



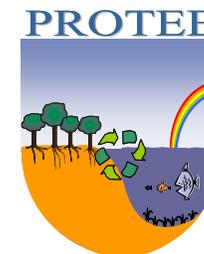
# INERIS

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |

**Pierre HENNEBERT**

10-10-2017, Bouc-Bel-Air, Restitution OHM-BMP

Mécanismes et solutions réalistes de stabilisation de déchets industriels et de sols contaminés en milieu méditerranéen par l'utilisation de résidus de bauxite (boues rouges)



**Patricia MERDY**

**Yves LUCAS**



**Pascale PRUDENT**

**Laurent VASSALO**



**Raquel BERTHOLDO**



**Isabelle LAFFONT-SCHWOB**

---

# ÉTAT 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

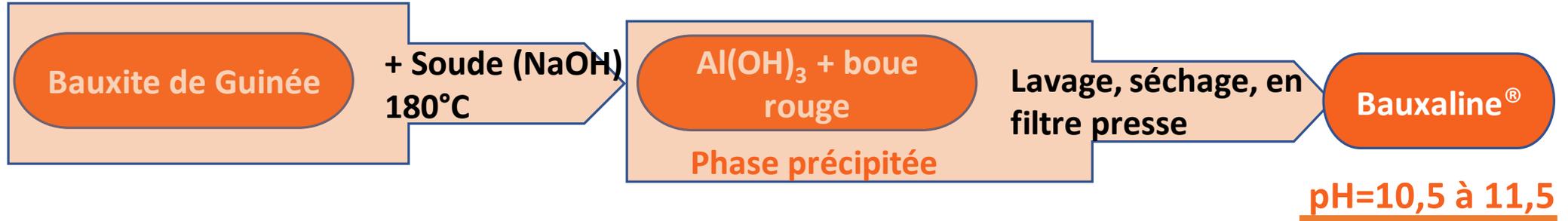
## L'industrie de l'alumine et de l'aluminium produit :

- 1.5 tonnes de résidu de bauxite/tonne d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- Accumulation annuelle mondiale : 80 Millions tonnes
- Stock accumulé : 3 Milliards tonnes

**RECYCLAGE –REUTILISATION A DES FINS UTILES**

# TRANSFORMATION DE LA BAUXALINE® EN RBM

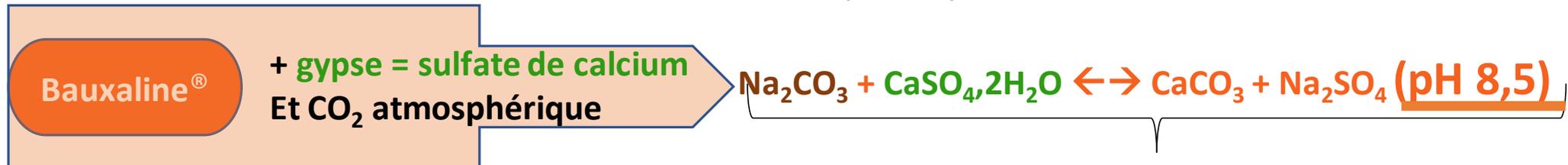
## PRODUCTION DE LA BAUXALINE



Matériau non structuré, peu perméable

NaOH, NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

## PRODUCTION « résidu de bauxite modifié » (RBM)



RBM:

Matériau structuré, à structure stable, et perméable

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

# BUT DE L'ETUDE: UTILISATION DU RBM



## Possibilité de traitement de sols contaminés et scories?

### Partie Sciences de l'Environnement

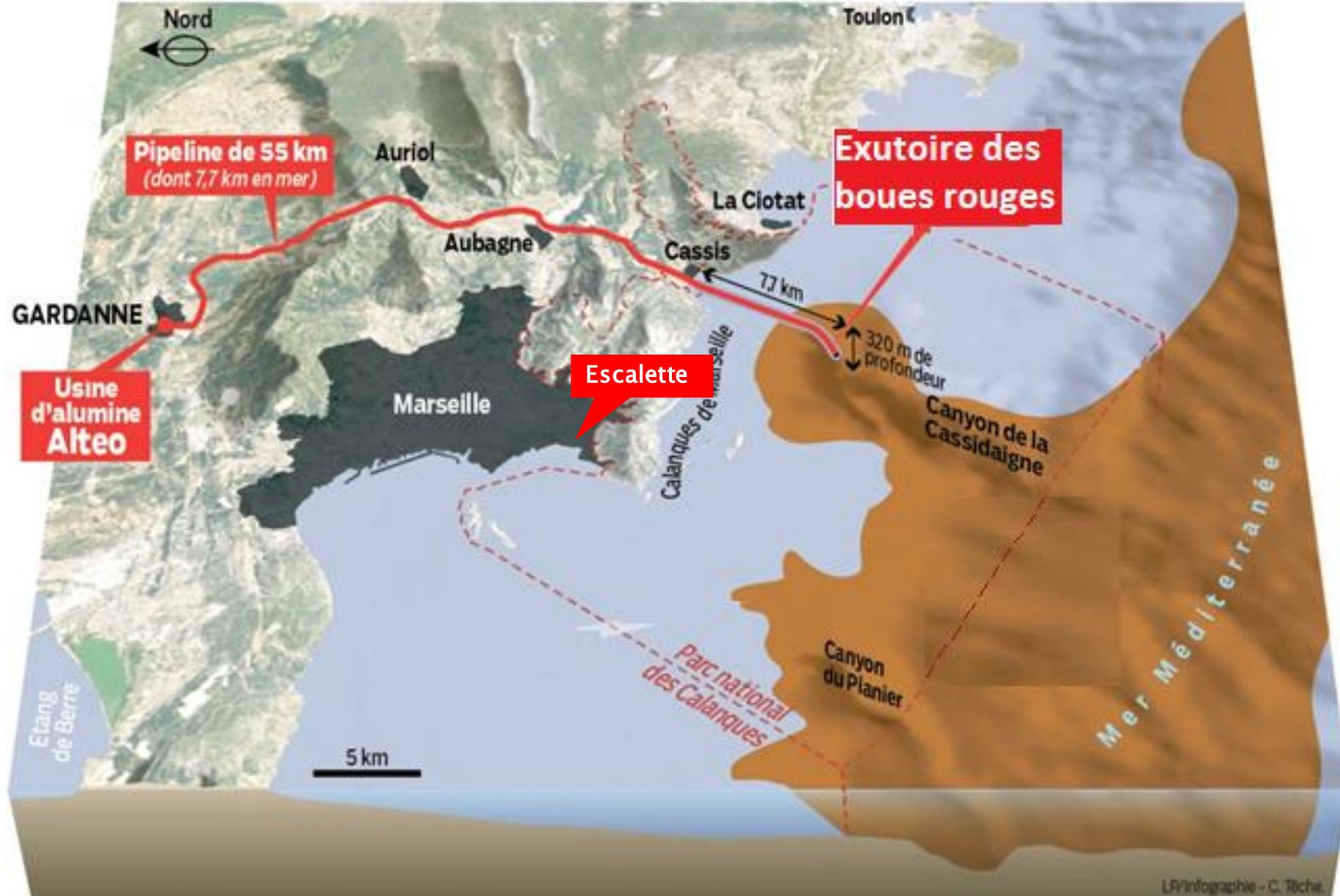
### Partie SHS

- ① **A quelle dose** le RBM est-il efficace pour immobiliser les éléments métalliques et métalloïdes présents dans les sols contaminés et les scories?
- ② Les mélanges **RBM+sol** et **RBM+scories** offrent-ils des milieux **acceptables pour les plantes**?  
Est-il possible pour **des plantes sauvages méditerranéennes** de se développer sur ce milieu?
- ③ Obtenons-nous des systèmes fiables à **long terme**?
- ④ Possibilité de **réhabiliter** à grande échelle des sites contaminés par de la re-végétalisation après traitement?

