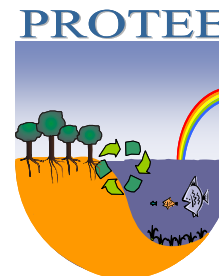


INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable

Pierre HENNEBERT

UNIVERSITÉ
DE TOULON



Patricia MERDY



Résidus de bauxite modifié (RBM):
Transformation en sol & immobilisation des
contaminants minéraux des eaux et des sols.



ETAT DES LIEUX ET OBJECTIFS



FLUX DE DÉCHETS EN FRANCE ET INDUSTRIE DE L'ALUMINE

Ordures ménagères
et assimilées

70 Mt

Mâchefers
d'incinération
d'ordures
ménagères

3.3 Mt

Boues de station
d'épuration
urbaine

1.1 Mt

Résidu de bauxite

0.3 Mt

L'industrie de l'alumine et de l'aluminium produit :

- 1.5 tonnes de résidu de bauxite/tonne d'alumine (Al_2O_3)
- Accumulation annuelle mondiale : 80 Millions tonnes
- Stock accumulé : 3 Milliards tonnes

RECYCLAGE –REUTILISATION A DES FINS UTILES

TRANSFORMATION DE LA BAUXALINE® EN RBM

PRODUCTION DE LA BAUXALINE

Bauxite de Guinée

+ Soude (NaOH)
180°C

$\text{Al}(\text{OH})_3$ + boue rouge

Phase précipitée

Lavage, séchage, en
filtre presse

Bauxaline®

pH=10,5 à 11,5

Matériau non structuré, peu perméable

NaOH, NaHCO₃, Na₂CO₃

PRODUCTION « résidu de bauxite modifié » (RBM)

Bauxaline®

+ gypse = sulfate de calcium
Et CO₂ atmosphérique

$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4$ (pH 8.5)

RBM:

Matériau structuré, à structure stable, et perméable

gypse = plâtre après gâchage ou résidu d'épuration de fumées de combustion

CLASSIFICATION EN DANGEROUSITÉ

Déchets non dangereux non inerte (Rapport INERIS 2012)

« Selon le code européen des déchets et selon leur composition chimique, la Bauxaline® n'est pas classée dangereuse par application du Code de l'Environnement.

- ❑ **Les concentrations en soude** sont inférieures aux limites de concentration (spécifiques pour cette substance).
- ❑ **Le chrome** n'est pas présent majoritairement sous forme de chromate soluble qui pourrait entraîner un classement.
- ❑ **Le vanadium** a une concentration inférieure aux concentrations qui pourraient entraîner un classement.
- ❑ **Les six tests écotoxicologiques** montrent des écotoxicités aiguë et chronique inférieures aux seuils admis

et aboutissent donc à un classement comme non dangereux pour ce critère. La Bauxaline® est donc classée non dangereuse pour tous les critères H1 à H15. »

Bauxaline® RBM



Neutralisation du Déchets Miniers Acides et sols contaminés

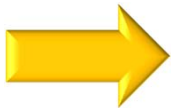
« verrous à lever »?

①



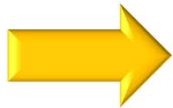
Quelle méthode utiliser pour la rendre efficace et généralisable?

②



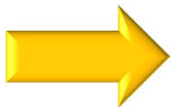
Comment vérifier l'efficacité du traitement à court et à long terme?

③



Mécanismes de rétention des contaminants

④



Possibilité de réhabiliter des sites contaminés par de la re-végétalisation après traitement?

Risques?

