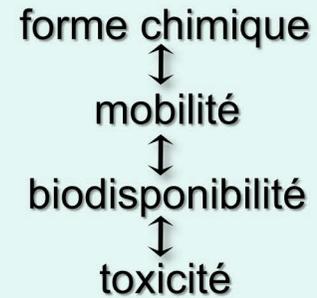
- la lixiviation importante de **Zn** due à la remobilisation de **Zn** suite à la dissolution de la ferrihydrite zincifère et sa transformation partielle en goethite zincifère
- la plus faible lixiviation de **Cu** due à l'immobilisation de **Cu** suite à sa transformation en cuivre métallique en quantité importante par les racines en association avec des champignons mycorhizes

**Ces plantes de milieux humides fabriquent les particules métalliques**

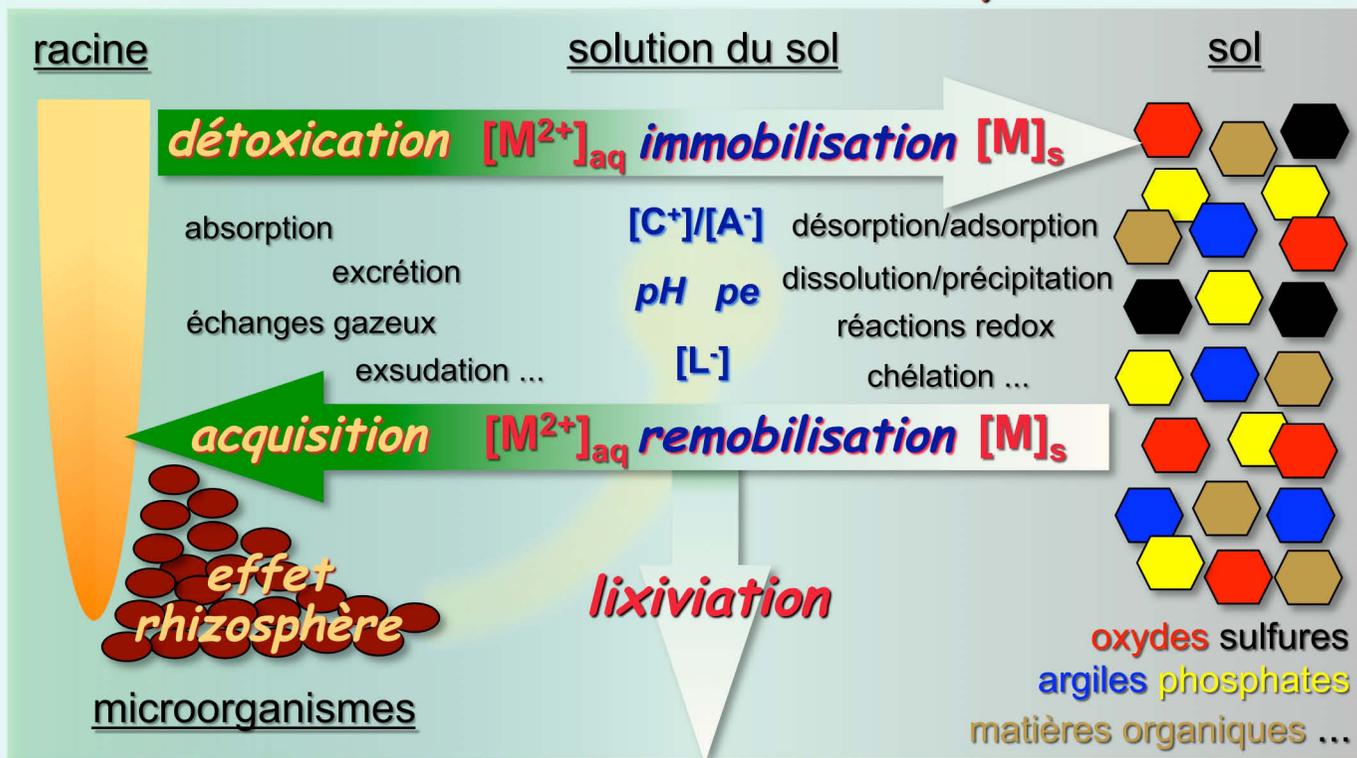


## Conclusions

**Influence** de l'**activité racinaire** sur les **métaux** dans le sol



**matière vivante** ↔ **mobilité** ↔ **spéciation solide**



### acquisition

### manifestations vitales

### détoxication

ensemble des processus impliqués dans la remobilisation des métaux dans le sol, puis leur absorption en solution par la plante