### Risques?

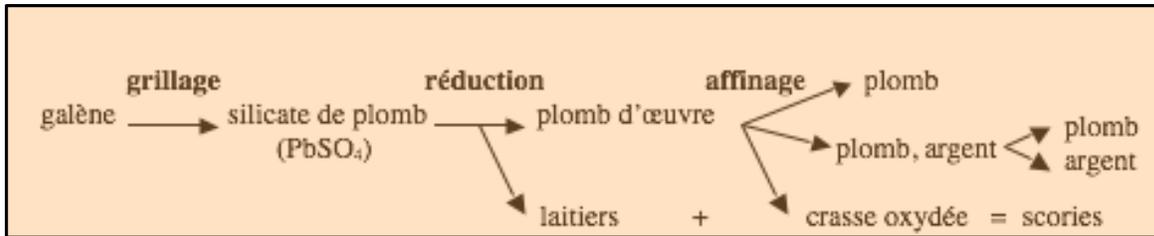
- ① Risques perçus par la population quant au projet de réutilisation du RBM?
- ② Quid des professionnels de l'environnement?
- ③ Variables susceptibles d'amplifier ou de modérer les perceptions des risques?
- ④ Quelle confiance est accordée aux institutions?

# Pourquoi la nécessité de recycler et quels sont les risques?



# OPPORTUNITE OFFERTE PAR LES SCORIES ET SOLS POLLUES DE L'ESCALETTE?

Activité passée de transformation de la galène à l'Escalette à partir de minerai d'Espagne et d'Italie



Sol contaminé de l'Escalette riche en Pb, As, Zn, Sb



Crassier : dépôt de scories à l'Escalette  
Fortes concentrations en Pb, Zn, Cu, Sb...



Scories broyées

Sols et scories contaminés : modèles locaux d'étude de substrats pollués  
Mais pas d'application de RBM possible in situ (charte PNCaI)

---

# RESTITUTION DE LA PARTIE SHS

- RAQUEL BERTOLDO -

- ① LE QUESTIONNAIRE
- ② LES RÉSULTATS OBTENUS
- ③ INTERPRÉTATION



**Raquel BERTHOLDO**



## Contexte polémique sur l'enjeu à Marseille

*Pour qui ??*

**1. A quel point la population locale est au courant de l'enjeu ?**

**2. Craintes spécifiques sur ce projet :**

- Sa propre santé, celle des vos proches
- L'environnement de la région
- Perception des risques vs. Bénéfices

**3. Variables modératrices :**

- **Attachement au lieu \***
- **Identité environnementale**
- **Confiance** aux scientifiques, institutions privées et médias

# Méthode (1/2)

- Questionnaire diffusé auprès
  - des **professionnels** de la dépollution des sites ( $N = 17$ )
  - de la **population** marseillaise en général ( $N = 191$ )
- Diffusion en version en ligne (professionnels) et papier entre les mois de novembre et décembre 2016
- Échelles à 5 points (ex.: tout à fait < --- > pas du tout)

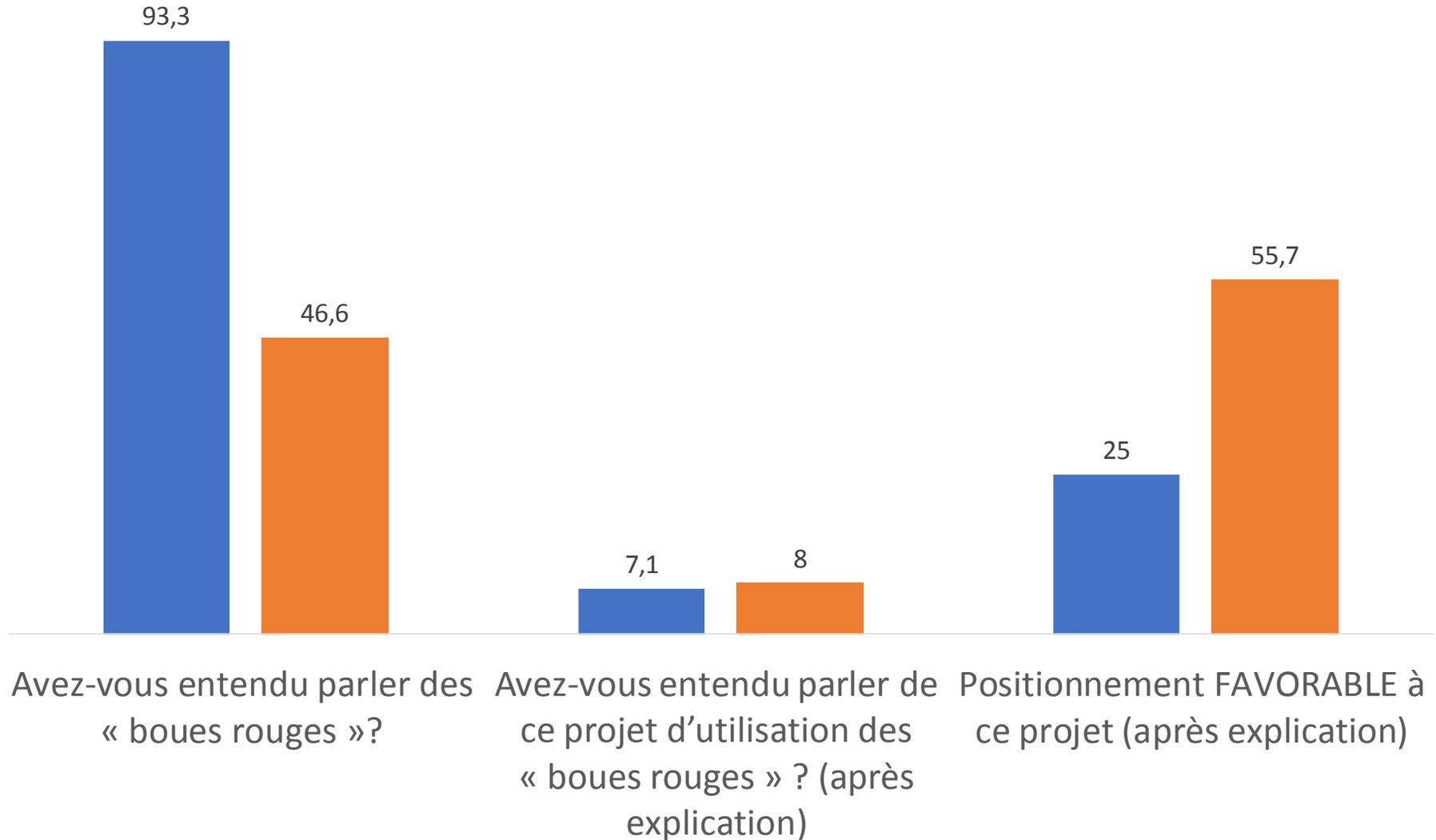
# Méthode (2/2)

