



# Le résidu de bauxite modifié : une solution pour décontaminer et végétaliser les sols miniers, décontaminer les eaux minières, couvrir et végétaliser les stockages et les dépôts

Pierre HENNEBERT<sup>1</sup>, Laurent POIZAT<sup>2</sup>, Patricia MERDY<sup>3</sup>  
Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques <sup>2</sup> ALTEO <sup>3</sup>  
Université du Sud Toulon Var

[pierre.hennebert@ineris.fr](mailto:pierre.hennebert@ineris.fr)

[INTERSOL 2015](#)  
[Paris, 24-26/03/2015](#)

**INERIS**  
maîtriser le risque |  
pour un développement durable |



# Résidu de Bauxite Modifié (RBM) : Plan

Introduction

Matériel et méthodes

Résultats

- Immobilisation des contaminants lixiviables des sols : laboratoire
  - végétalisation des sols : laboratoire et pilote
- Épuration des contaminants de l'eau : laboratoire et pilote
  - Devenir du RBM usage, comportement à long terme : laboratoire et pilote (lysimètre)
- Couverture végétalisée

Conclusion

# Introduction

De nombreux sites miniers abandonnés du sud de la France contiennent des sulfures et émettent des eaux toxiques et acides, et de la poussière contaminée.

Selon la littérature, les résidus de bauxite peuvent être utilisés pour :

- immobiliser la fraction soluble des éléments toxiques des sols contaminés;
- réduire/supprimer la phytotoxicité des sols contaminés ;
- décontaminer des éléments toxiques de l'eau.

Cette étude présente des résultats de laboratoire et des résultats à l'échelle pilote pour les sols, les plantes et les eaux.

Travaux financés par ALTEO, l'ADEME et l'Agence de l'Eau RMC  
(projet Bauxaline Technologies BauxGeste)

# Mécanisme de fixation des éléments-traces dans les sols

(Bradl 2004) :

L'adsorption : adsorption spécifique par interactions (groupes fonctionnels de la surface des argiles, des oxydes de Fe et d'Al et de la matière organique) et adsorption non spécifique (ou échange d'ions), plus faibles et moins sélectifs, et comprenant des complexes de sphère externe (avec molécules d'eau);

La précipitation ou coprécipitation de surface : croissance d'une nouvelle phase solide, qui forme un réseau 3-D. Les métaux peuvent précipiter sous forme d'oxydes, d'hydroxydes, de carbonates, de sulfures, de phosphates ou sur le sol. Les précipitations de surface sont principalement fonction du pH et des quantités relatives de métaux et d'anions présents ;

La fixation ou l'adsorption : diffusion d'une espèce métallique aqueuse dans la phase solide en trois dimensions.

## Un sujet de recherche active...

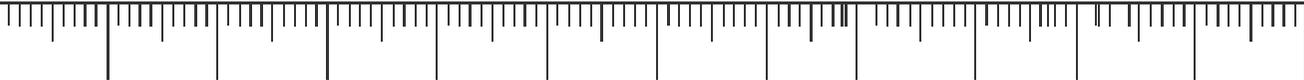
Banning N C, Sawada Y, Phillips I R, Murphy D V. 2014. Amendment of bauxite residue sand can alleviate constraints to plant establishment and nutrient cycling capacity in a water-limited environment. *Ecological Engineering*, Volume 62, January 2014, Pages 179-187

Brokbartold M, Grupe M, Marschne B. 2012. Effectiveness of different soil amendments to reduce the Pb and Zn extractability and plant uptake in soils contaminated by anticorrosion paints beneath pylons. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2012, 175, 443–455 DOI: 10.1002/jpln.201100198 443

Courtney R and Harrington T. 2012. Growth and nutrition of *Holcus lanatus* in bauxite residue amended with combinations of spent mushroom compost and gypsum. *Land Degradation & Development*, Volume 23, Issue 2, pages 144–149, March/April 2012

Friesl W, Horak O and Wenzel W, (2004). Immobilization of heavy metals in soils by the application of bauxite residues: pot experiments under field conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167, (1) 54-59.

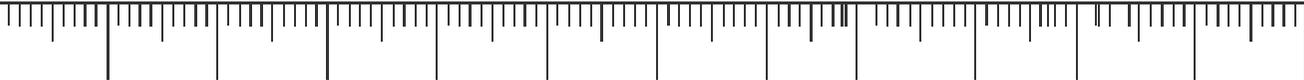
Goloran J.B., C.R. Chen, I.R. Phillips, Z.H. Xu, L.M. Condrón (2013). Selecting a nitrogen availability index for understanding plant nutrient dynamics in rehabilitated bauxite-processing residue sand. *Ecological Engineering*, Volume 58, September 2013, Pages 228-237



# Une nouvelle approche de la phytostabilisation des sites miniers...

*Xiaofang L, Longbin H. 2015 Toward a New Paradigm for Tailings Phytostabilization- Nature of the Substrates, Amendment Options, and Anthropogenic Pedogenesis CRITICAL REVIEWS IN ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY 45, 813-839*

*“We propose that in base metal tailings phytostabilization, extensive engineering efforts are required to increase the biocapacity of tailings (i.e., anthropogenic pedogenesis) rather than focus on the selection and establishment of plants”.*



## Methodes

Le matériau utilisé dans cette étude est de la boue rouge lavée et épaissie en filtre-presse à l'usine d'Alteo à Gardanne (France) dénommée « Bauxaline® ». Du gypse a été ajouté pour abaisser le pH à environ 8,5 et conserver l'alcalinité du produit. Il est dénommé « résidu de bauxite modifié » (RBM)

Des sols contaminés dont un sol minier des environs d'Alès, dangereux (HP 14), avec un niveau très élevé de Zn, Pb et Cd total et lixiviable a été utilisé.

Les eaux de différents sites miniers ont été échantillonnées et utilisées.

### Traitement des sols (laboratoire)

Différents apports de RBM ont été réalisés au sol et les mélanges maintenus à une humidité modérée pendant un mois au laboratoire. Des études cinétiques ont montré que la plupart du temps 4 semaines de réaction sont nécessaires. Les sols sont lixiviés à l'eau désionisée à 10 l/kg (EN 12457-2), les lixiviats filtrés à 0,45 µm et analysés.



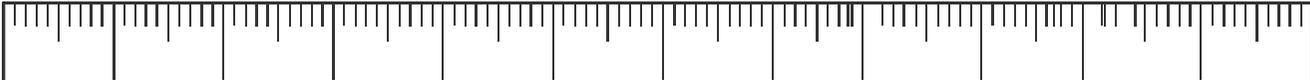
## Methodes

### Essai de phytotoxicité (laboratoire)

Le sol a été amendé avec 10 % de RBM et laissé réagir pendant un mois. Un essai en pot en quatre réplicats avec *Dactylis glomerata* et *Onobrychis sativa*, avec et sans engrais minéral (à une dose agronomique recommandée pour ce sol) a été réalisé dans une serre à température non contrôlée. Le sol de contrôle était un sol calcaire de forêt de pin d'Aix-en-Provence, pauvres en éléments nutritifs.

### Sol et phytoremédiation (essai de terrain)

Au printemps 2014, deux parcelles de 30 m<sup>2</sup> ont été terrassées, nivelées et épierrées. Du RBM a été ajouté dans une parcelle à raison de 30 kg/m<sup>2</sup> et les deux parcelles ont été labourées et mélangées jusqu'à 30 cm de profondeur. Après un mois, les sols ont reçu des engrais (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 133 – 80 – 133 kg/ha) et des graines de dactyle et de sainfoin.



## Methodes

### Traitement de l'eau (laboratoire)

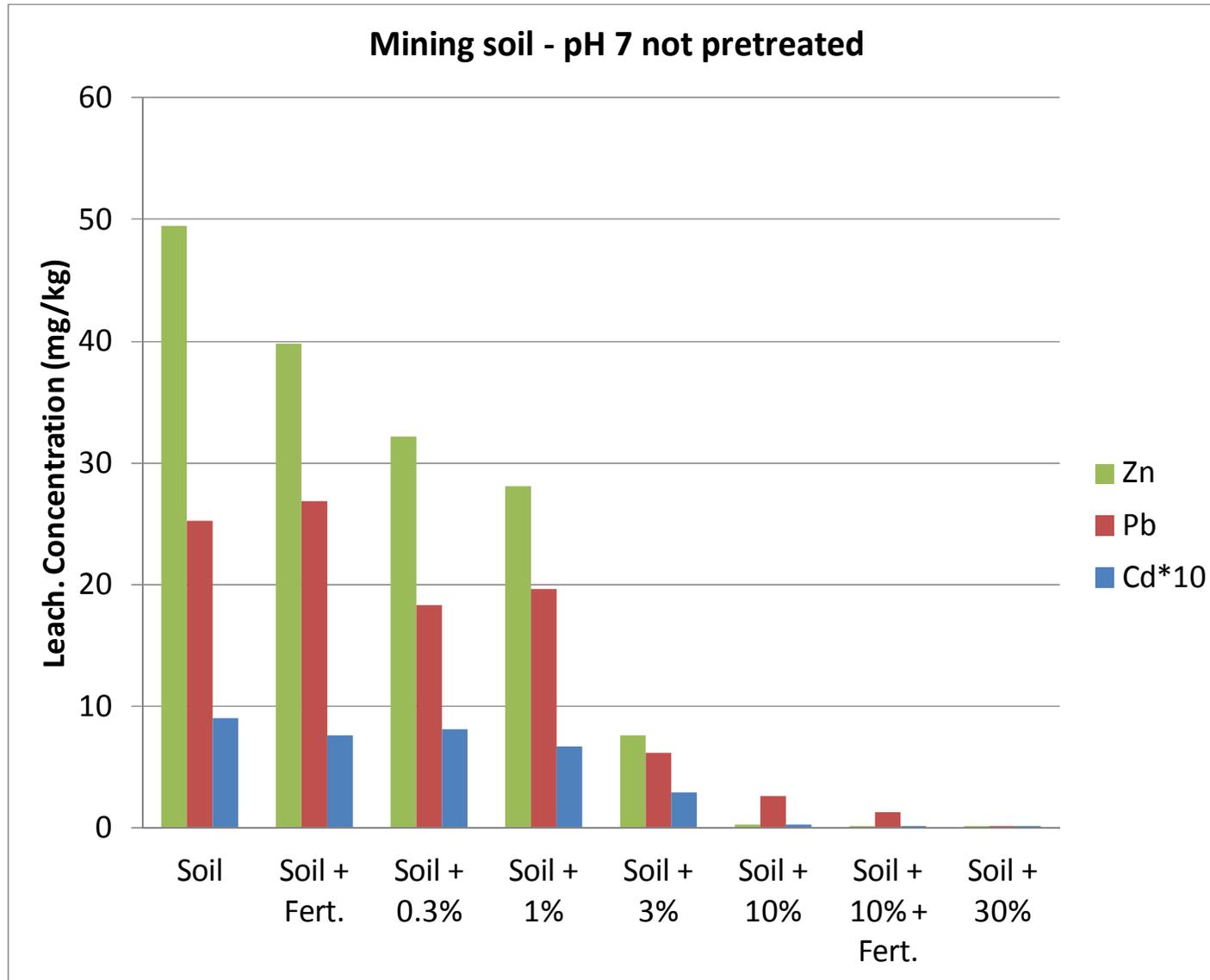
L'eau à traiter est mise en contact avec du RBM en poudre ou granulaire, dans des flacons agités :