ensemble des processus impliqués dans la défense de la plante contre l'excès des métaux en solution, puis leur immobilisation dans le sol

## Perspectives

### ➤ **Influence racinaire et lixiviation**

- Phénomène perceptible dans la masse du sol (*bulk*) d'un horizon avec une forte densité de racines (horizon cultivé des champs) ?

- Formation de **'nano'particules métalliques** dans la rhizosphère de ces **plantes de milieux humides**

### Nouveau mode de biominéralisation de Cu

- Commun aux plantes de milieux humides ? Courant dans des milieux humides ? Et milieux oxygénés ?
- Réduction de Au, Ag, Hg, Se, Te (plus électropositifs que Cu) dans la rhizosphère de ces plantes ?
- Formation au contact de la biomasse racinaire sèche en poudre et les métaux en solution ?

### ✦ **nanosynthèses** bio-induites en conditions douces (à température ambiante et en solution)

### ✦ **phytostabilisation** ✦ **phytomining**

### ✦ **phytoextraction** (Zn, Pb, Cd..., détoxification de Cu phytotoxique)

- **Modification des formes sensibles au redox, conversion en nouvelles formes**

- Généralisable à d'autres types de matrices (sols, sédiments, boues) ?
- D'autres « métaux » (formes de Cd, As, Hg) ?
- Généralisable aux conditions naturelles (en fonction des saisons) ?

### ✦ **nouvelle voie pour la phytoremédiation** ✦ **nouvelle vocation pour l'agriculture**

### **phytolixiviation** ↔ **phytotransformation** **phytodétoxification**

### « La Bioferme »

(non alimentaire)

d'ores et déjà portée à l'échelle opérationnelle ...