## Variables

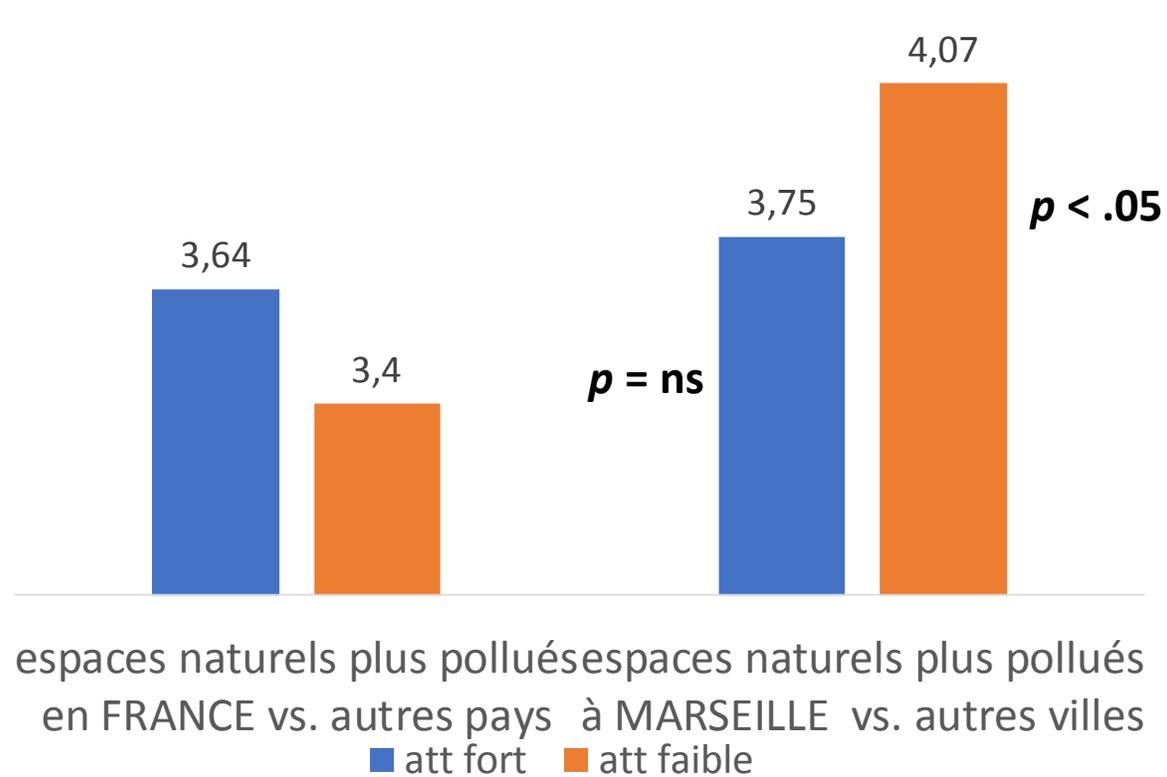
1. **Connaissance** de l'enjeu des boues rouges (oui/non)
2. Identité écologique, 2 items ( $r = .72$ )
3. Attachement au lieu 8 items ( $\alpha = .84$ )
4. Perception des **risques** associés au projet
  - sur sa santé, celle de la ville, sur l'environnement (3 items)
  - Par rapport aux bénéfiques (1 item bipolaire)
5. Confiance
  - à la science, scientifiques et à l'information produite par les scientifiques ( $\alpha = .80$ )
  - aux médias, aux institutions et aux organismes privées impliquées dans ce projet ( $\alpha = .70$ )