- pour les mesures cinétiques : le mélange est échantillonné à différents temps (un rapport RBM/eau)
- pour la mesure de l'équilibre : le mélange est agité 3 jours et laissé à décanter 1 jour (différents rapports RBM/eau)
- pour test en flux : une colonne est remplie avec du RBM granulé et l'eau est pompée. L'eau est filtrée à 0,45  $\mu\text{m}$  et analysé.

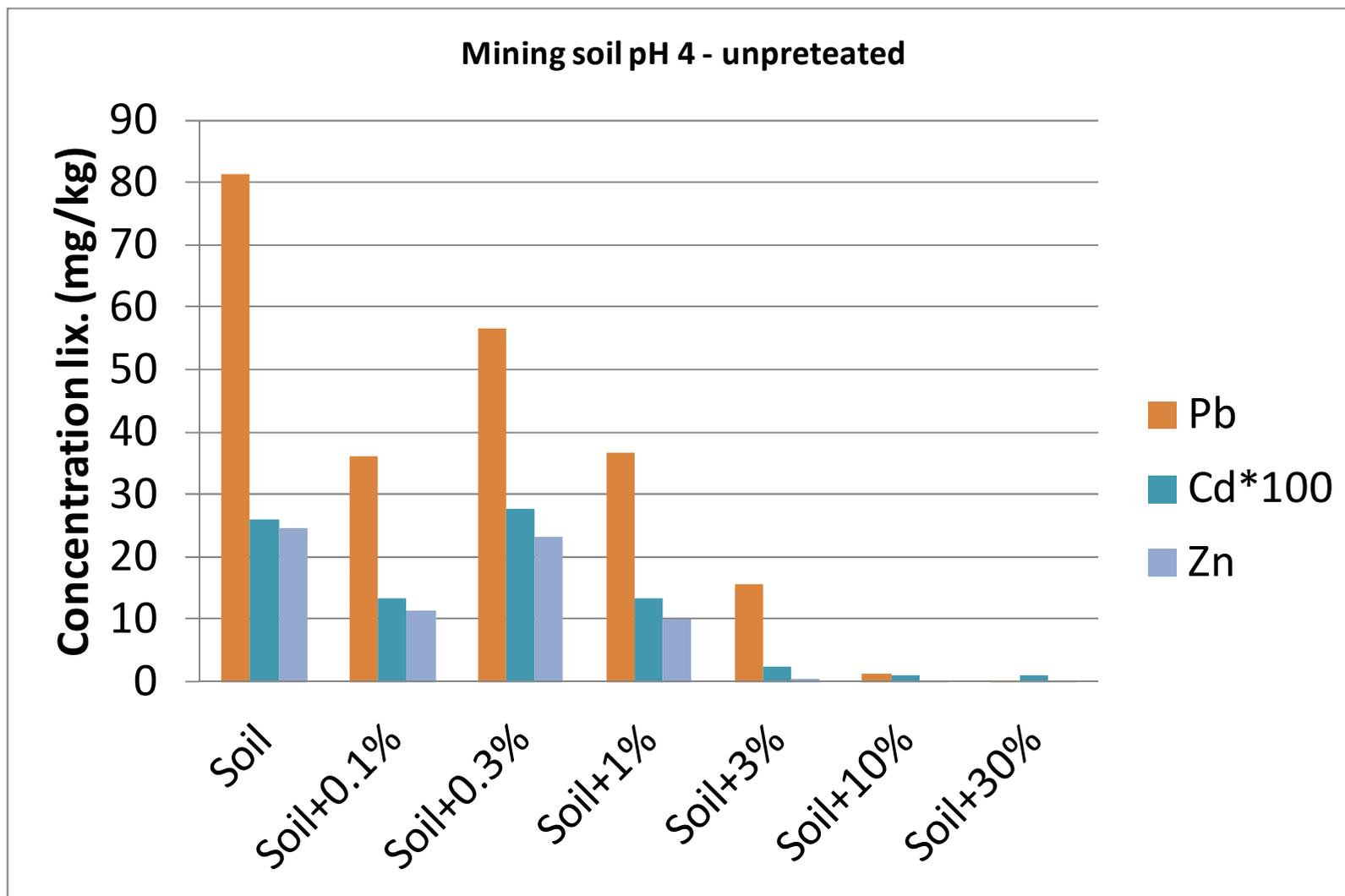
### Traitement de l'eau (échelle pilote)

1500 l d'eau de St Félix ont été pompés dans une cuve remplie de 50 kg de granulé de RBM pendant 3 jours. L'essai a été répété. L'eau est analysée et le RBM usagé est utilisé pour la lixiviation et les tests en lysimètres.

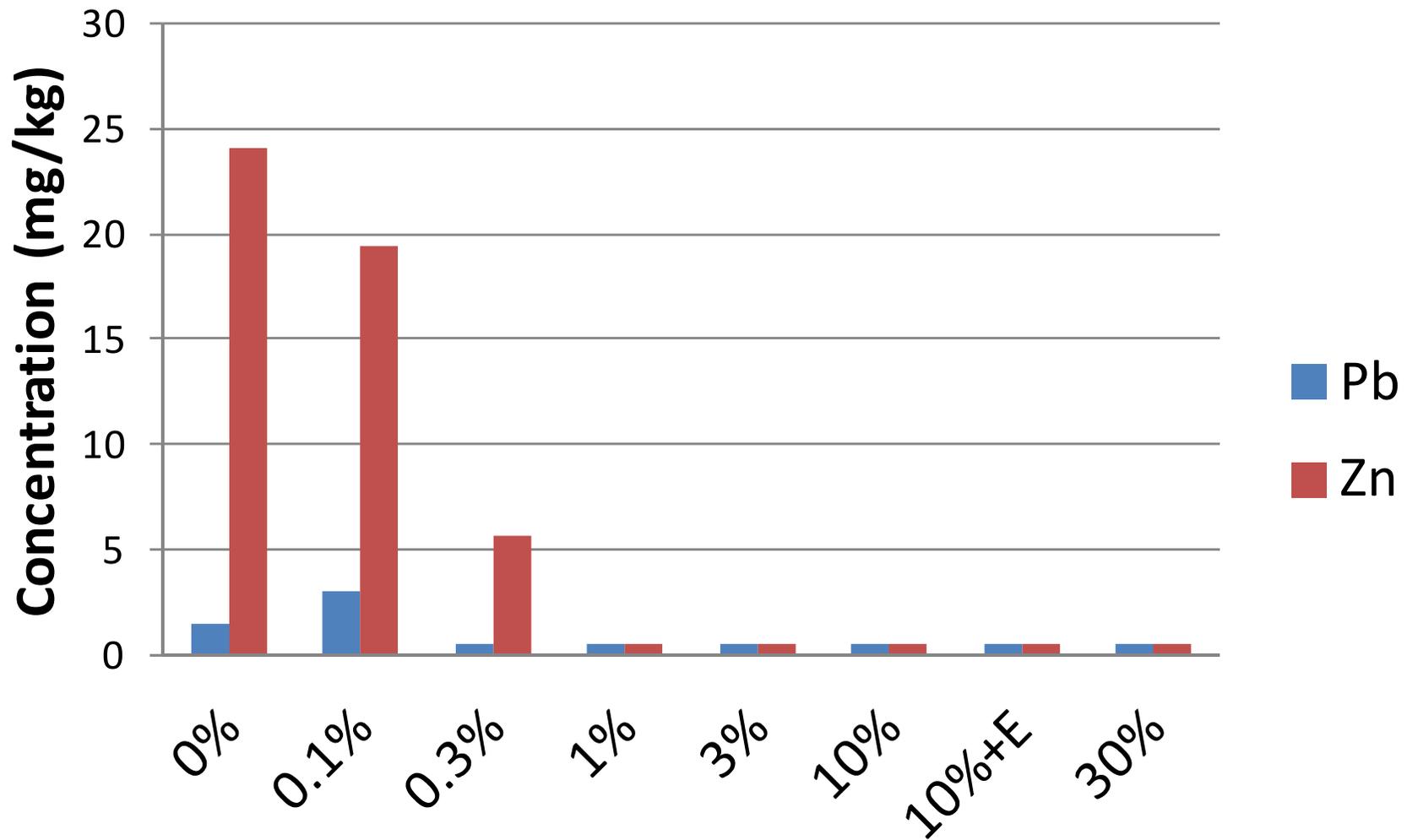
# Résultats/sols: sol St Félix au laboratoire