RECYCLAGE DE LA BAUXALINE

- ① TRAITEMENT D'EAU ACIDE PAR LE RBM
 - ② TRANSFORMATION EN UN SOL
 - ③ DÉPHOSPHATATION D'EAUX USÉES
-

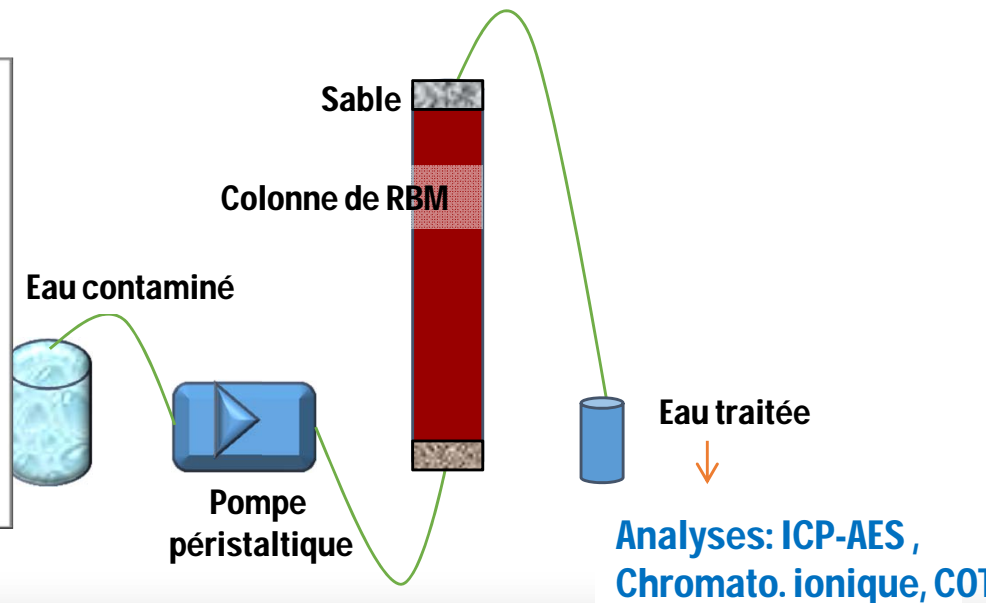
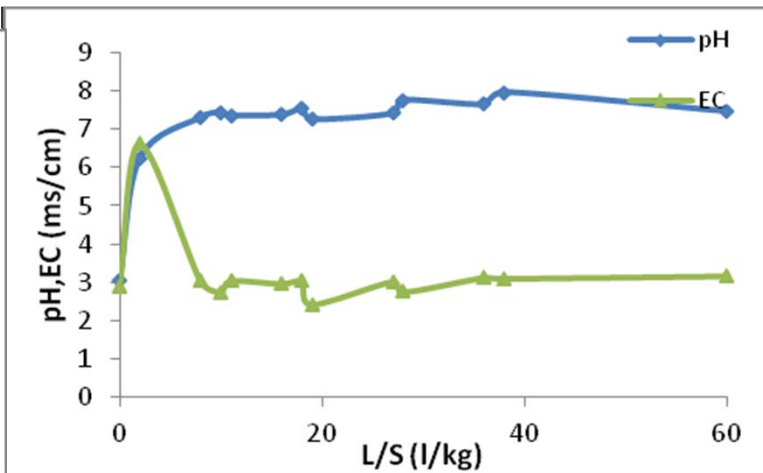
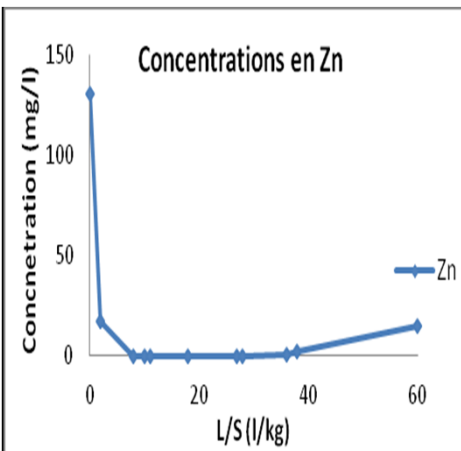
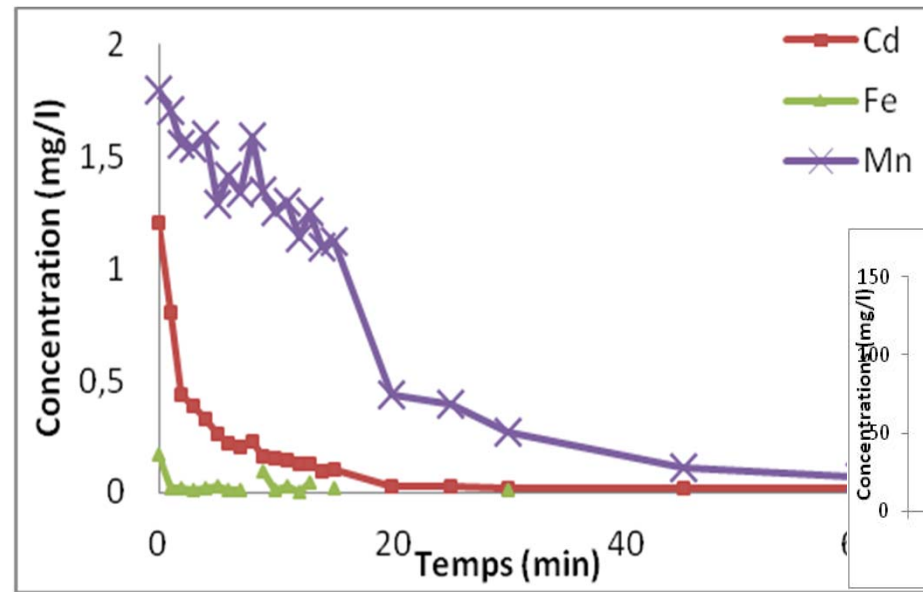
① Traitement d'eaux acides d'origine minière

Cinétique d'action

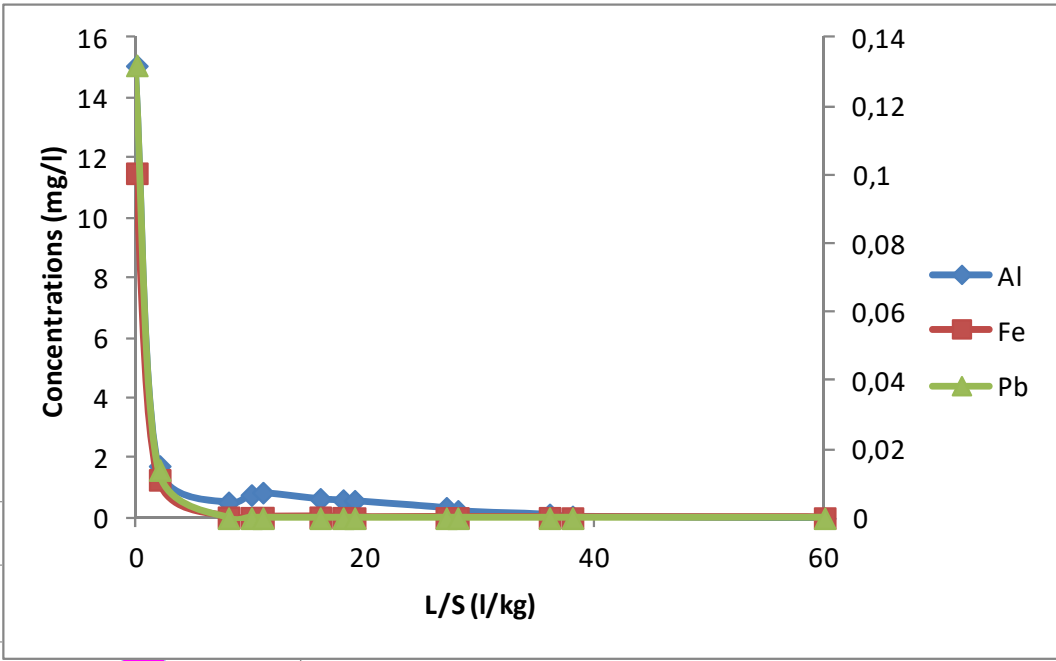
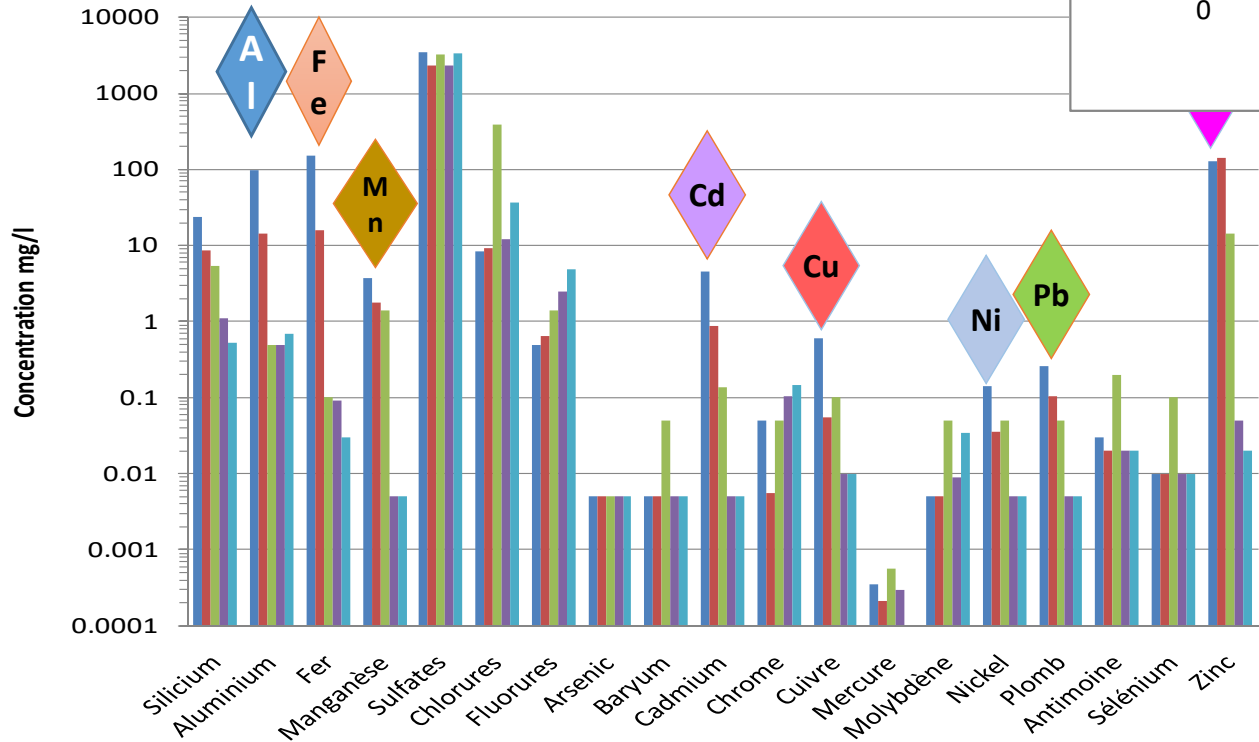
Taux d'abattement de Zn 98,9%