# Connaissances sur l'enjeu des boues rouges et sur le projet

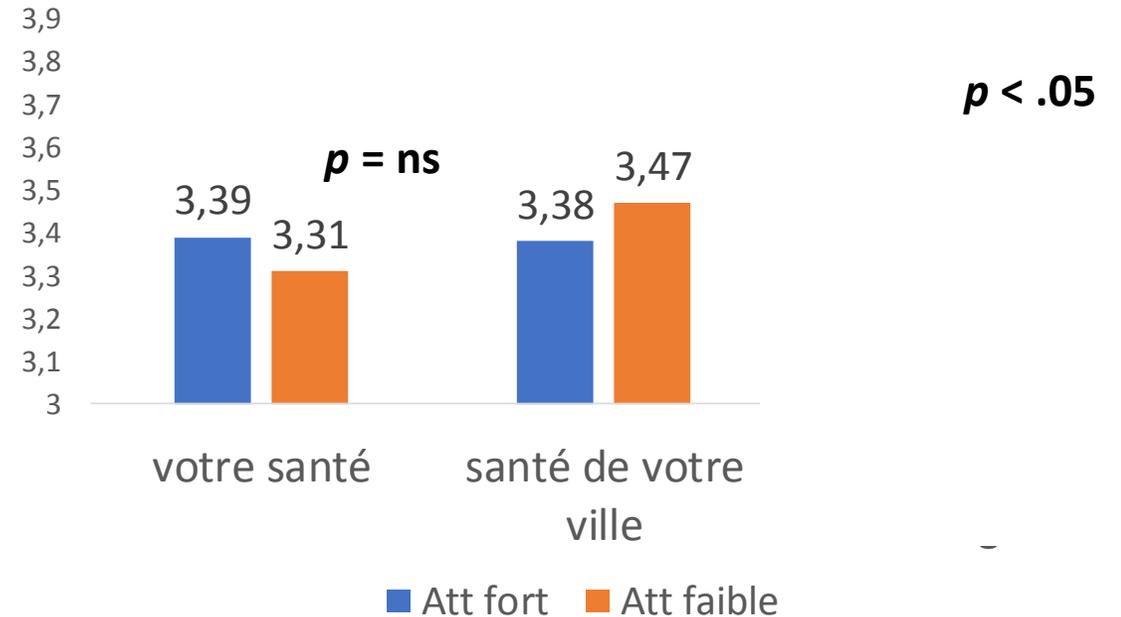
■ professionnels ■ marseillais



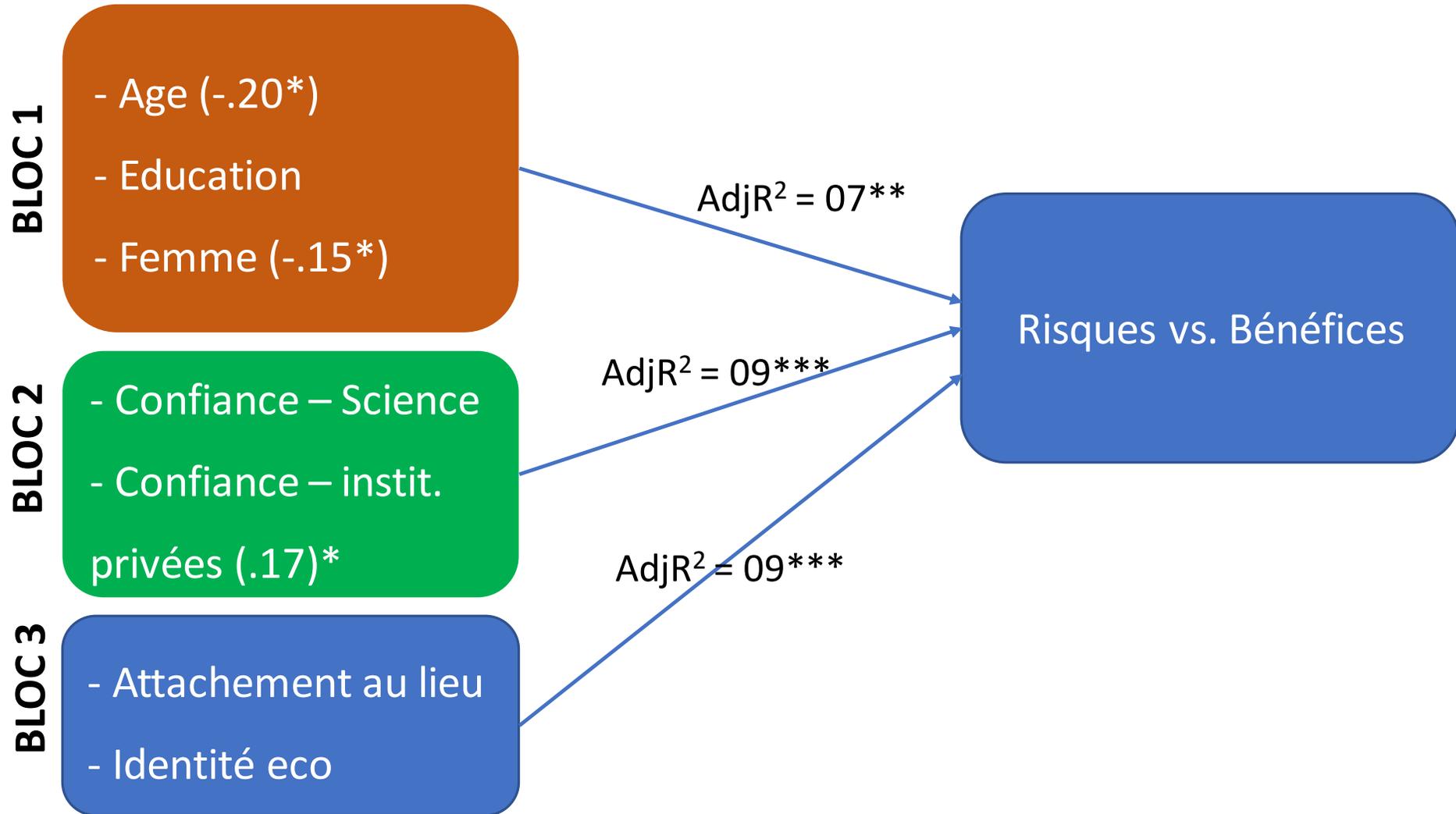
# Attachement au lieu



A quel point pensez-vous que ce projet de valorisation représente un **risque** pour :



# Perception des risques vs. bénéfiques



Modèle d'analyse de régression par bloc

# RESTITUTION DE LA PARTIE SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

---

❶ | IMMOBILISATION DES ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES  
DANS LES MÉLANGES RBM-SOL ET RBM-SCORIES

❷ | ECOTOXICITÉ DES SUBSTRATS POLLUÉS +/-  
STABILISÉS PAR LE RBM ET CAPACITÉS DE  
CROISSANCE D'ESPÈCES VÉGÉTALES SUR CES  
SUBSTRATS

❸ | SPÉCIATION CHIMIQUE DES ÉLÉMENTS  
MÉTALLIQUES

---

# ① | IMMOBILISATION DES ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES DANS LES MÉLANGES RBM- SOL ET RBM-SCORIES



# MATÉRIELS ET MÉTHODES : SOLS ET RÉSIDUS MINIERES



Neuf sols contaminés ou résidus miniers, sans végétation, ont été utilisés:

**Sous-sol urbain** excavé (Cr VI, Sb) (*Marseille, Geze*)

**sol** fortement pollués d'une ancienne installation de traitement du bois (Cu, Zn, Cd) (*Bordeaux, PME*)

**scories** avec concentrations élevées en As et Pb (Pb, Zn, As, Cu, Mo, Co, Cd) (*Marseille, Escalette*)

**résidus miniers** (Zn, Pb, Mo, Cd) (*Sardaigne (I), Campo Pisano*)

**résidus de minerais** pyritiques (Pb, Zn) (*Alès, SSAF*)

**Marais en aval de la zone de résidus miniers** (Zn, Pb, Mo, Cd) (*Sardaigne (I), Sa Masa*)

**résidus miniers** (Zn, Pb, As, Cd, Mo, Cd, Co) (*Montpellier, Saint Laurent le Minier*)

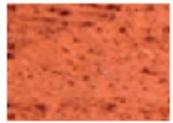
**site minier** de plomb et de zinc (Zn, Pb, As) (*Alès, St Félix*)

**résidu de traitement de minerais sulfuré** (Cu, Pb) (*RM3-1*)

**Sol témoin** (sol argilo-calcaire sur calcaire = rendzine, Aix-en-Provence).

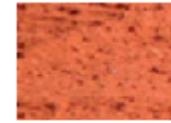
**As:** 4 – 1300, **Cd:** 1 – 250; **Cu:** 1 – 10 000; **Pb** 10 – 20000; **Zn** 10 – 4000 mg/kg.

# MATÉRIELS ET MÉTHODES: TRAITEMENT DES ÉCHANTILLONS ET LIXIVIATION



RBM

Riche en **fer** et en **aluminium** (hydr) oxyde, en argile et en **alcalinité**, le «résidu de bauxite modifié» (RBM) immobilise les éléments (Hennebert et al., 2016).

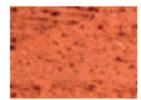


RBM  
0,1 à 30%

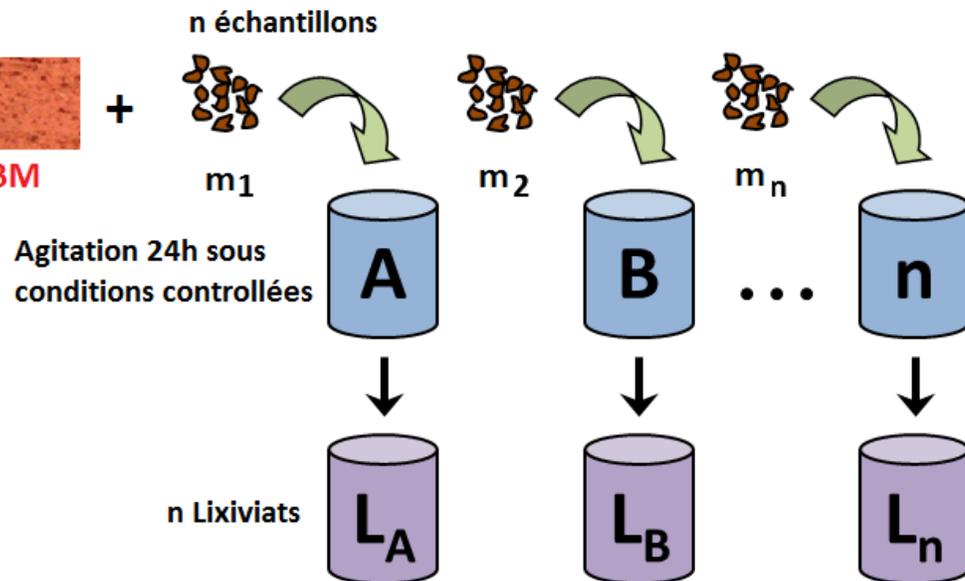


$m_1$

Les éléments phytotoxiques sont immobilisés par addition de **0,1% à 30% de MBR**, selon le matériau.



RBM



L'immobilisation est mesurée par un simple **test de lixiviation** des déchets (EN 12457-2):

**Granulo 4 mm**, 10 L d'eau mQ/ kg de matière sèche (90 g de MS)

**Agitation** par retournement 24 h

15 min décantation, **filtration** 0,45  $\mu\text{m}$

Acidification et **analyse des éléments** par ICP

**Analyses Chimiques**

# MATÉRIELS ET MÉTHODES : CULTURE DES PLANTES EN POT, EN LYSIMÈTRE OU EN PARCELLE



- ① *Dactylis glomerata* a été cultivé en plein air dans des pots de 400 g de pot de sol / résidus miniers (séché à 40 ° C , concassé à 2 mm), modifié avec 0, 10% ou 30% RBM, avec engrais NPK à dose agronomique, avec irrigation quotidienne et lixiviation libre, pendant 4 mois.