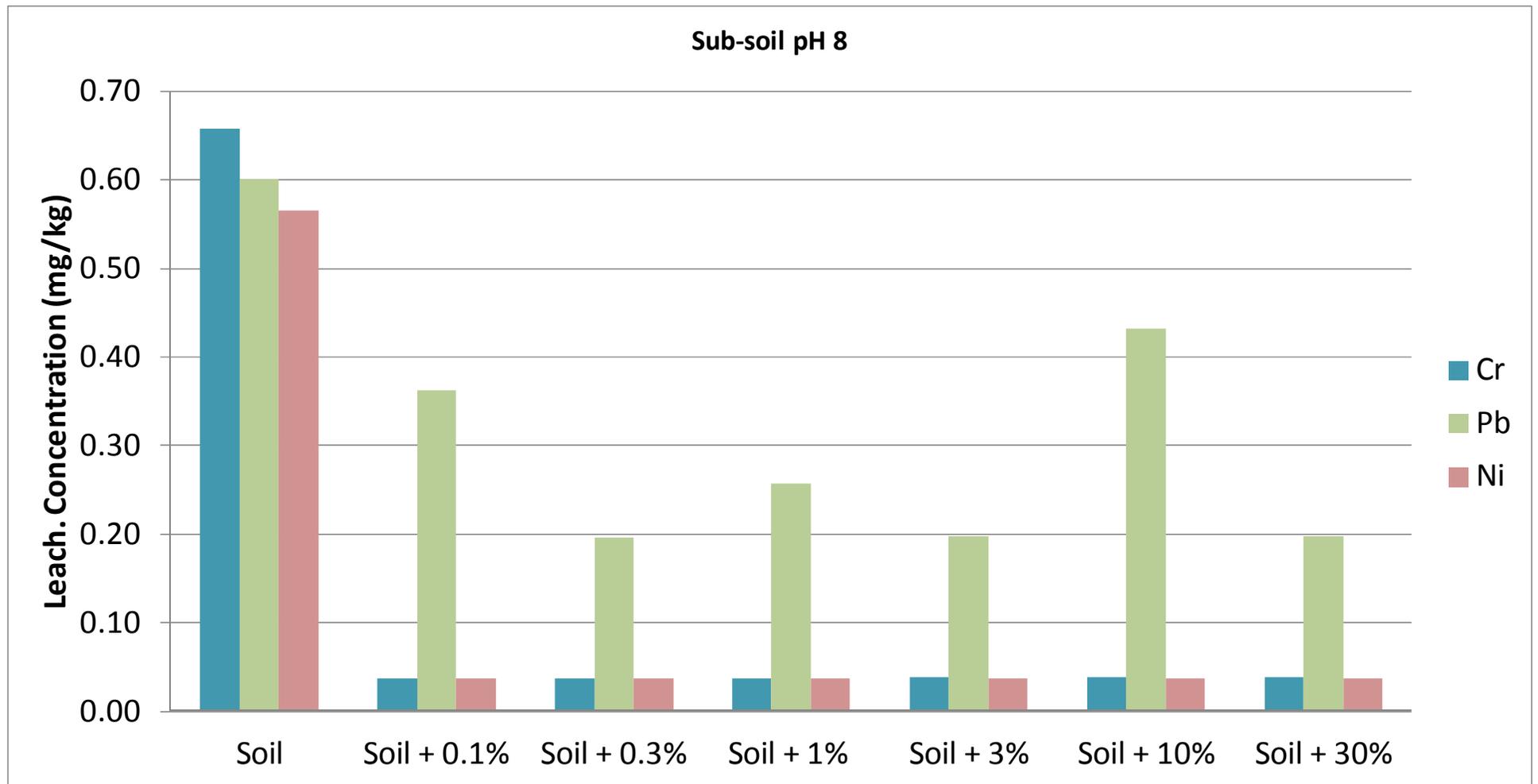
# Résultats/sols: sol St Félix au laboratoire (autre échantillon de sol à pH 4) (production potentielle d'acide 1 M H<sup>+</sup> / kg)



## Résultats/sols: sol minier Alès pH 3.5

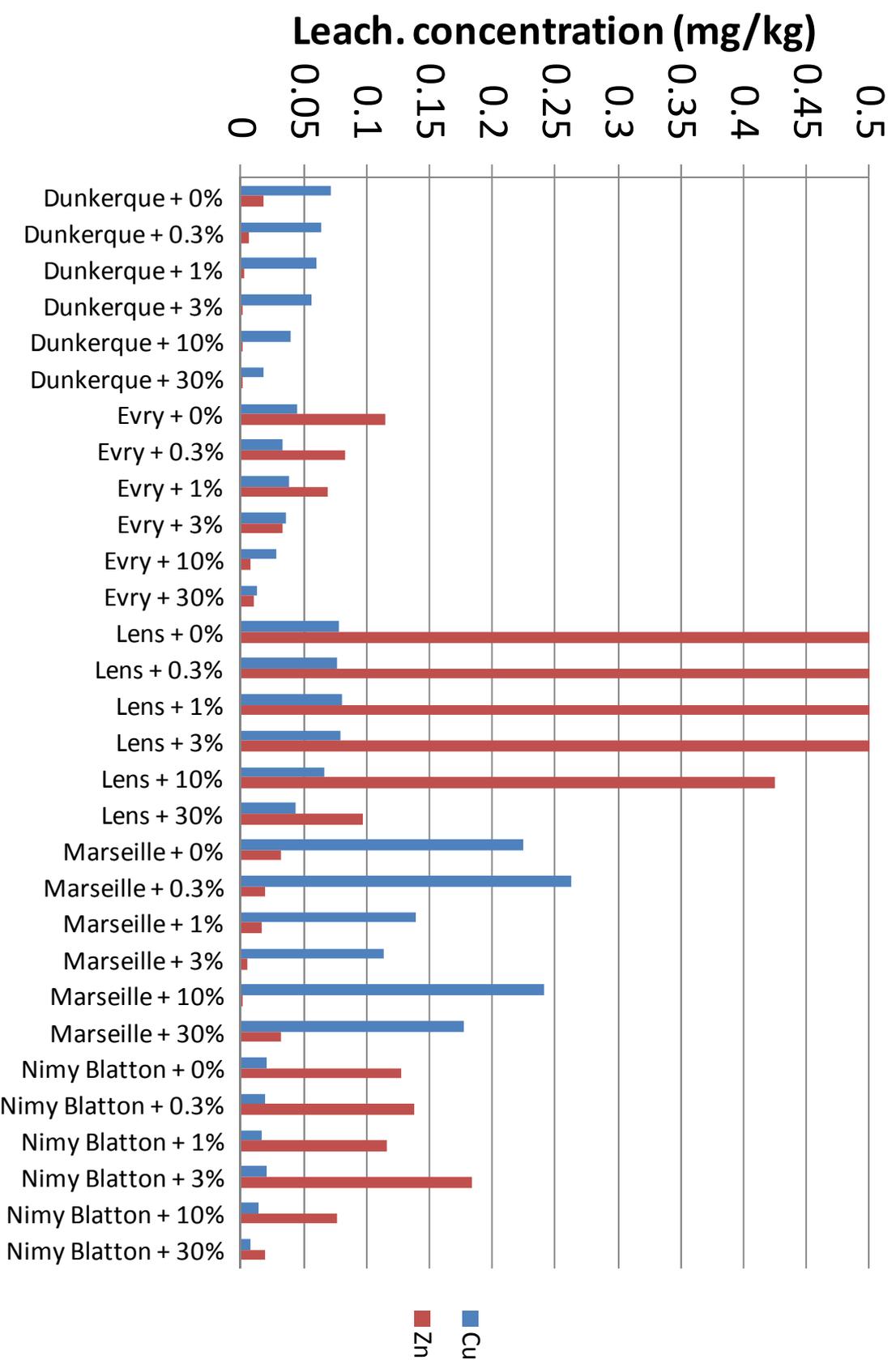


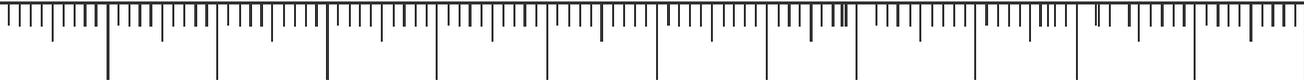
# Résultats/sols : sous-sol de Marseille en laboratoire