Temps nécessaires pour l'abattement des éléments présents dans l'eau: 1h

Traitement d'eau à flux ascendant



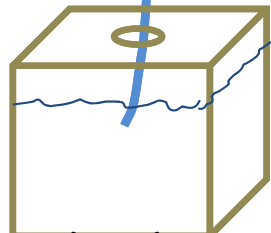
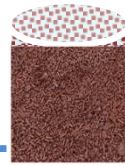
Effet dose de RBM St Felix pH 2.7



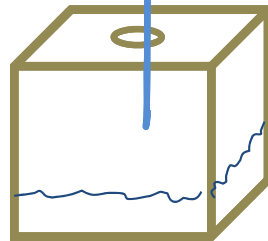
Traitement de l'eau à l'échelle pilote

Fût (60 l) contenant 50kg de Bauxaline®-gypse en granulés

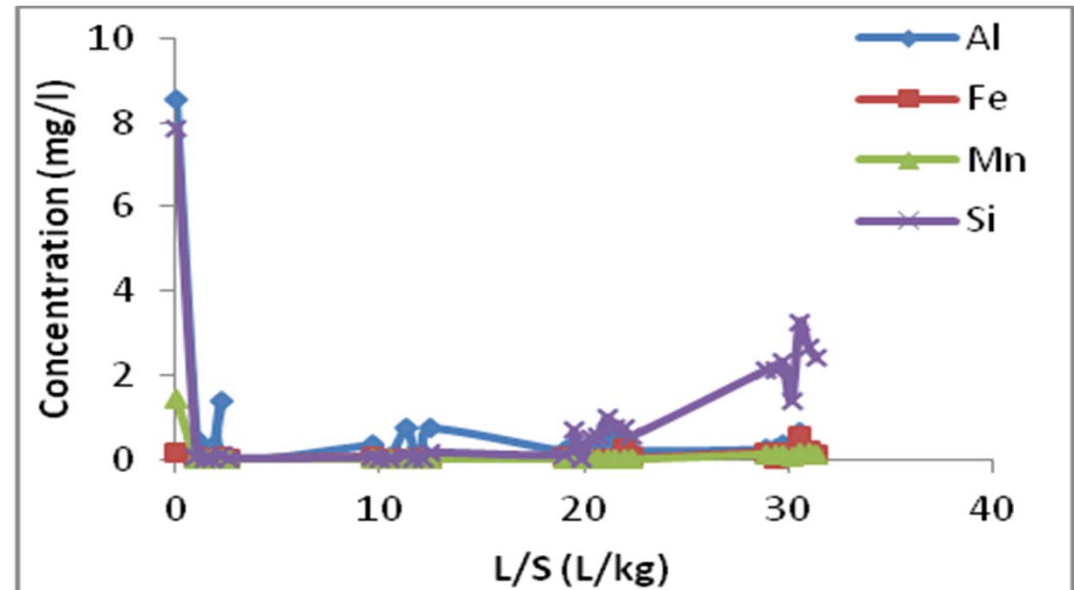
pompe péristaltique



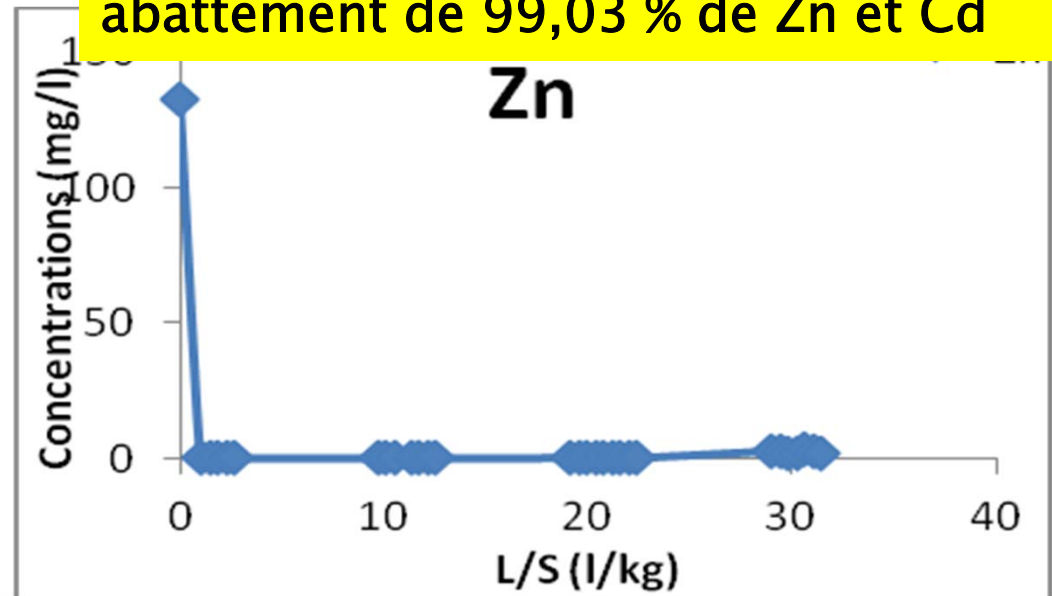
cuve (1000L) d'eau de DMA (Saint Félix)