La croissance était très pauvre à médiocre, et après 2 mois, du compost (1%) a été ajouté et *D. glomerata* a redémarré.



## ① Essais en pots

échantillon+  
RBM 0,1 à 30%  
+ engrais NPK  
+ compost

- ② *Dactylis glomerata* a été cultivé en lysimètres en plein air de 50 l avec les résidus miniers de St Félix et MR3-1, depuis 2014 et 2015, avec 1% de compost pour MR3-1, avec engrais NPK à dose agronomique, irrigation régulière et lixiviation libre.

La croissance avec addition de RBM a été florissante.



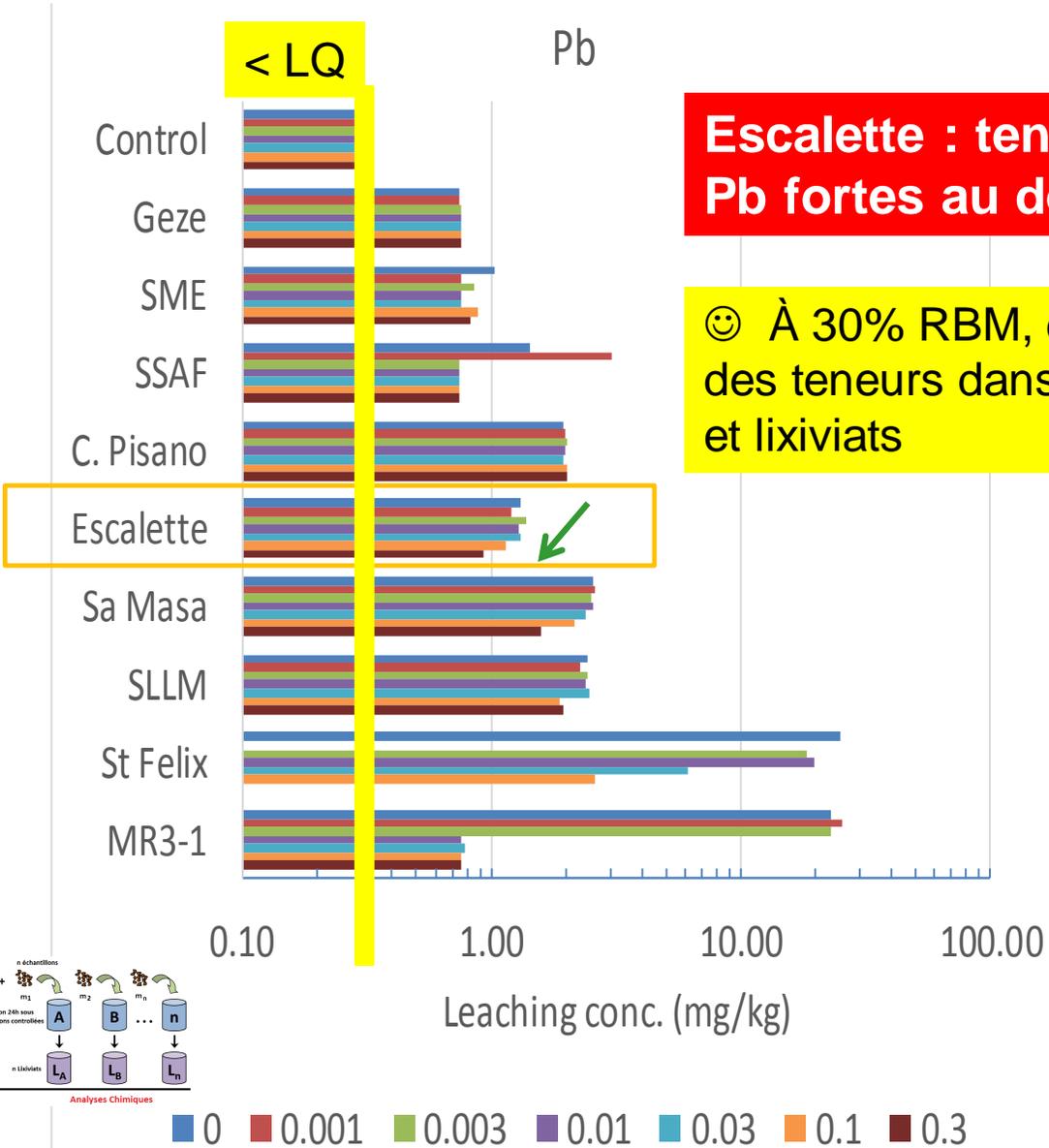
- ③ Un terrain d'essai de 30 m<sup>2</sup> a été installé à St Félix en 2014.

# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : Pb

< LQ Pb

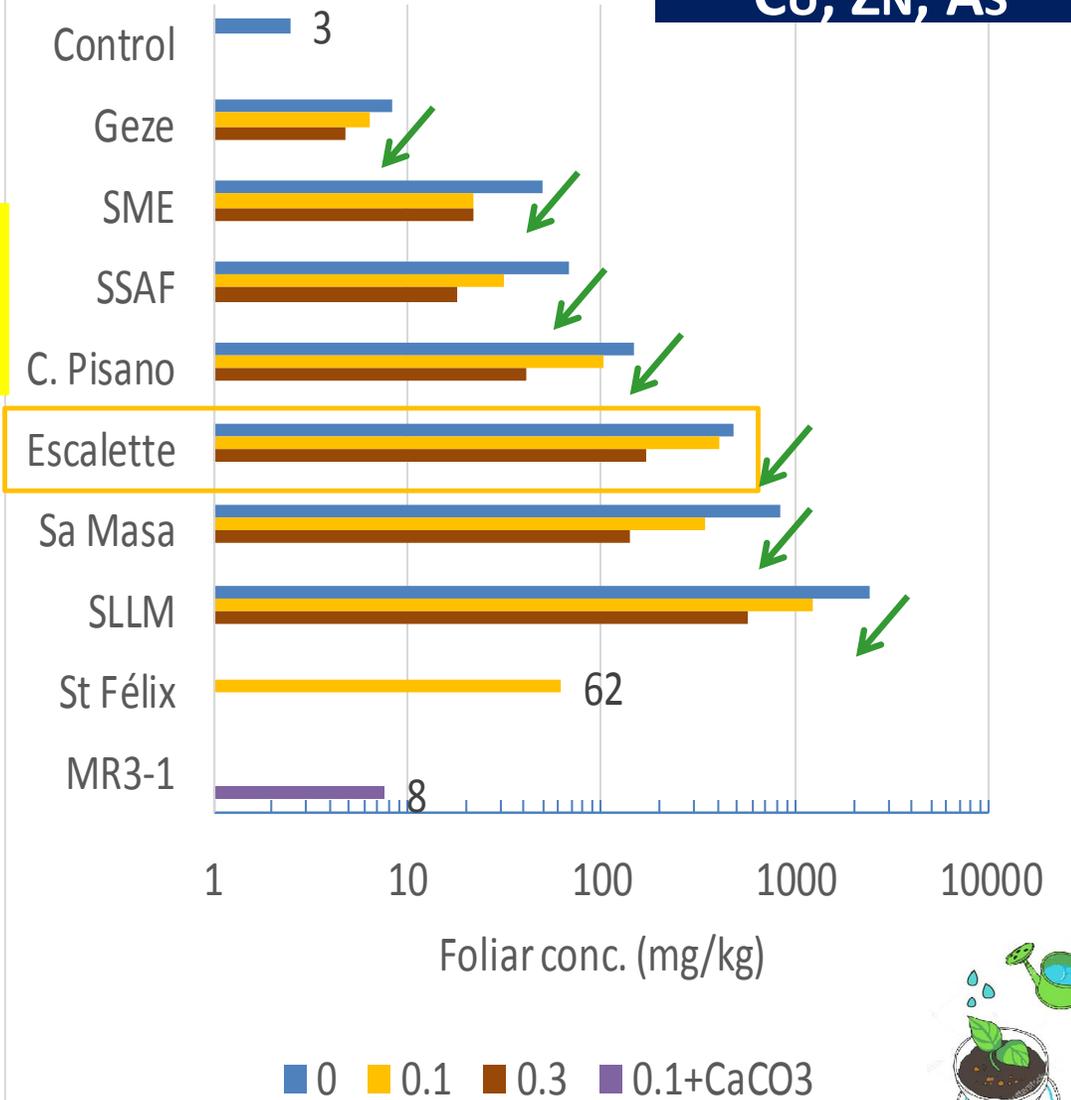
**Escalette : teneurs en Pb fortes au départ**