phytoestore



# « La Bioferme »

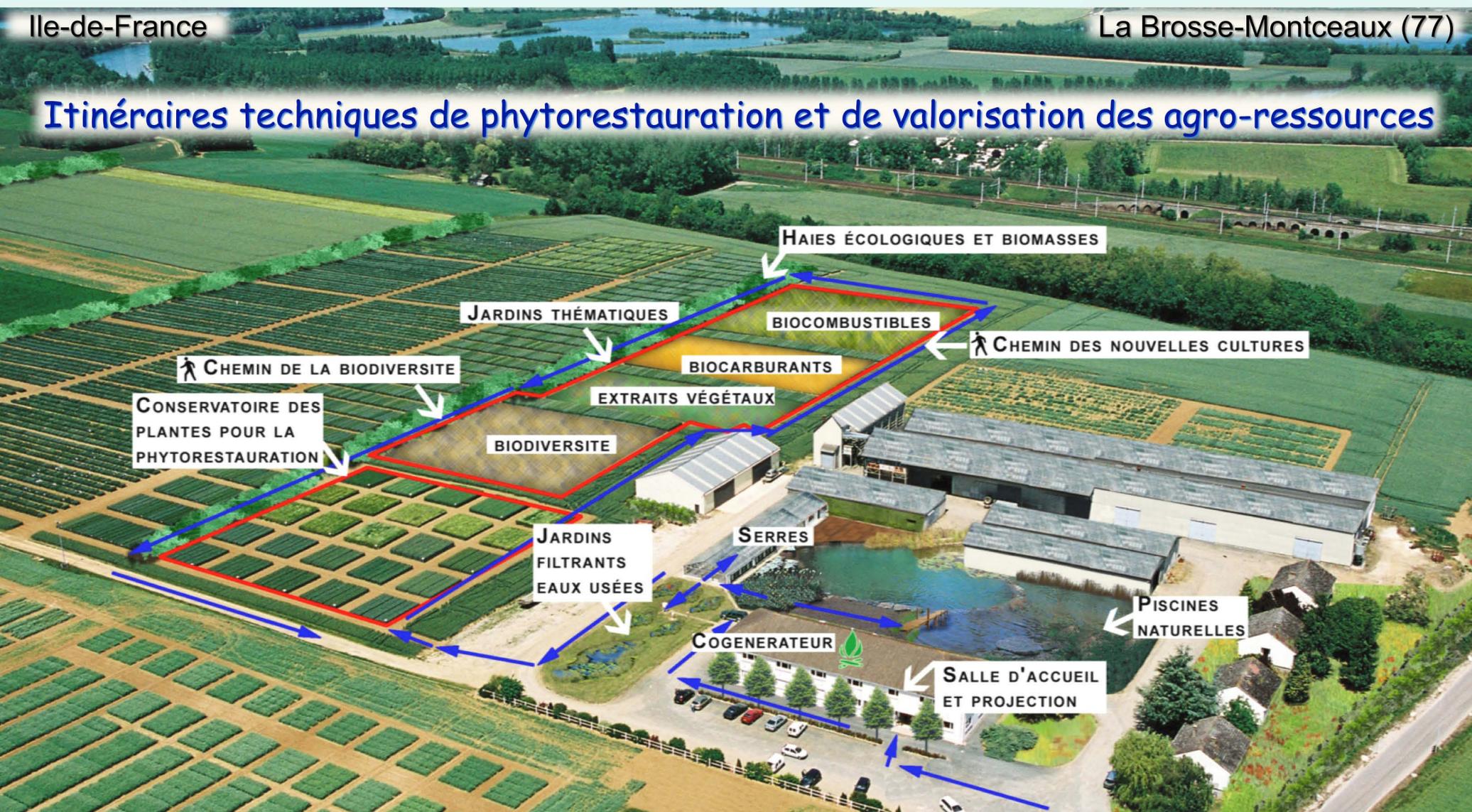
première mondiale

Centre de *phytorestauration* selon *Jardins Filtrants*®

Ile-de-France

La Brosse-Montceaux (77)