cuve réceptrice de l'eau traitée



abattement de 99,03 % de Zn et Cd



① Traitement d'eaux acides d'origine minière **CONCLUSIONS**

Les traitements sont efficaces

Abattements > 99% obtenus

Eaux acides

le traitement à la Bauxaline® est piloté par le pH, typiquement jusqu'à pH 7.

**Eaux non acides
(pH>6,5)**

le traitement au RBM est piloté par le rapport S/L.

**eaux manganeeuses
non-acides**

le traitement au RBM permet un abattement efficace

Vitesses de réaction

compatibles avec les temps de séjour dans les installations.

L'apport de Bauxaline® ou RBM à doses élevées

légère augmentation des anions SO₄, Cl, F, Cr, Mo et Se dans les eaux traitées

Les travaux se concentrent sur le devenir du RBM usagé.

② Transformation en sol (pour terre végétale de couverture)

RBM seul

Les plantes poussent dans le RBM seul:

- ☘ Sans apport de **matière organique** en cas de forte dose d'**engrais**
- ☘ Avec une dose réduite de **compost** en cas d'apport d'engrais à dose agronomique

① Essais en pots



② Essais en Lysimètres



③ Essais pilote



- ☘ Suivi de croissance des plantes et de leur composition
- ☘ Dosage des éléments métalliques/métalloïdes libérés dans les eaux de drainage
- ☘ Suivi du pH, Eh

② Transformation en sol – Risques d'émissions de métaux/métalloïdes

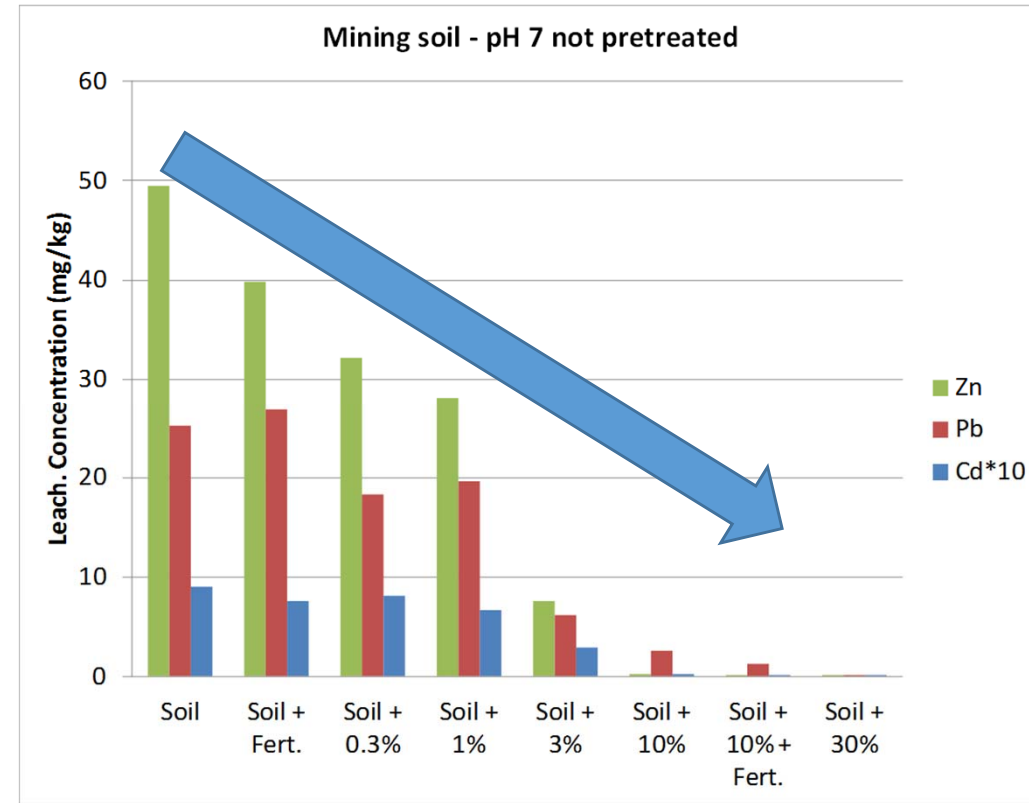
RBM + sol contaminé

Efficacité du traitement pour l'abattement des métaux/métalloïdes



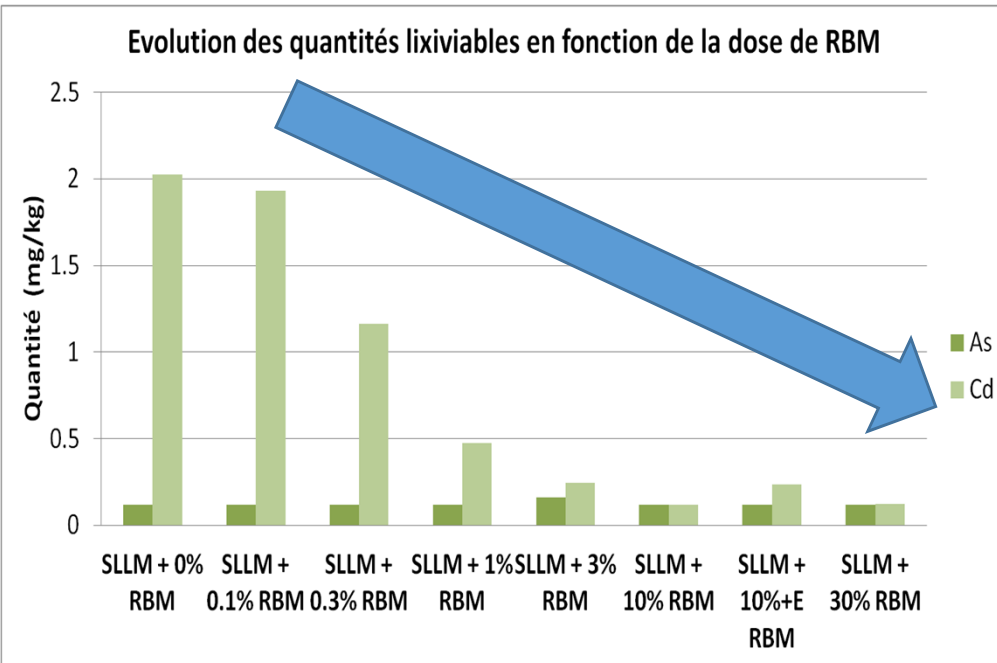
Sol contaminé + RBM

Lixiviat ?