😊 À 30% RBM, diminution des teneurs dans les feuilles et lixiviats

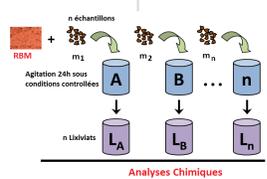
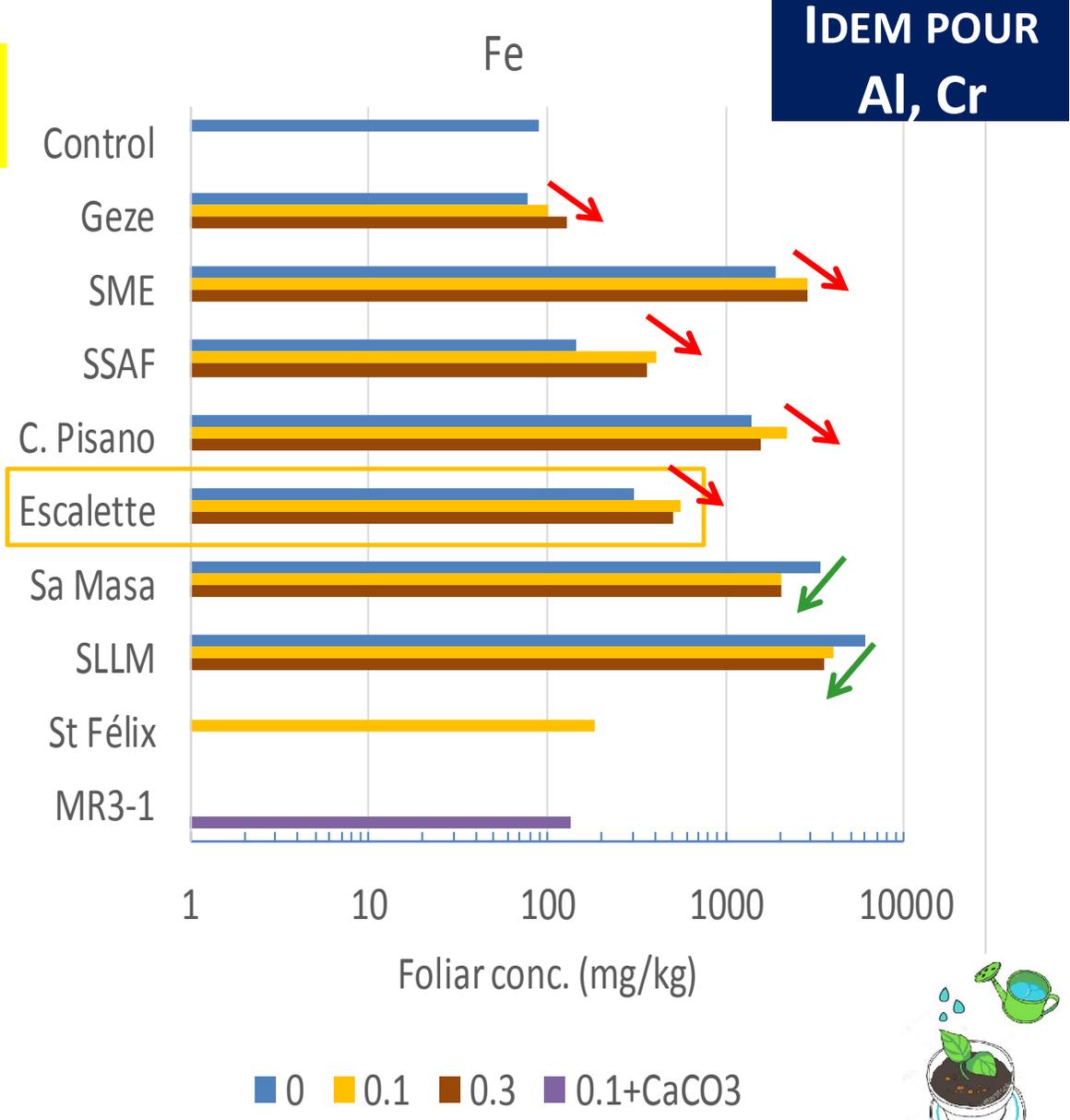
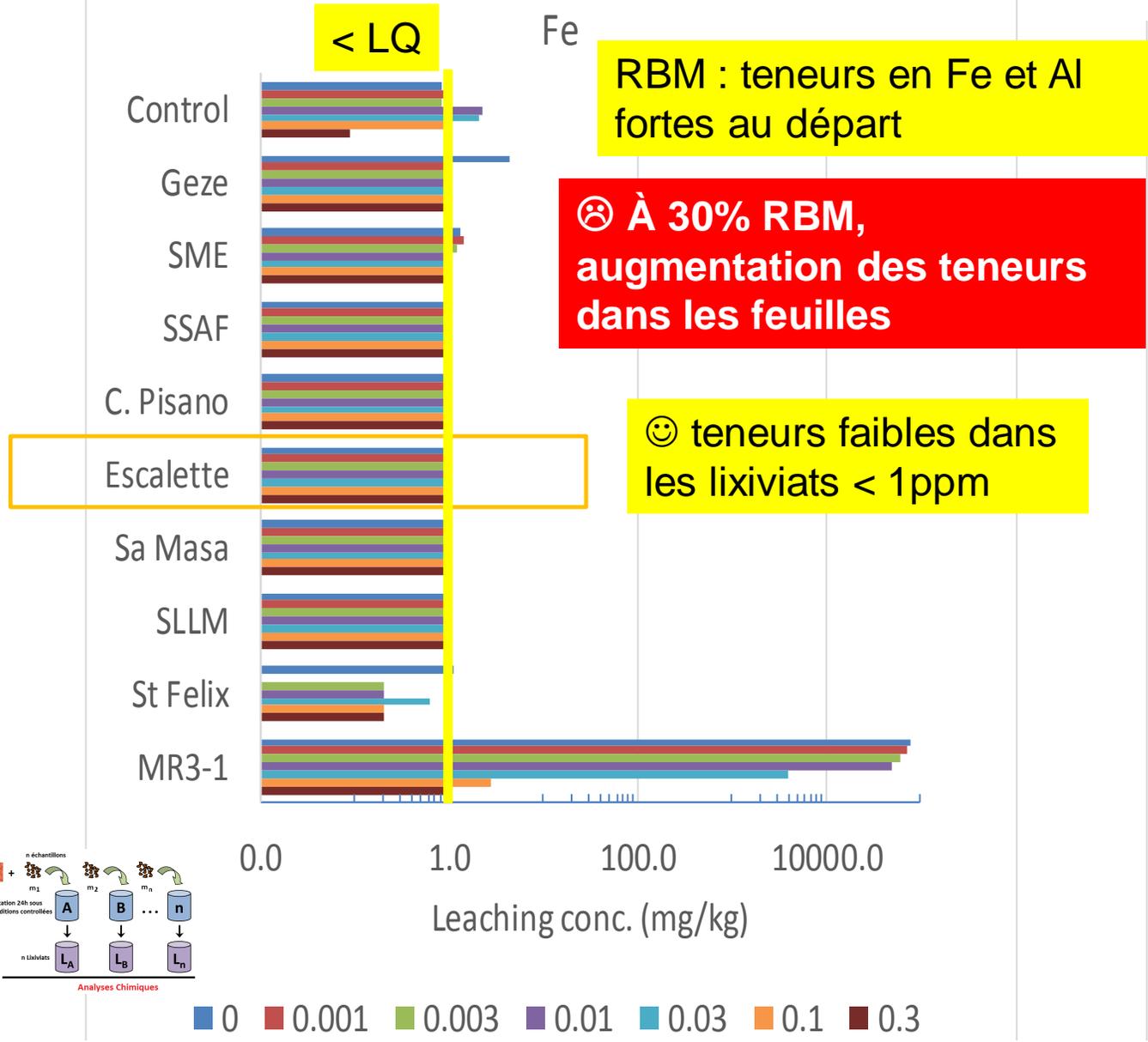