# Résultats/sols : 5 sédiments eaux douces et marines

## Marine, canal and highway storm basin Sediments





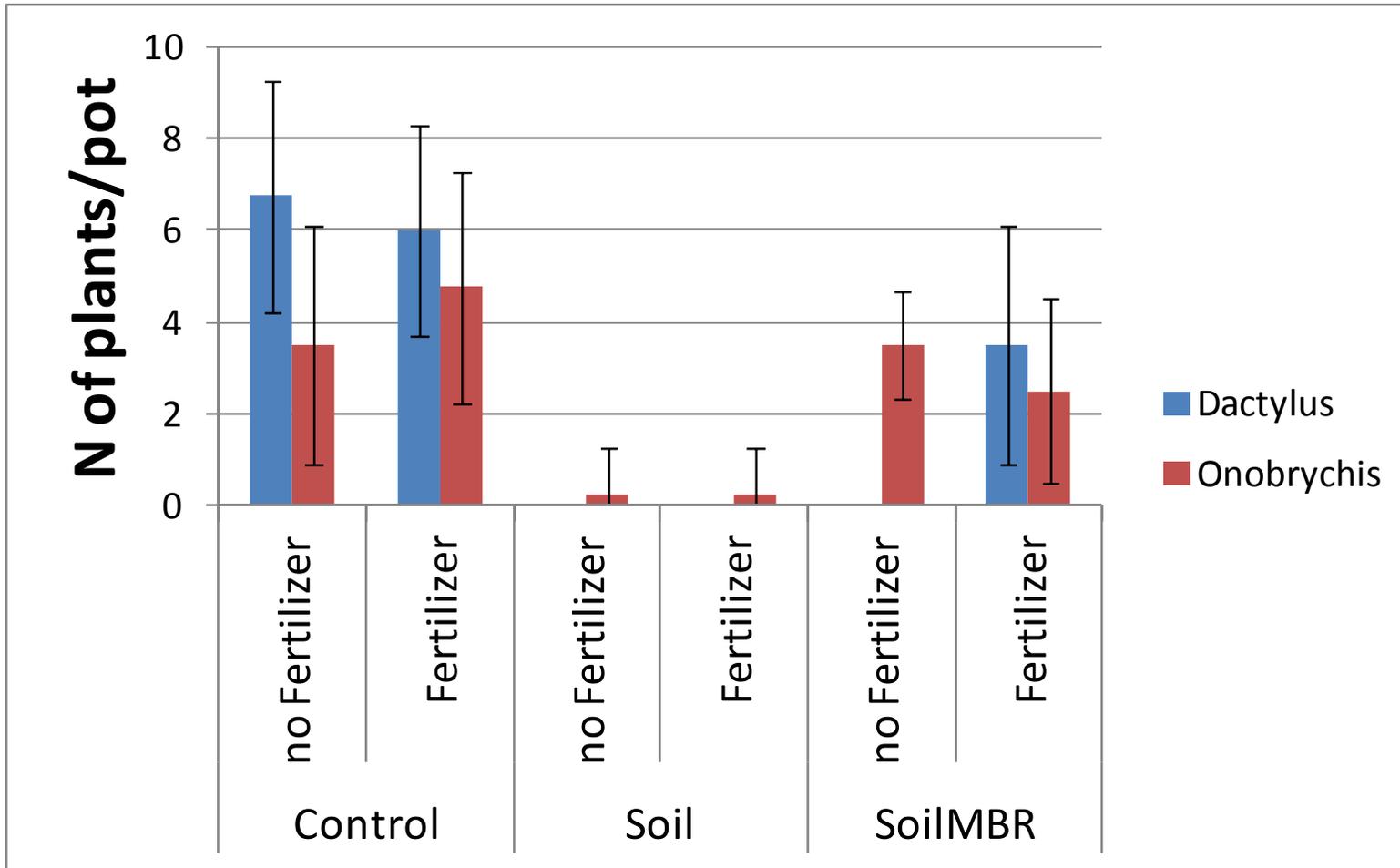
## Conclusion pour les tests de laboratoire des sols

Le RBM réduit la teneur lessivable de contaminants cationiques (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) et de contaminant anionique (Cr). Des concentrations lixiviables inférieures aux seuils d'acceptation pour la mise en décharge des déchets inertes sont obtenus avec une dose de RBM de 0,1 % à 30 %.

La quantité de sulfate et fluorure lixiviable émis à la dose de 30 % de RBM doit être étudié plus en profondeur.

# Résultats/phytotoxicité : essai de laboratoire en pot

St Félix 10% RBM



# Résultats/phytotoxicité : essai de laboratoire en pot

Sol minier Alès pH 3.5 : Sol, Sol + engrais, Sol + 0.1% RBM + engrais, idem 0.3%, 1%, 3%, 10%, 30%



# Résultats/phytotoxicité : essai en lysimètre

St Felix 10% RBM



A gauche :  
Sans RBM

A droite :  
avec RBM

78 jours  
après semis

# Résultats/phytotoxicité : pilote de terrain à St Félix

30 kg/m<sup>2</sup> RBM



# Résultats/phytotoxicité : pilote 108 jours après semis (malgré la sécheresse du printemps 2014)



# Résultats/phytotoxicité : pilote 216 jours après semis (malgré la sécheresse du printemps 2014)





## Conclusion pour la réduction de phytotoxicité

Le RBM et l'engrais suppriment la phytotoxicité d'un sol minier acide sans végétation depuis 70 ans.

Remarque : La quantité et la composition des eaux de drainage du sol non traité et traité sont suivies en mini-lysimètres.

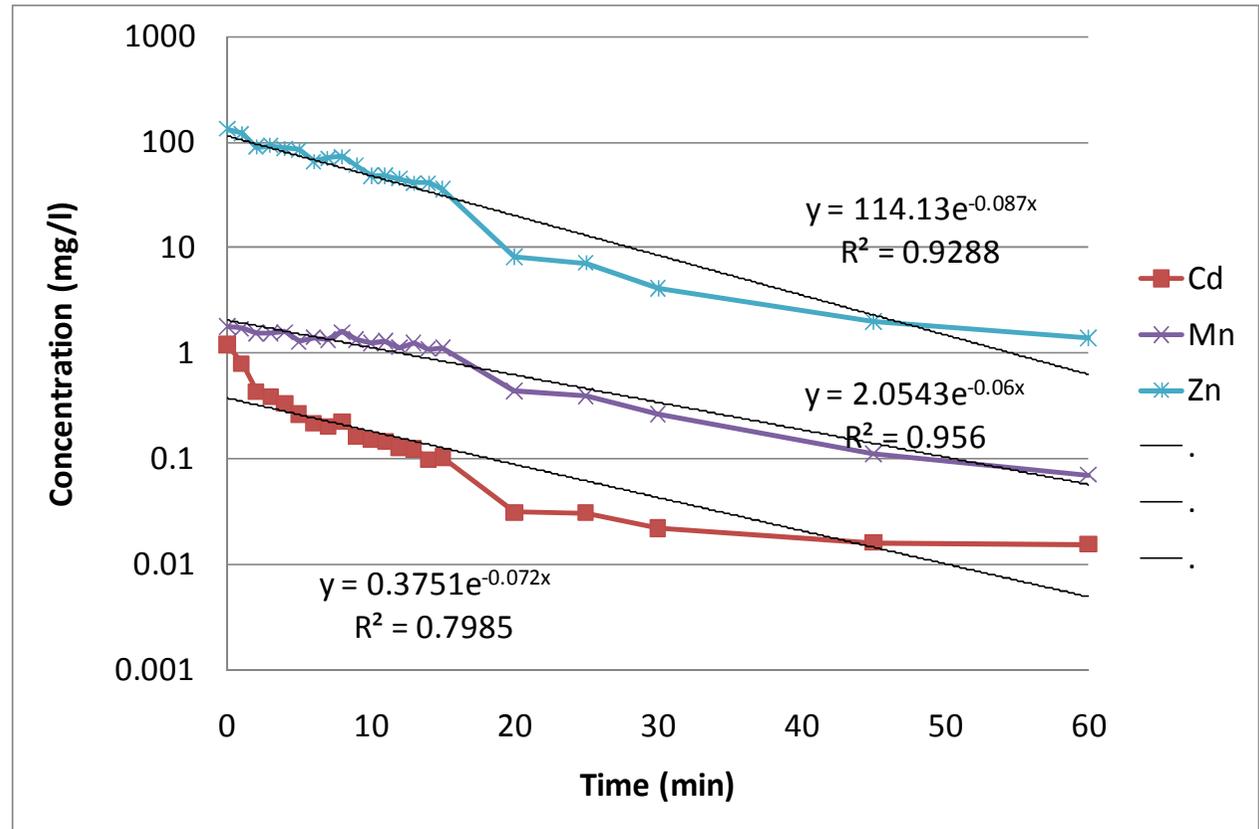
# Résultats/traitement des eaux: Cd, Mn, Zn

Cinétique

Drainage minier  
acide (DMA)

St Félix pH 4,5

en lot (30 l/kg)



$T_{90}$  : 32 min pour Cd, 38 min pour Mn, 26 min pour Zn

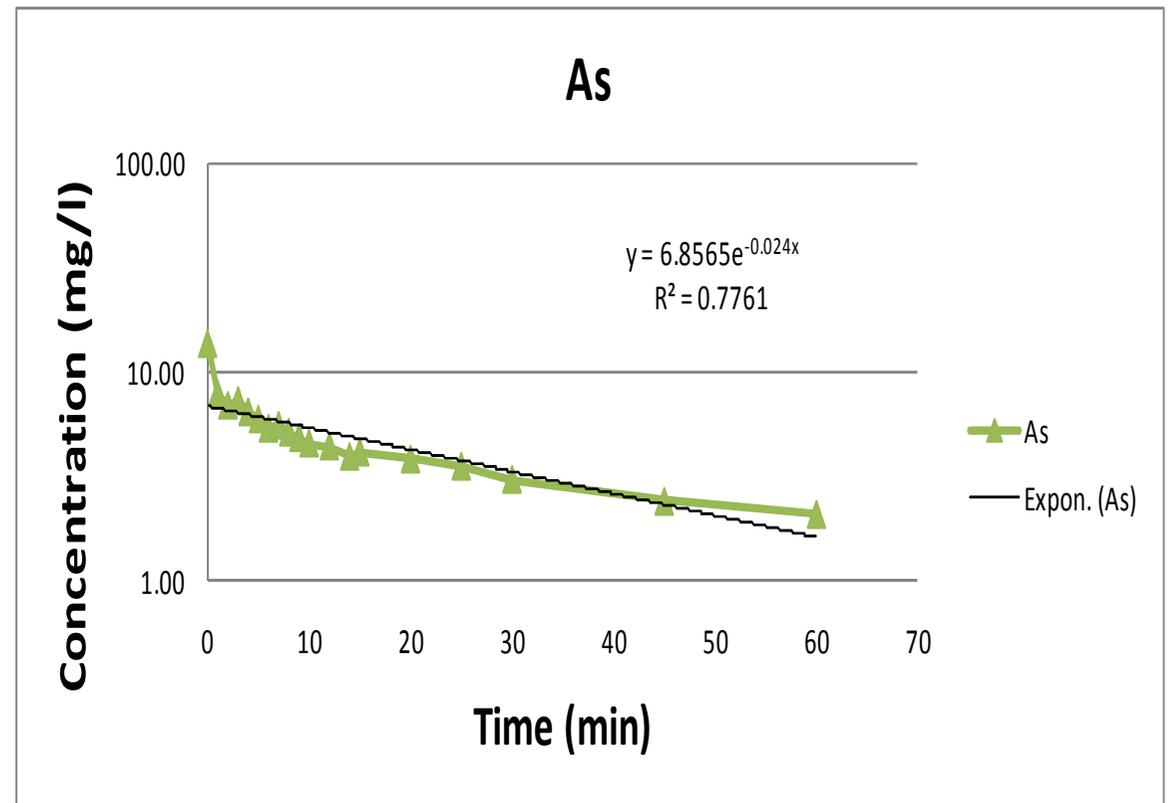
# Résultats/traitement des eaux : As

Cinétique

Ruissellement et  
drainage minier  
neutre (RDMN)