## Itinéraires techniques de phytorestauration et de valorisation des agro-ressources



HAIES ÉCOLOGIQUES ET BIOMASSES

JARDINS THÉMATIQUES

BIOCOMBUSTIBLES

CHEMIN DES NOUVELLES CULTURES

CHEMIN DE LA BIODIVERSITE

BIOCARBURANTS

EXTRAITS VÉGÉTAUX

CONSERVATOIRE DES PLANTES POUR LA PHYTORESTAURATION

BIODIVERSITE

JARDINS FILTRANTS EAUX USÉES

SERRES

PISCINES NATURELLES

COGENERATEUR

SALLE D'ACCUEIL ET PROJECTION

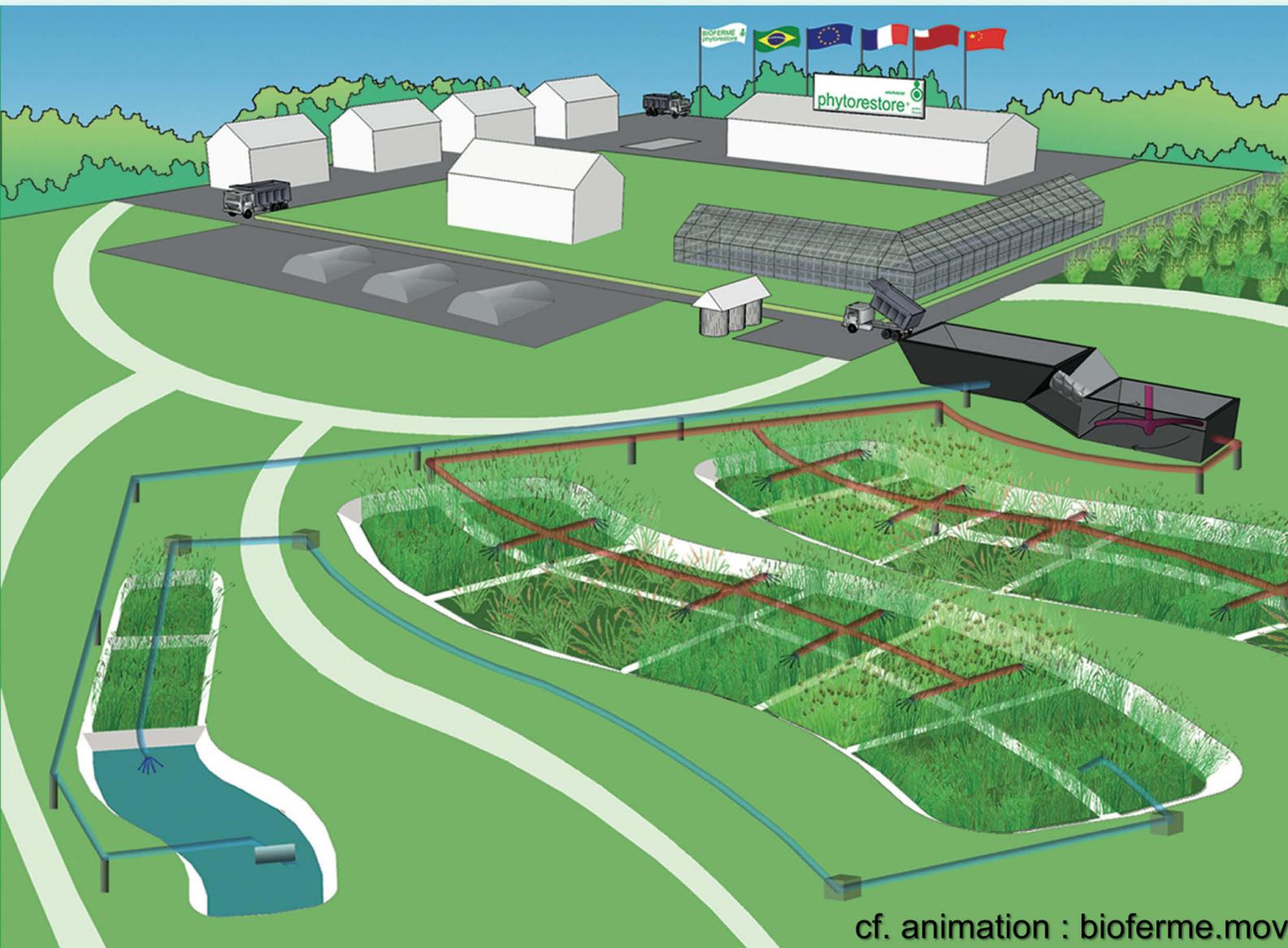
## « La Bioferme »

Centre de *phytorestauration* selon *Jardins Filtrants*<sup>®</sup>

première mondiale

**mise en service  
octobre 2009**

**104 ha**



➤ centre de traitement  
des matrices polluées  
(sols, sédiments, boues)  
(≈ 50000 t/an)

➤ centre R&D  
des solutions végétales

➤ pépinière des plantes  
dédiées à la dépollution  
(≈ 300 espèces)

➤ parcelles d'essais  
agronomiques  
(cultures innovantes)

➤ champs de cultures  
des biomasses  
végétales  
(≈ 15 t/ha/an)