**IDEM POUR MN, CU, ZN, AS**

Pb

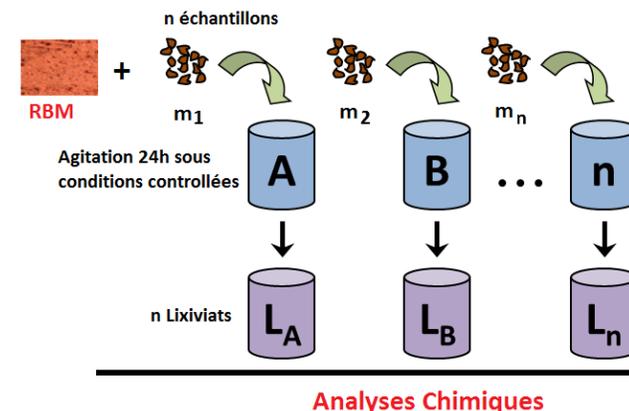


# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : Fe



# CONCLUSIONS

L'addition de résidu de bauxite modifié (RBM) réduit la concentration lixiviable de tous les éléments, jusqu'à la concentration du sol témoin, ou jusqu'à la limite de quantification.



Dans les pots, mort ou faible croissance pour les pots sans RBM, croissance modérée pour 0,3 % de RBM. Les concentrations foliaires sont réduites avec l'ajout de RBM.



**Attention: les teneurs foliaires augmentent ou restent stables pour Cr, Fe, Al.**

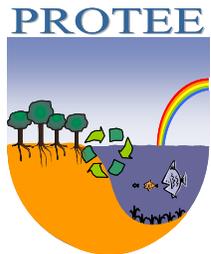
Dans les lysimètres et les parcelles, la croissance est bonne et les concentrations foliaires sont réduites jusqu'à la celles du témoin pour tous les éléments, **sauf pour le plomb, chrome, Fe,**



| Teneur feuilles (ppm) | Pb   | Cr  | Fe  |
|-----------------------|------|-----|-----|
| Témoin                | 3    | 0,8 | 100 |
| Escalette             | >100 | 8   | 600 |

## ② ECOTOXICITÉ DES SUBSTRATS POLLUES +/- STABILISÉS PAR LE RBM ET CAPACITÉS DE CROISSANCE D'ESPÈCES VÉGÉTALES SUR CES SUBSTRATS

### 2-A-Partie ECOTOXICITE par les tests de rotifères



**Patricia MERDY**

### 2-B- Capacités de croissance des plantes



**Pascale PRUDENT**

**Laurent VASSALO**



**Isabelle LAFFONT-SCHWOB**

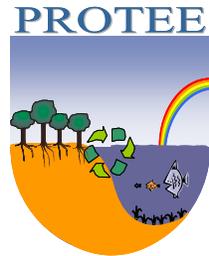
### 2-C-Essai pilote sur un terrain de 1000m<sup>2</sup>,

**INERIS**

*maîtriser le risque |  
pour un développement durable*

**Pierre HENNEBERT**

# 2-A-Partie ECOTOXICITE par les tests de rotifères



Patricia MERDY

# 2-A-Partie ECOTOXICITE par les tests de rotifères

## Protocole opératoire

**Total: 16 batch**



Humectation  
3 semaines

30g échantillon sec (RBM de 0 à 30% + sol contaminé ou scories)  
+ 300mL eau (L/S=10)



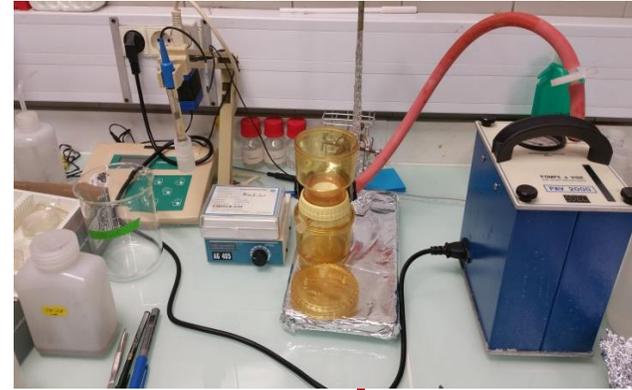
**RBM**

**Scories**

**Sol Escalette**



Agitation par retournement  
(60trs/min) pendant 24h



Filtration à  
0,45µm



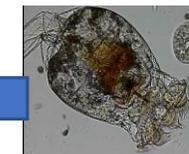
16  
Filtrats

**3 flacons par échantillon:**

- tube de quartz (mesures de C),
- flacon HDPE 40mL (mesures des M),
- flacon HDPE 350mL (tests écotox + mesures des ions)



Comptage après  
24h de contact

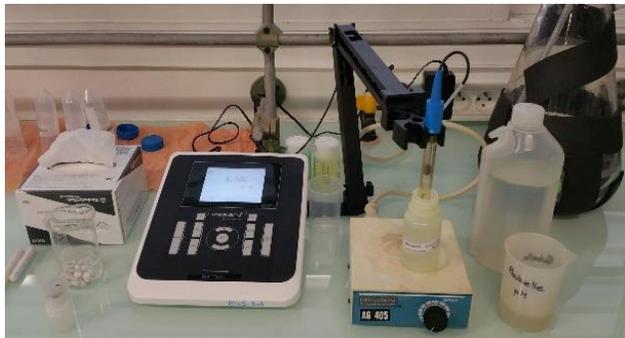
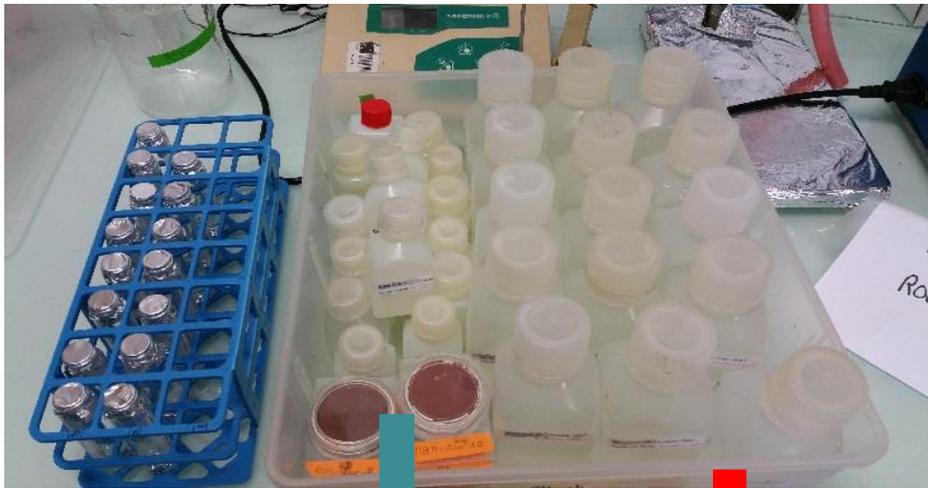