Y a-t-il transfert de contaminants vers la plante?

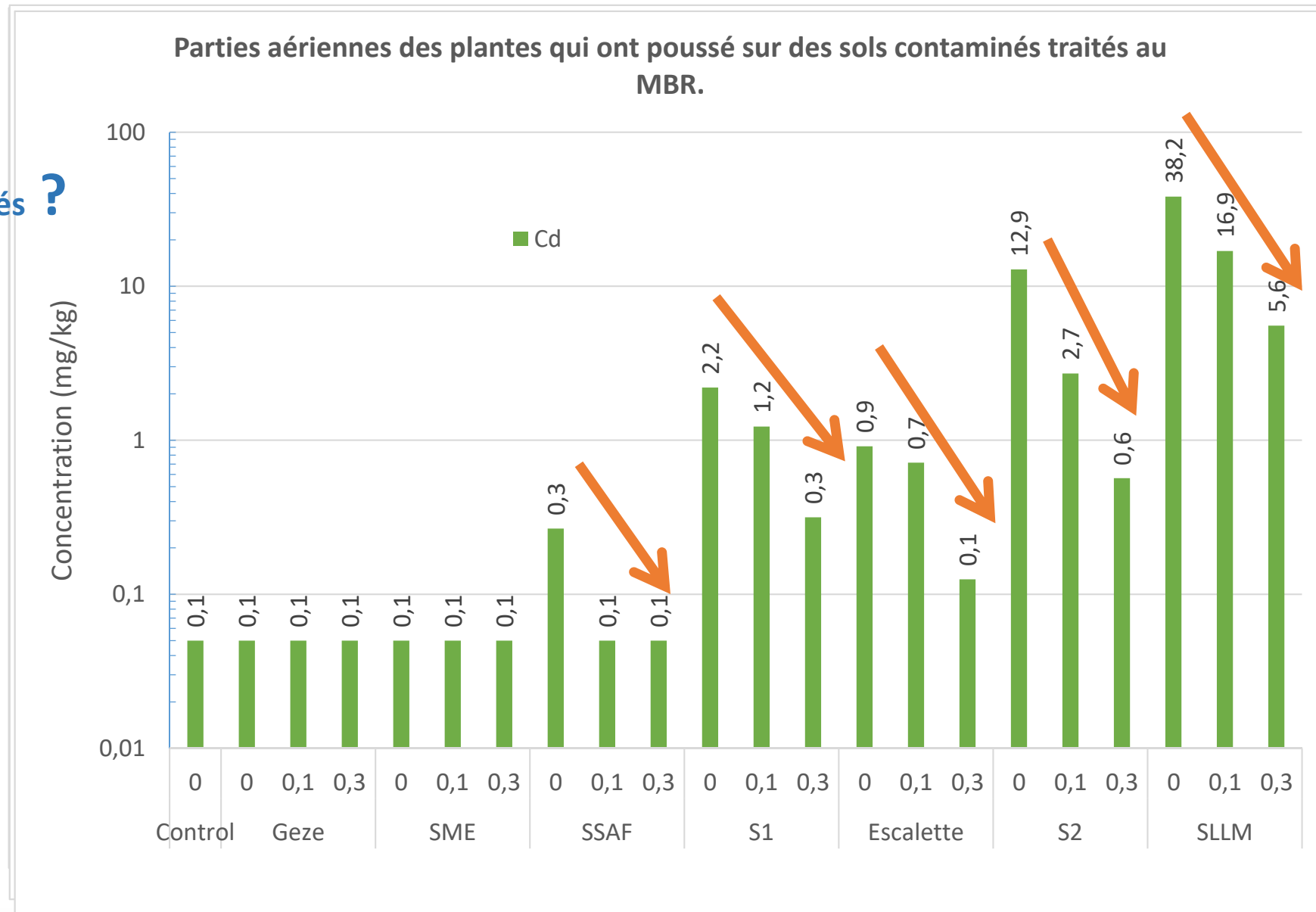
Evolution des quantités lixiviables en fonction de la dose de RBM



② Transformation en sol – Risques de transferts dans les plantes



Feuilles
contaminés



② Transformation en sol – CONCLUSIONS

Le mélange avec le RBM permet la **réduction de la fraction lixiviable** des résidus miniers, des sols et des sédiments contaminés
et
réduit les quantités de métaux dans les plantes.

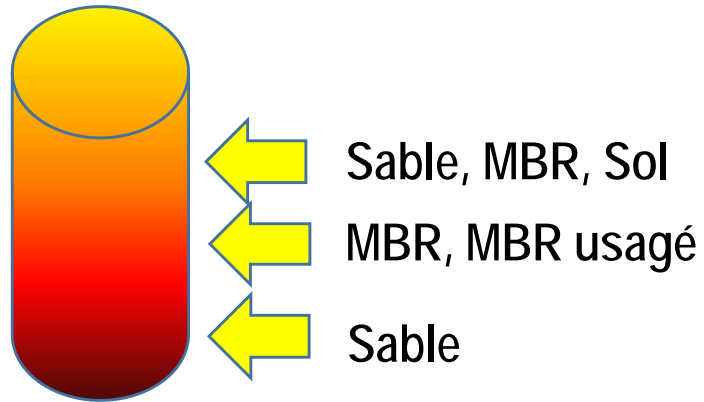
- ❑ Les ETM sont immobilisés par les mécanismes de:
Précipitation de surface (Fe et Al) par effet du pH, Complexation par les oxyhydroxydes de Fe et d'Al (Zn et Cd), Complexation spécifique de sphère interne évoluant vers une liaison covalente (As), Oxydation de Mn (II) à Mn (IV) et précipitation de MnO_2
- ❑ Tant que le milieu reste non acide et oxydé, ces mécanismes immobiliseront les ETM.
- ❑ Les études doivent se concentrer sur le maintien de ces conditions.