La Combe du Sault  
pH 7

en lot (30 l/kg)



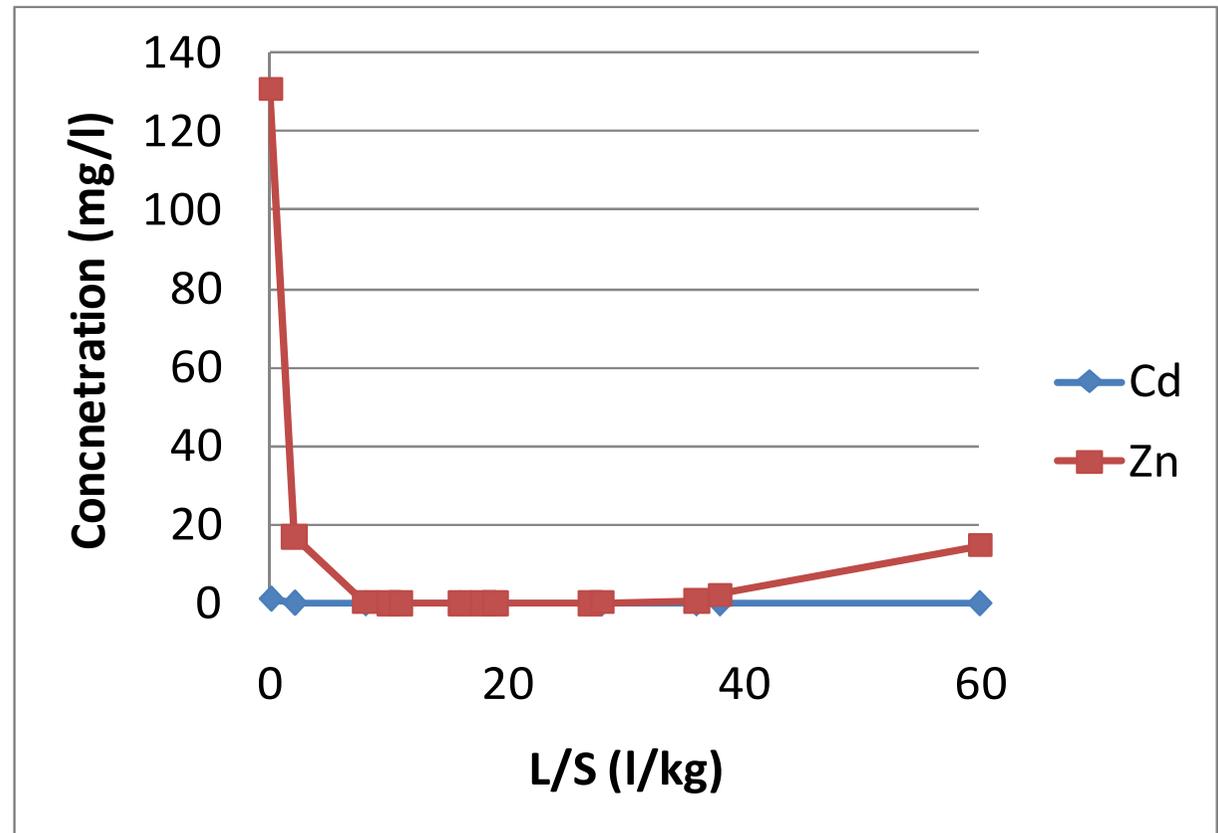
Approx.  $T_{90}$ : 96 min for As

# Résultats/traitement des eaux : Cd, Zn

Flux en colonne au  
laboratoire

Drainage minier  
acide (DMA)  
St Félix pH 4,5

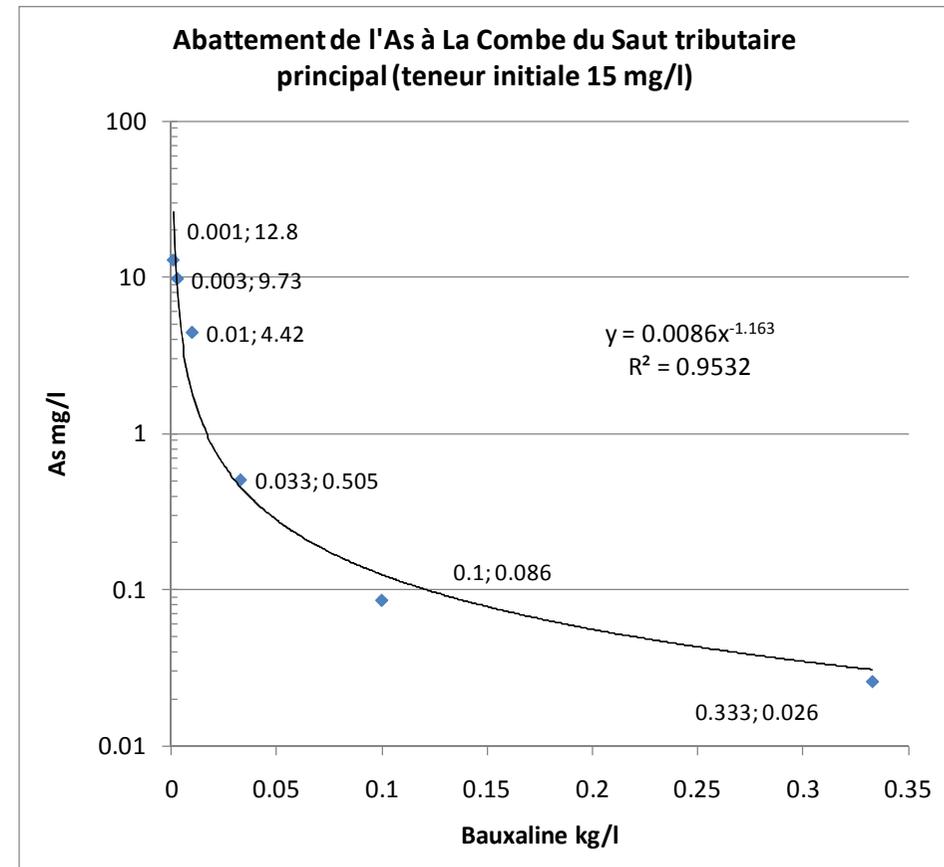
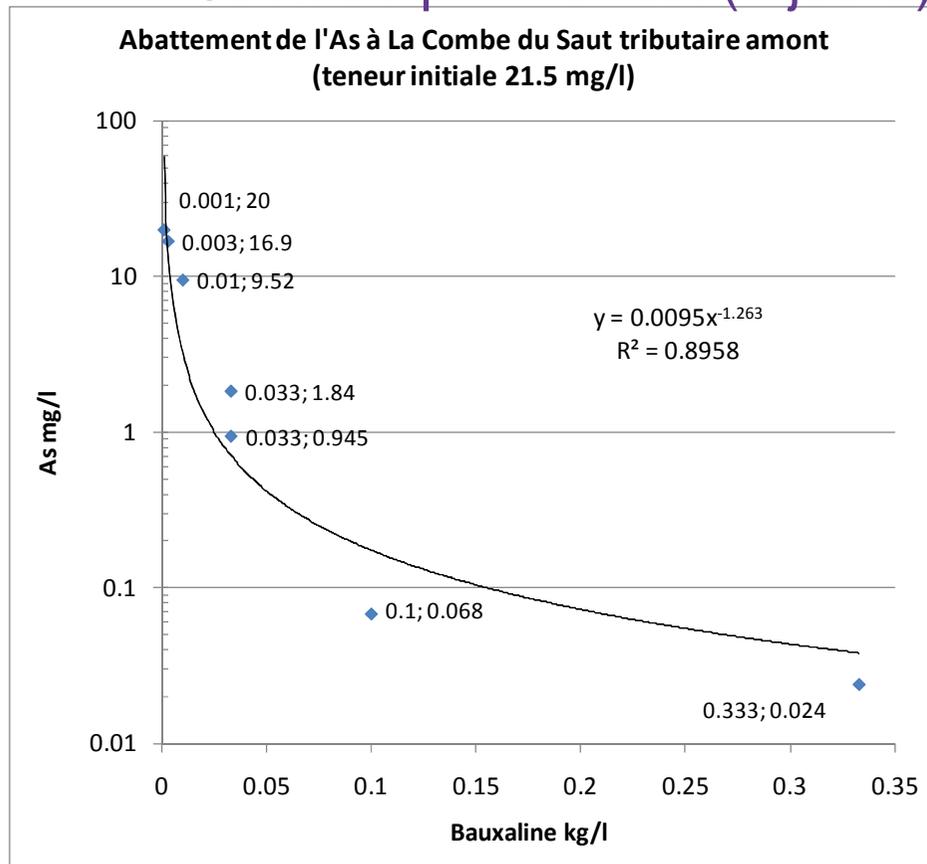
Eau/RBM de 0 à 60  
l/kg



# Résultats/traitement des eaux : As

Equilibre, différents rapports RBM/eau

Ruissellement et Drainage Minier Neutre (RDMN) de La Combe du Saut de pH 7 en lot (4 jours)