cf. animation : bioferme.mov

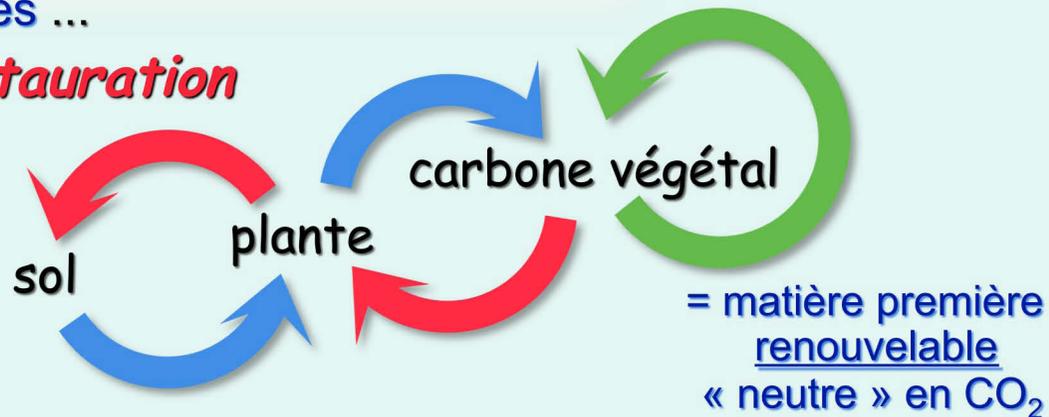
phytoestore 

# « La Bioferme »

première mondiale

Restauration des ressources et production des ressources (nouvelles et renouvelables) par les plantes ...

*phytorestauration*



... en bouclant les boucles écologiques

**modèle économique** : co-activité & synergie



**restauration** : *phytolixiviation* ↔ *phytotransformation*

&

**valorisation** : *recyclage et non élimination*

- valorisation de la matrice traitée (néosols, compost)
- valorisation de la biomasse végétale (bioénergie, biomatériaux)
- valorisation des métaux piégés dans les tourbes (*phytomining*)



## De la matière végétale pour quoi faire ?

### Les enjeux (XXI<sup>e</sup> siècle)



#### ➤ énergétiques :

épuisement des ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon) – consommation mondiale croissante  
– hausse du prix – risques du nucléaire

#### ➤ environnementaux :

sites et sols pollués – réduction des surfaces agricoles  
– limites des traitements conventionnels (incinération...)  
– émission croissante de CO<sub>2</sub> – changement climatique

#### ➤ réglementaires :

Protocole de Kyoto (1997) – Plan climat du gouvernement (2004)  
– REACH (enRegistrement, Evaluation, Autorisation des substances Chimiques) (2007) – fin de la Politique Agricole Commune (PAC) (2013)

### La matière végétale ('phytomatière')

- **phytoremédiation, phytorestauration** (transformation des polluants) – alternative végétale aux traitements physico-chimiques (moins coûteuse, plus extensive, plus respectueuse de l'environnement)
- **séquestration de CO<sub>2</sub>** (« puits » de carbone) – réduction des émissions de CO<sub>2</sub> – quota de CO<sub>2</sub>
- **matière première renouvelable pour l'énergie** (bioénergie : biocarburants, biocombustibles, bioélectricité) – économie des ressources du carbone fossile – limitation de la dépendance énergétique
- **matière première renouvelable pour la chimie** (bioproduits : sanitaires, solvants, encres, lubrifiants, tensioactifs...), **pour les matériaux** (biomatériaux : emballage, construction, isolation) – biodégradabilité
- **utilisation des terres agricoles pour le non alimentaire** – agriculture éco-intensive – création d'emplois (filières innovantes) – maintien d'un tissu socio-économique actif en milieu rural





JF d'Escamps

*« La nature fait bien les choses si on sait la cultiver dans son jardin... un jardin filtrant évidemment »*

***En cultivant les plantes  
il est possible de restaurer  
et de renouveler les ressources...***

***...car les plantes ont des capacités  
de transformation de la matière  
nécessaires à leur vie***

*Merci ! Thank you ! Спацибо !*



## Remerciements

Thierry Jacquet  
Alain Manceau  
Bruno Lanson  
Martine Lanson  
Matthew Marcus  
Géraldine Sarret  
Lorenzo Spadini  
Frédéric Panfili

Laurent Charlet  
Nicolas Geoffroy  
Jean-Louis Hazemann  
Olivier Proux  
Jean-Jacques Menthonnex  
Sébastien Pairis  
Clément Falk  
Sirine Fakra

Philippe Hinsinger

Laurence Denaix

Christophe Schwartz

Yves Perrodin