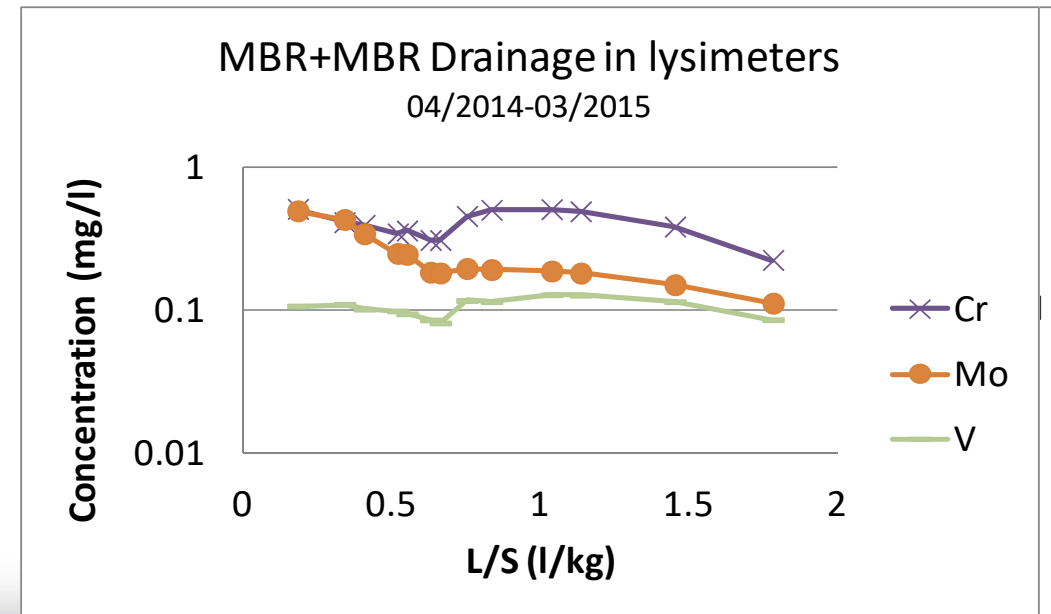
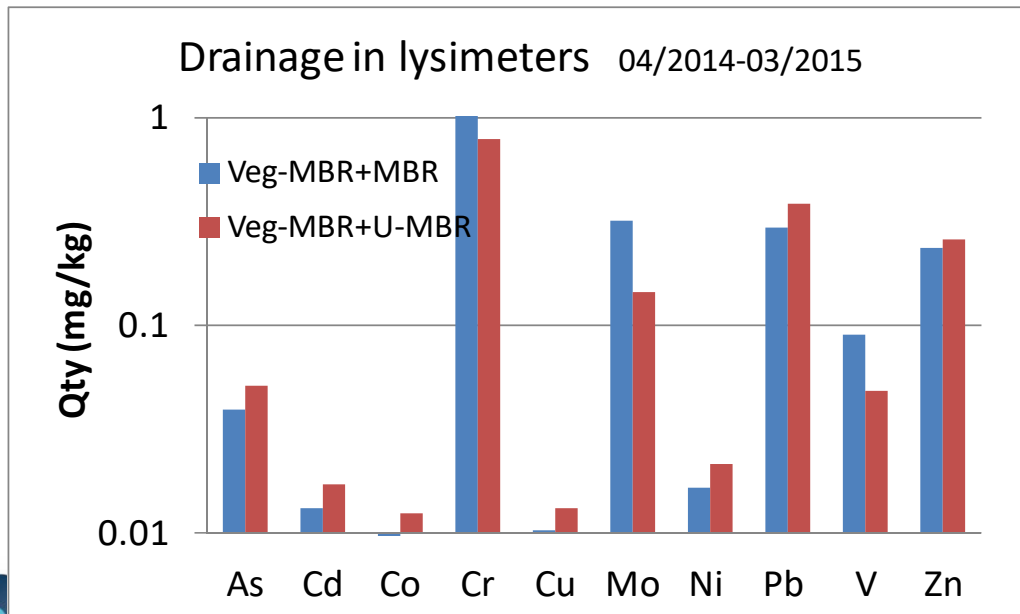
Réduction des transferts vers les Feuilles

Abattement des métaux dans les lixiviats

② Comportement à long terme du RBM usagé : suivi de lysimètres (depuis 04/2014) à Aix-en-Provence



Emissions cumulées 1 an



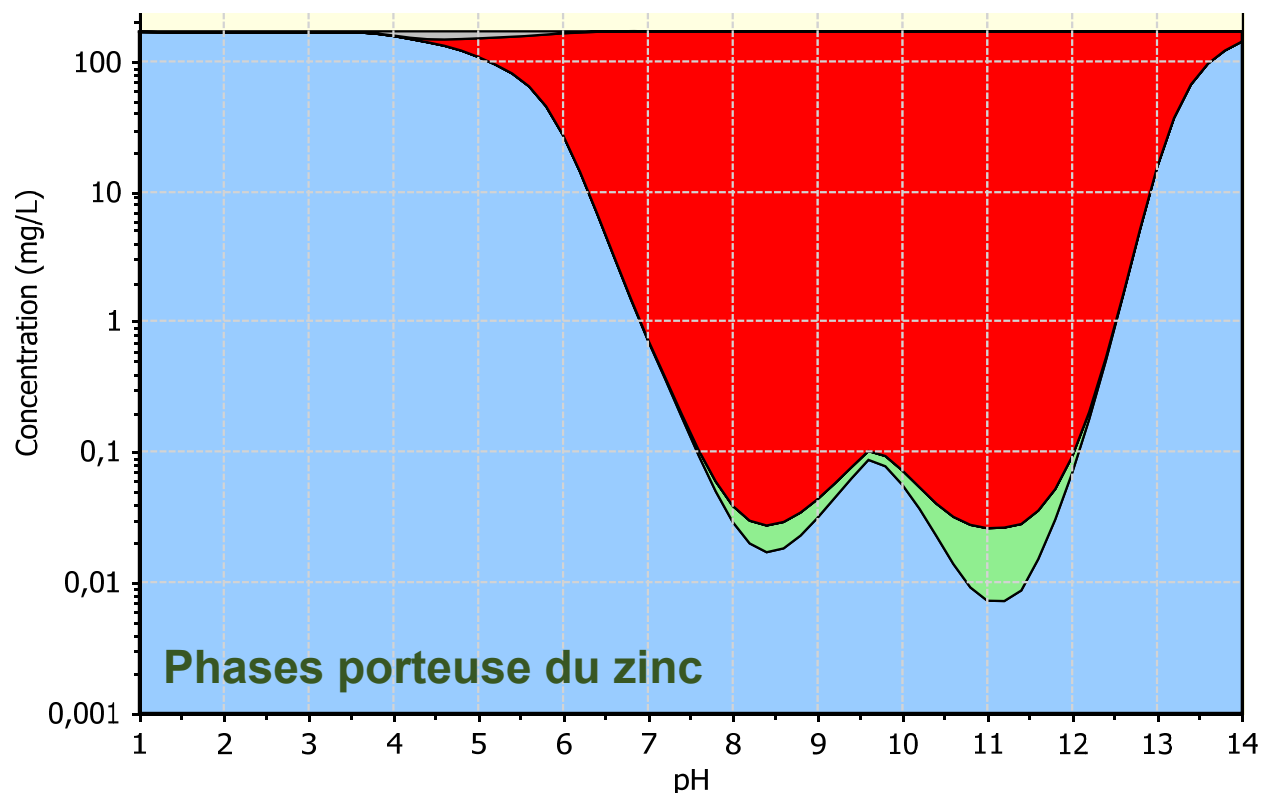
② Immobilisation du Zn dans les phases solide et liquide du RBM-Usagé (après traitement d'une eau chargée de Zn)