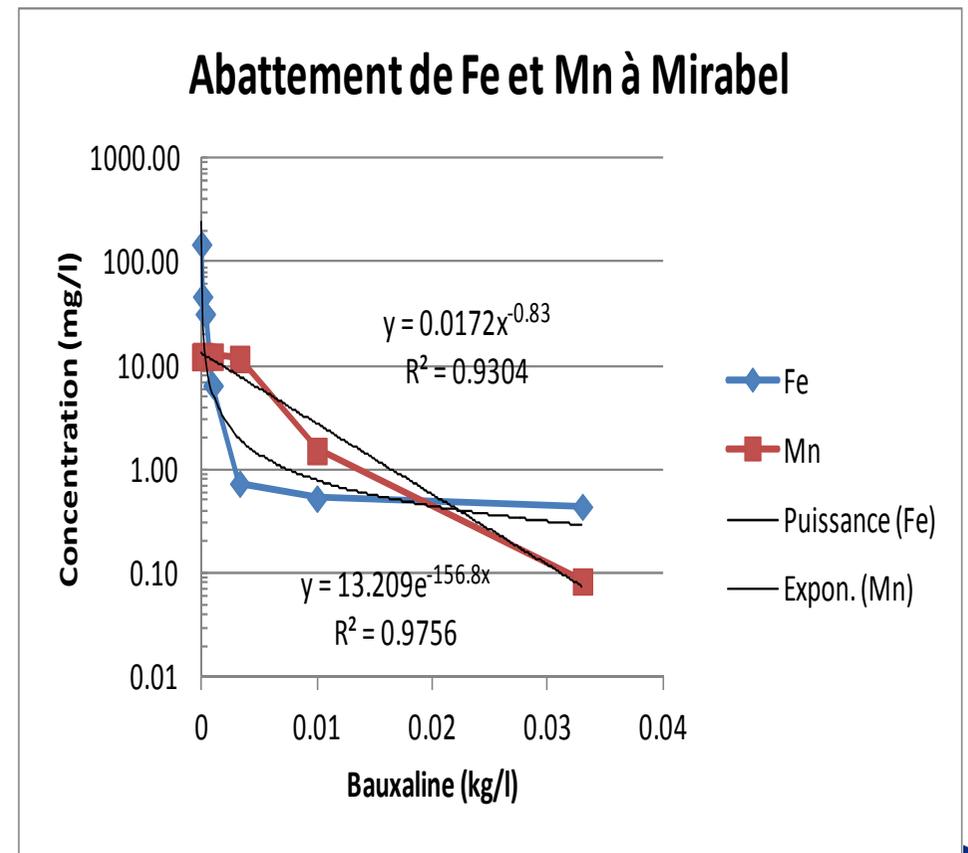
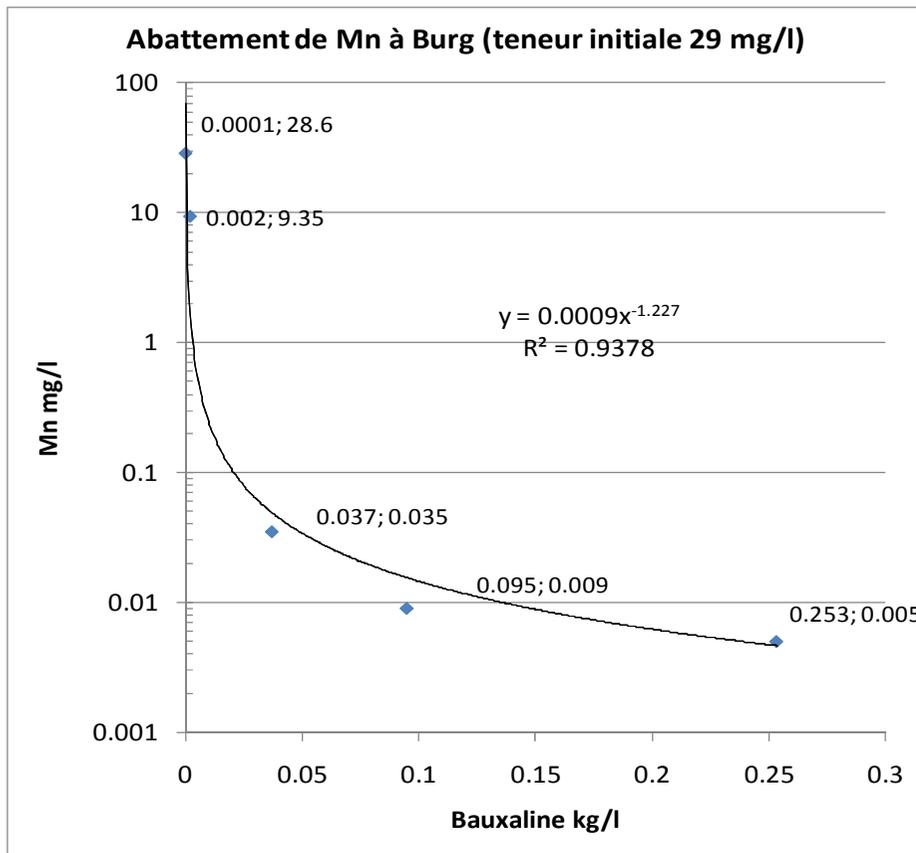
Deux eaux différentes du même site

# Résultats/traitement des eaux : Mn, Fe

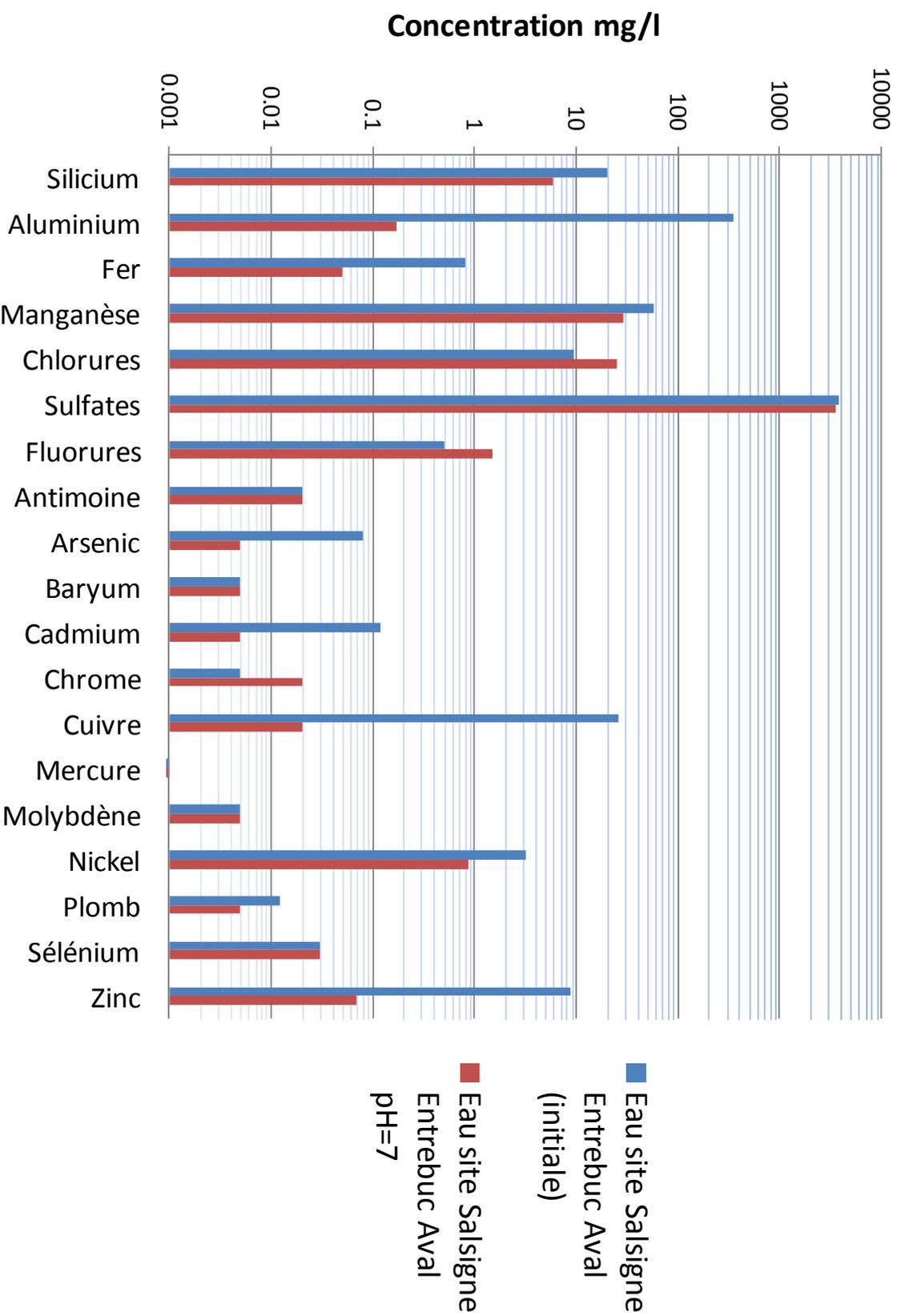
Equilibre, différents rapports RBM/eau

Drainage Minier Neutre (DMN) de Burg pH 6.3 en lot (4 jours) et

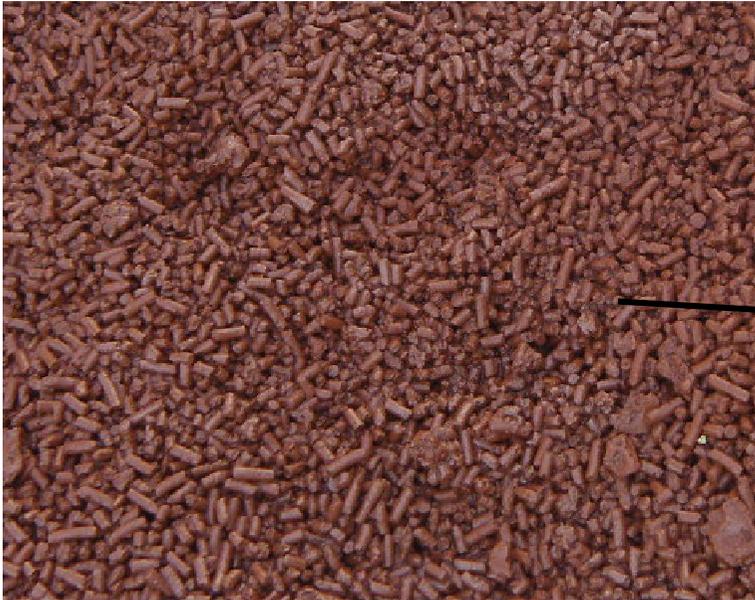
Drainage minier acide (DMA) de Mirabel pH 2,8 en lot (4 jours)