A pH 8.5,

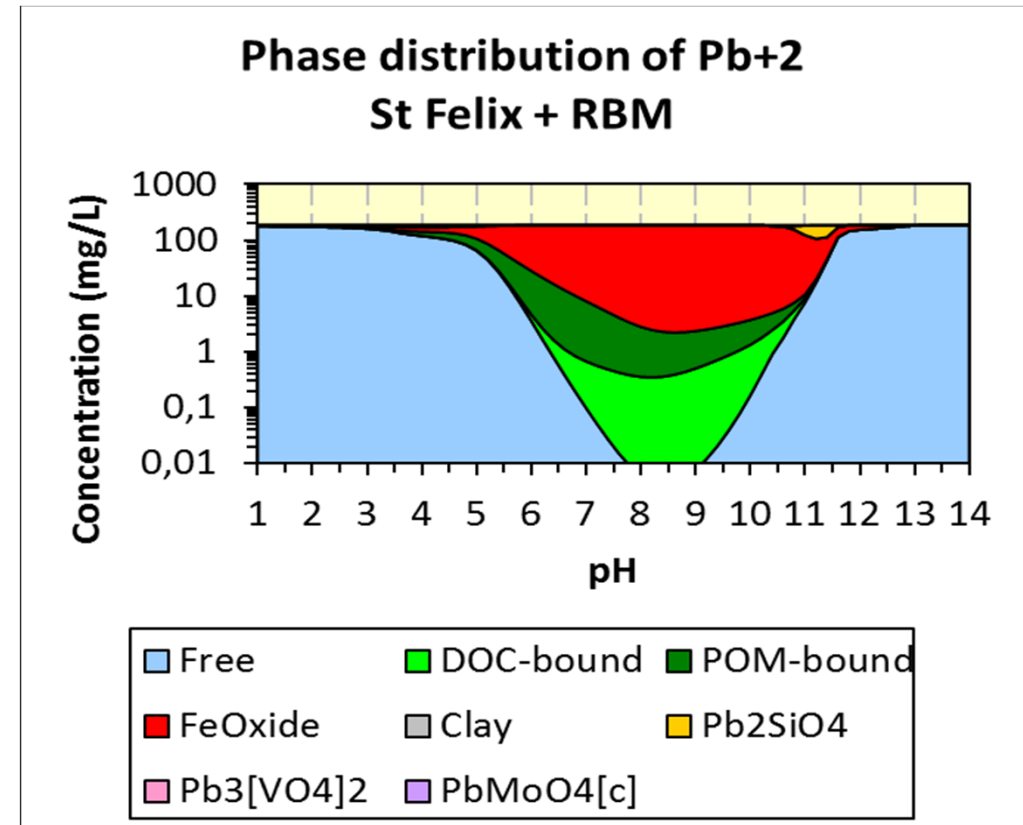
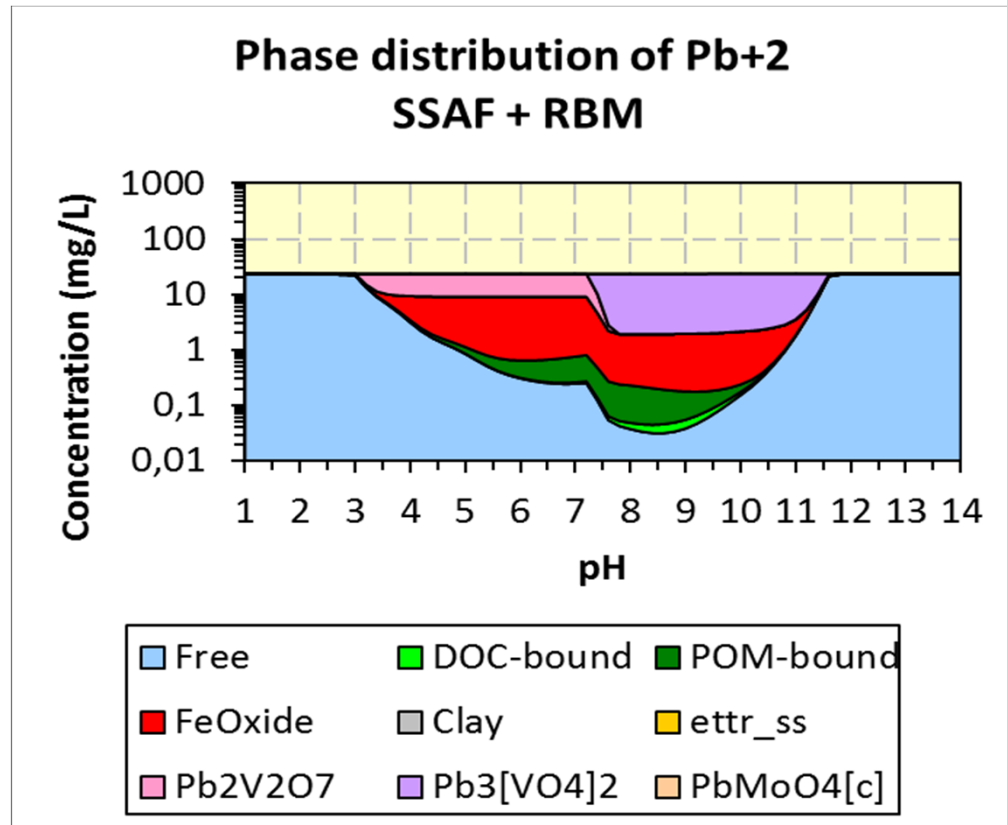
le Zn est fixé à 99.985 %
aux oxyhydroxydes de Fe et
d'Al