# Eau de Salsigne Entrebuc : de pH 3.93 à pH 7



# Résultats/traitement des eaux : pilote avec MBR granulé



RBM granulé

Flux

Pilote de traitement  
1500 l d'eau de St  
Félix avec 50 kg  
RBM : abattement de  
99,03 % de Zn et Cd

# Comportement à court terme du RBM usagé

Test de lixiviation  
EN 12457-2

Vert: <  
acceptation de  
décharge inerte

| Leachable concentration (mg/kg) | AMD Pilot | NMD    | RNMD   | NMD-Mn |
|---------------------------------|-----------|--------|--------|--------|
| pH                              | 8.28      | 8.87   | 8.77   | 8.44   |
| CT                              |           | 12.80  | 8.95   | 28.46  |
| Cl                              |           | 5.53   | 5.53   | 14.25  |
| COT                             |           | 7.28   | 3.42   | 14.21  |
| Si                              | 1.163     | 1.090  | 0.515  | 0.926  |
| Al                              | 0.118     | 0.305  | 0.265  | 0.328  |
| Fe                              | 0.013     | 0.006  | 0.009  | 0.010  |
| Mn                              | 0.003     | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| Co                              | <0.002    | <0.002 | <0.002 | <0.002 |
| As                              | <0.050    | <0.050 | <0.050 | <0.050 |
| Ba                              | <0.030    | <0.030 | 0.051  | <0.030 |
| Cd                              | <0.001    | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| Cr                              | <0.004    | 0.023  | <0.004 | 0.046  |
| Cu                              | <0.001    | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| Mo                              | <0.004    | 0.009  | 0.008  | 0.006  |
| Ni                              | <0.004    | <0.004 | <0.004 | <0.004 |
| Pb                              | <0.020    | <0.020 | <0.020 | <0.020 |
| Sb                              | <0.030    | <0.030 | <0.030 | <0.030 |
| Se                              | 0.063     | 0.063  | 0.063  | 0.069  |
| Zn                              | 0.012     | <0.001 | <0.001 | <0.001 |

# Comportement à long terme du RBM usagé : suivi de lysimètres (démarré 04/2014) à Aix-en-Provence



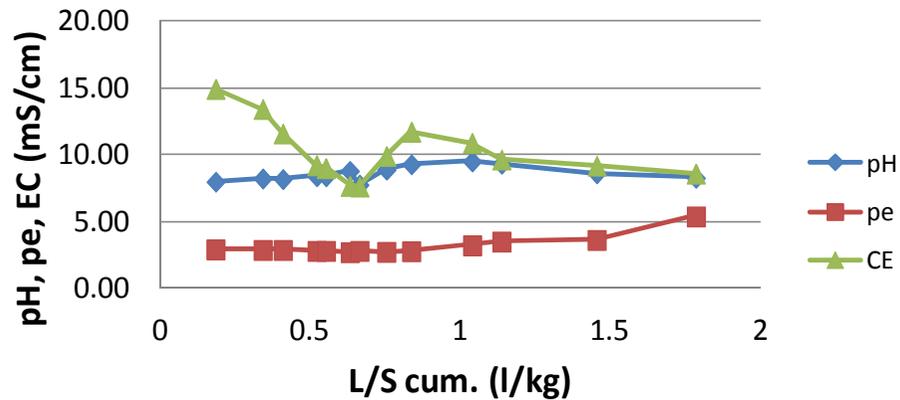
Cover :  
sand, MBR,  
soil

MBR/Spent  
MBR

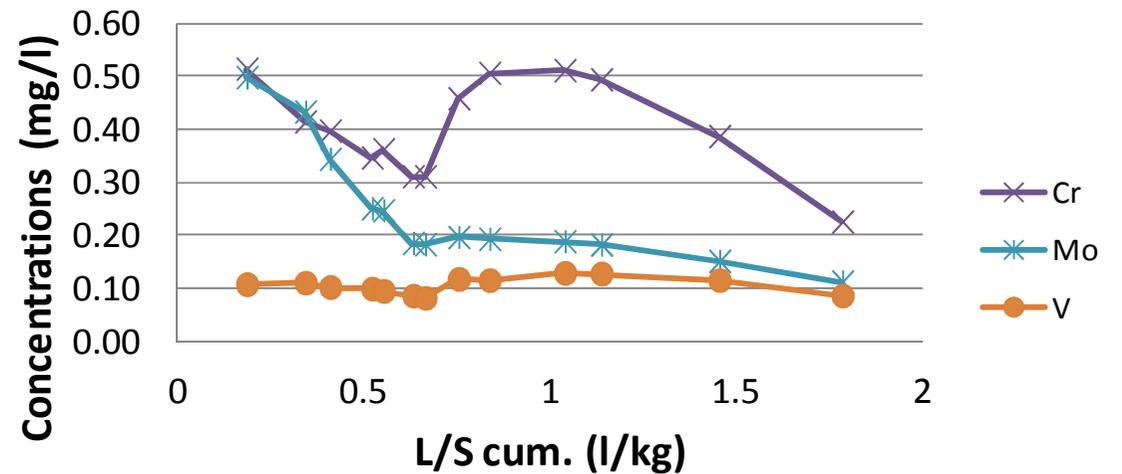
Sand

# Emission en lysimètres : Résidu de Bauxite Modifié

Modified Bauxite Residue : emission in lysimeter

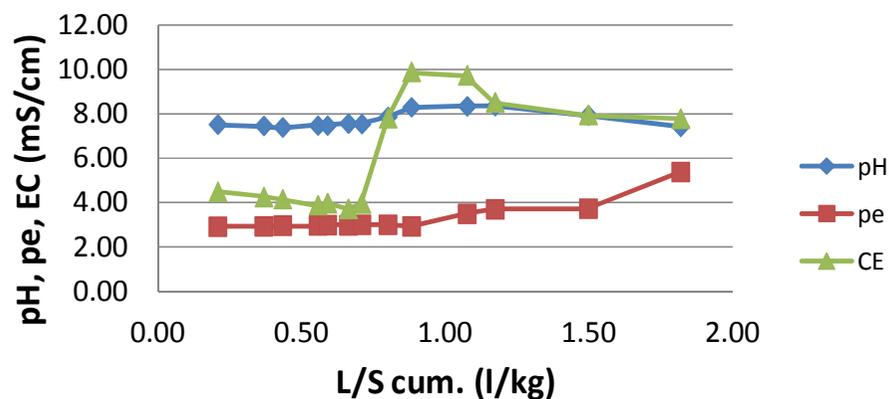


Modified Bauxite Residue : emission in lysimeter

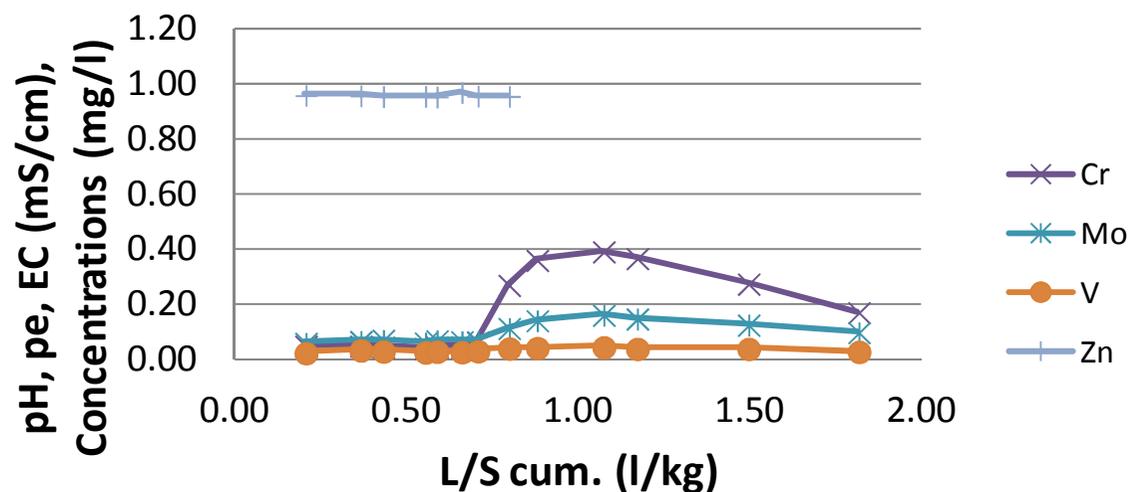


# Emission en lysimètres : Résidu de Bauxite Modifié après traitement de drainage minier acide

MBR after Acid Mine Drainage treatment :  
emission in lysimeter



MBR after Acid Mine Drainage treatment :  
emission in lysimeter

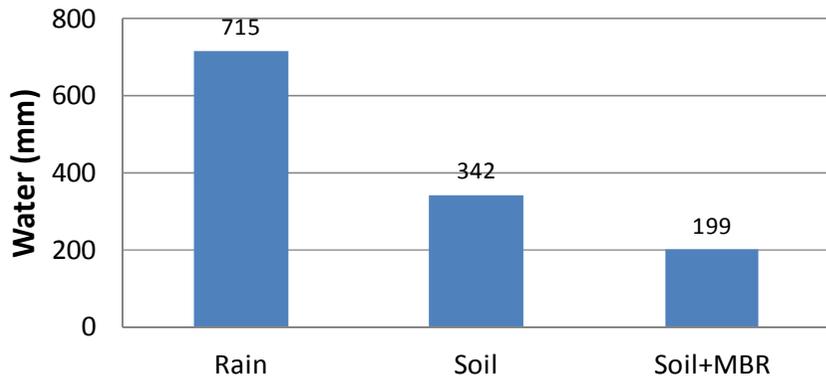


# Résultats/émission des sols vers les eaux souterraines : essai en lysimètre

St Felix 10% RBM : drainage divisé par 1.7, Cd 45, Pb 12, Zn 352

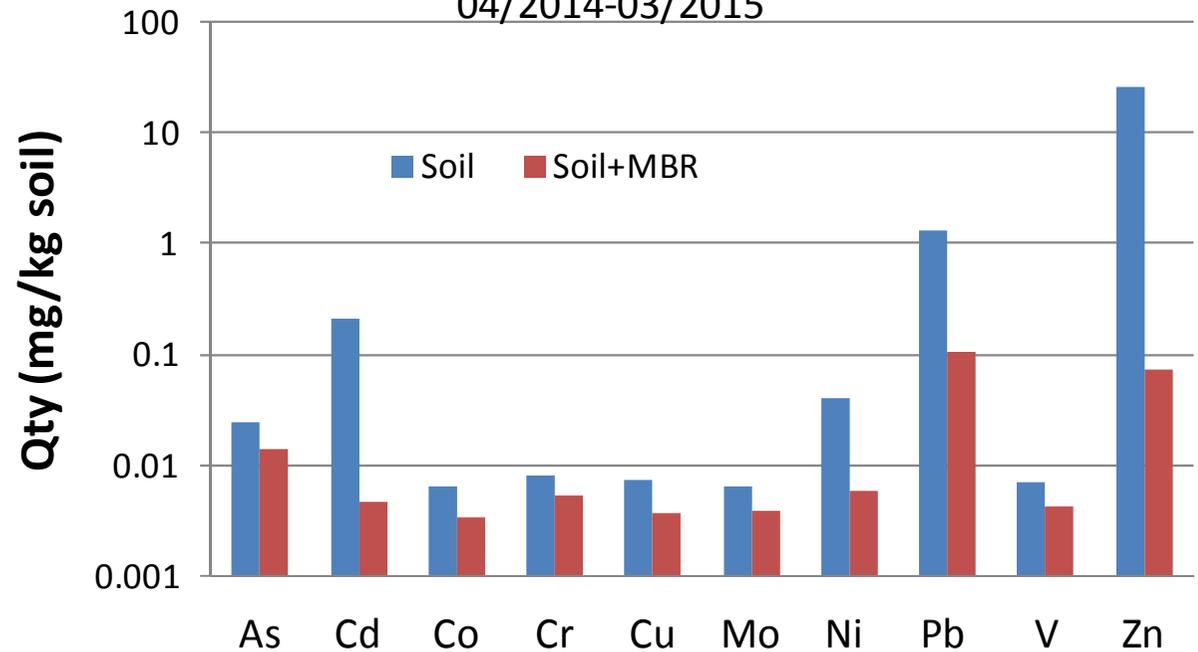
St Felix Drainage in lysimeters

04/2014 - 03/2015



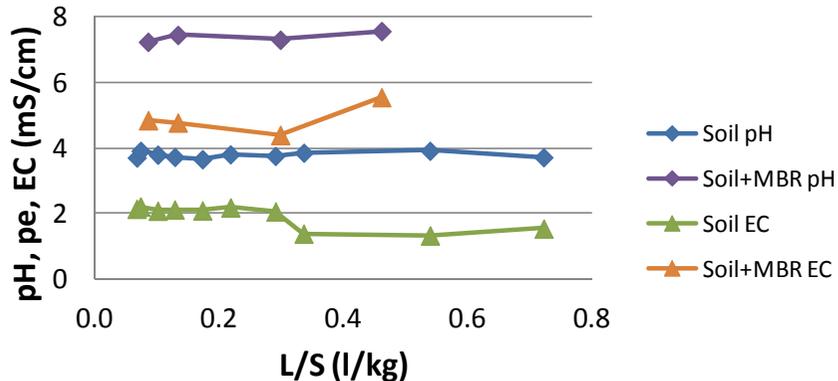
St Felix Drainage in lysimeters

04/2014-03/2015



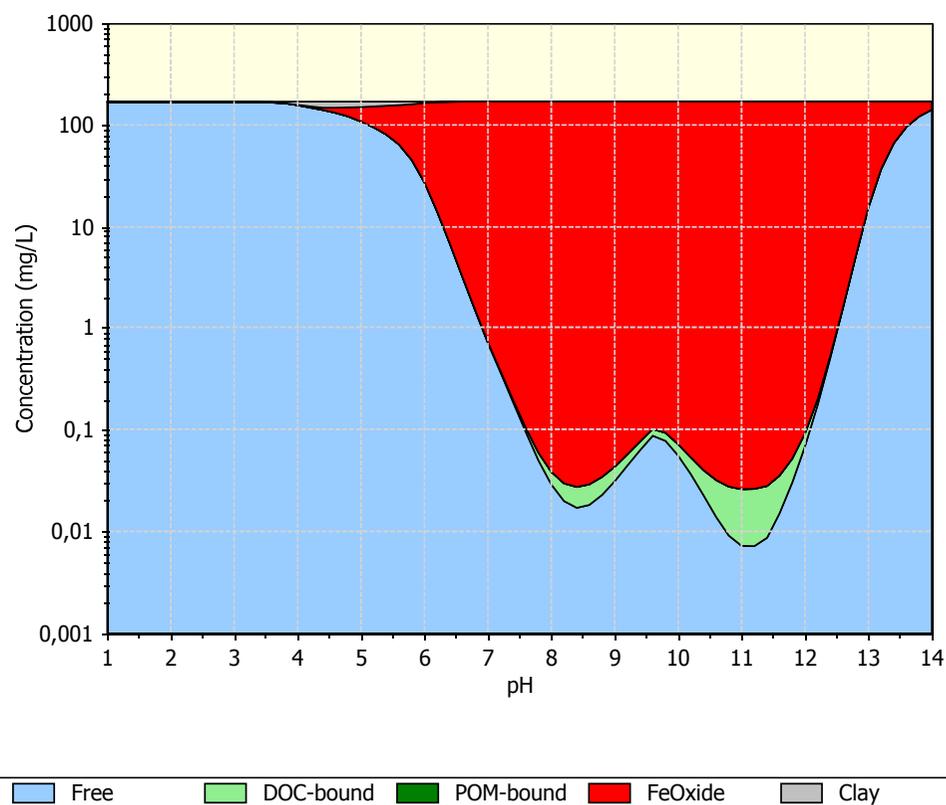
St Felix Drainage in lysimeters

04/2014 - 03/2015



# Comportement à long terme du RBM usagé : spéciation de Zn dans les phases solide et liquide

Phase distribution of Zn<sup>+2</sup>



Collaboration P. Merdy, Université Sud Toulon Var (F) et J. Dijkstra and A. van Zomeren, Energy Center of the Netherlands

# Comportement à long terme de RBM usagé : hypothèse de fixation pour certains éléments

Selon les résultats expérimentaux de traitement de l'eau et la littérature, les mécanismes de fixation sont probablement :

- Précipitation de surface (Fe et Al) par effet du pH
- Complexation par les oxyhydroxydes de Fe et d'Al (Zn et Cd) (l'attraction électrostatique serait secondaire)
- Complexation spécifique de sphère interne évoluant vers une liaison covalente (As).
- Oxydation (Fe) et Oxydation accélérée par la surface et effet de pH de Mn (II) à Mn (IV) et précipitation de MnO<sub>2</sub>

La fixation des éléments sera approfondie dans la suite du projet.

# RBM sans mélange avec un sol : une solution de couverture et végétalisation des stockages et des dépôts miniers

Les plantes poussent dans le résidu de bauxite modifié

Sans apport de matière organique

Avec apport d'engrais à dose agronomique

Le drainage est réduit d'un facteur 2 (résultat provisoire)

**Les applications potentielles sont très nombreuses**



D'un sol africain bauxitique ... à un sol européen de résidu de bauxite ? Du sol au sol ? Le cercle est bouclé ?



## Conclusion (1/2)

### SOLS CONTAMINES

Un ajout de 10 % à 30 % de résidus de bauxite modifié (RBM) réduit les concentrations lixiviables de contaminants à des concentrations inférieures aux critères d'acceptation en stockage pour déchets inertes, pour des cations (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn), ainsi que pour un anion (Cr), stabilise le pH vers 8 et réduit la concentration d'Al, Fe et Mn potentiellement phytotoxiques.

### PHYTOTOXICITE DES SOLS

La végétalisation des sols miniers phytotoxiques est possible avec le RBM et de l'engrais.

### EAUX CONTAMINEES

La précipitation de 90 % de Fe se produit en 1 min (résultats non présentés) et la fixation de 90 % de Cd, Zn et Mn se produit en 20 à 100 minutes.

## Conclusion (2/2)

Dix eaux différentes (drainage minier acide, drainage minier neutre, ruissellement et drainage minier neutre et drainage minier riche en Mn) ont été traitées avec succès, avec la réduction des émissions > 99 % et fréquemment > 99,99 % ou jusqu'à la limite de quantification. Le traitement en flux en colonne de granulé a le même rendement que le traitement en flacon en poudre.

### RESIDU DE BAUXITE USAGE

Les éléments semblent bien fixés sur le RBM usagé : aucune lixiviation significative n'est observée au laboratoire. Les concentrations en sulfate et fluorure dépassent les critères d'admission des déchets inertes. Une étude à long terme est démarrée.

### COUVERTURE VEGETALISEE

Nous cherchons un vaste site contaminé...

Merci...