→ Stabilité dans le temps

**RBM-Usagé (après traitement d'une
eau chargée de Zn)**



② Immobilisation du Pb dans les phases solide et liquide du RBM (après traitement d'un sol contaminé)



Mécanismes d'immobilisation du Pb par le RBM :

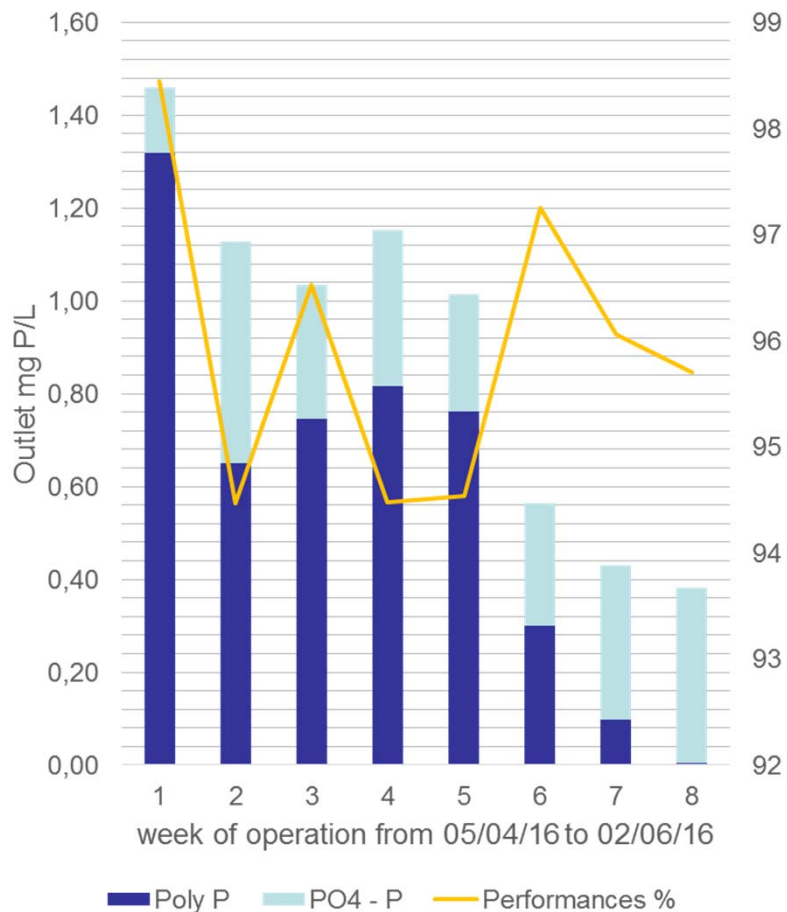
- 1/ précipitation d'hydroxydes (alcalinité)
- 2/ Sorption sur des (hydr)oxydes Fe-Al
- 3/ précipitation de vanadate de Pb lorsque les concentrations en phases porteuses « classiques » sont faibles

Teneur en V du RBM : 1033 mg/kg

Teneur en V lixiviable du RBM à pH 8.5 : 2.762 mg/kg

③ Déphosphatation d'eaux usées

Traitement du P des eaux résiduaires :
pilote 40 kg RBM, entrée 10 mg P/l



F. Chazarenc, N. Ampofo, Ecole des
Mines de Nantes, 2015

Traitements existants: adsorption sur des boues biologiques (petites stations, rdt = 50%), précipitation physico-chimiques avec FeCl_3 ou AlCl_3 (grandes stations, rdt = 95%)

Objectif : traitement simple pour petites stations, rdt 95%

Ressource non renouvelable : Ressources en P limitées (300 ans de réserve), élément essentiel pour la production agricole et des engrais, besoins mondiaux en croissance de 1.8% par an

Objectif : Valorisation du P en amendement ou en engrais

❖ Les teneurs en phosphore qui sortent des eaux usées après passage sur RBM sont $< 1\text{mg/L}$.

❖ La quantité accumulée est de **6 g P/kg RBM**, et on espère atteindre entre 10 et 20 g P/kg RBM.

BILAN DES 4 ANNÉES ET ÉTUDE EN COURS



Capacité à immobiliser les éléments chimiques

❖ Phosphore et autres éléments chimiques (métalliques et métalloïdes)

❖ Applications en traitement des résidus miniers, des déchets, des sols contaminés, des eaux résiduaires

Petit bémol pour les anions et oxyanions.

Risques à long terme

Les oxyhydroxydes de Fe et d'Al du résidu de bauxite sont une source abondante de phases fixatrices des éléments.



Bonne stabilité à long terme

Il faut que le milieu reste neutre à alcalin et drainé (stockage en milieu ouvert).

Végétalisation du résidu de bauxite

- ❖ RBM: peut être utilisé comme matériau de couverture ou comme terre végétale. Tests sur les plantes continuent.
- ❖ Moyen de réhabilitation de sites contaminés

Perspectives

- ❖ végétalisation en cours d'essai à l'échelle pilote
- ❖ Tests d'écotoxicité sur plantes sauvages
- ❖ Amélioration de la texture

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Pierre HENNEBERT

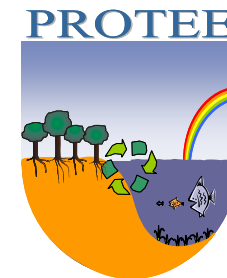
SUITE...



projet ValoRB

UNIVERSITÉ
DE TOULON

Patricia MERDY



ohm
Observatoires
Hommes-Milieu

ECOSYSTEMES CONTINENTAUX
ECCOREV
FR 3098
ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

Résidus de bauxite modifié (RBM):
Transformation en sol & immobilisation des
contaminants minéraux : **tests sur résidus
miniers de l'Escalette**



Pascale PRUDENT

Aix*Marseille
université



Raquel Bertholdo



Isabelle SCHWOB





**MERCI DE VOTRE
ATTENTION**