Test éco-  
toxicologique

# Analyses

| Effet dose    |       | sol + 0% RBM | sol + 0.1 % RBM | sol + 0.3 % RBM | sol + 1 % RBM | sol + 3 % RBM | sol + 10 % RBM | sol + 30 % RBM |
|---------------|-------|--------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| Taux RBM      | kg/kg | 0            | 0,001           | 0,003           | 0,01          | 0,03          | 0,1            | 0,3            |
| Masse sol sec | kg    | 0,030        | 0,030           | 0,030           | 0,030         | 0,029         | 0,027          | 0,021          |

| Effet dose           |       | Scories + 0% RBM | Scories + 0.1 % RBM | Scories + 0.3 % RBM | Scories + 1 % RBM | Scories + 3 % RBM | Scories + 10 % RBM | Scories + 30 % RBM |
|----------------------|-------|------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Taux RBM             | kg/kg | 0                | 0,001               | 0,003               | 0,01              | 0,03              | 0,1                | 0,3                |
| Masse scories sèches | kg    | 0,030            | 0,030               | 0,030               | 0,030             | 0,029             | 0,027              | 0,021              |



pH, Eh



↓  
TOC-mètre:  
COT, CI

↓  
ICP/AES:  
métaux/métalloïdes

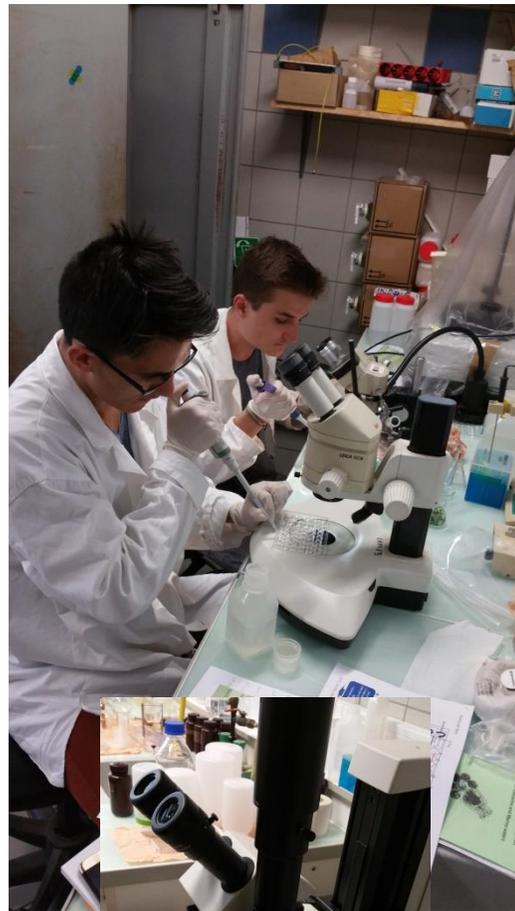
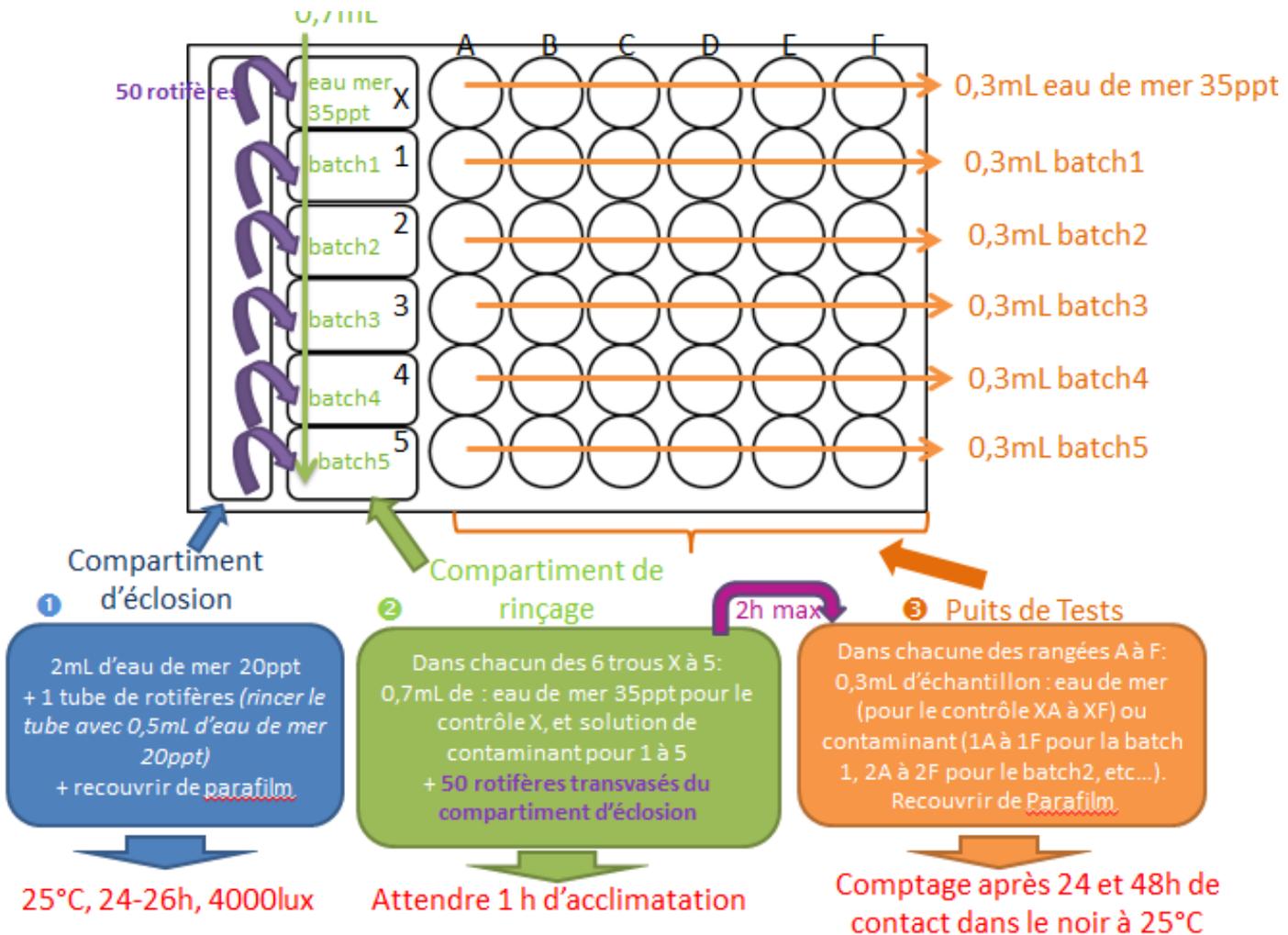
↓  
Tests écotox+ions

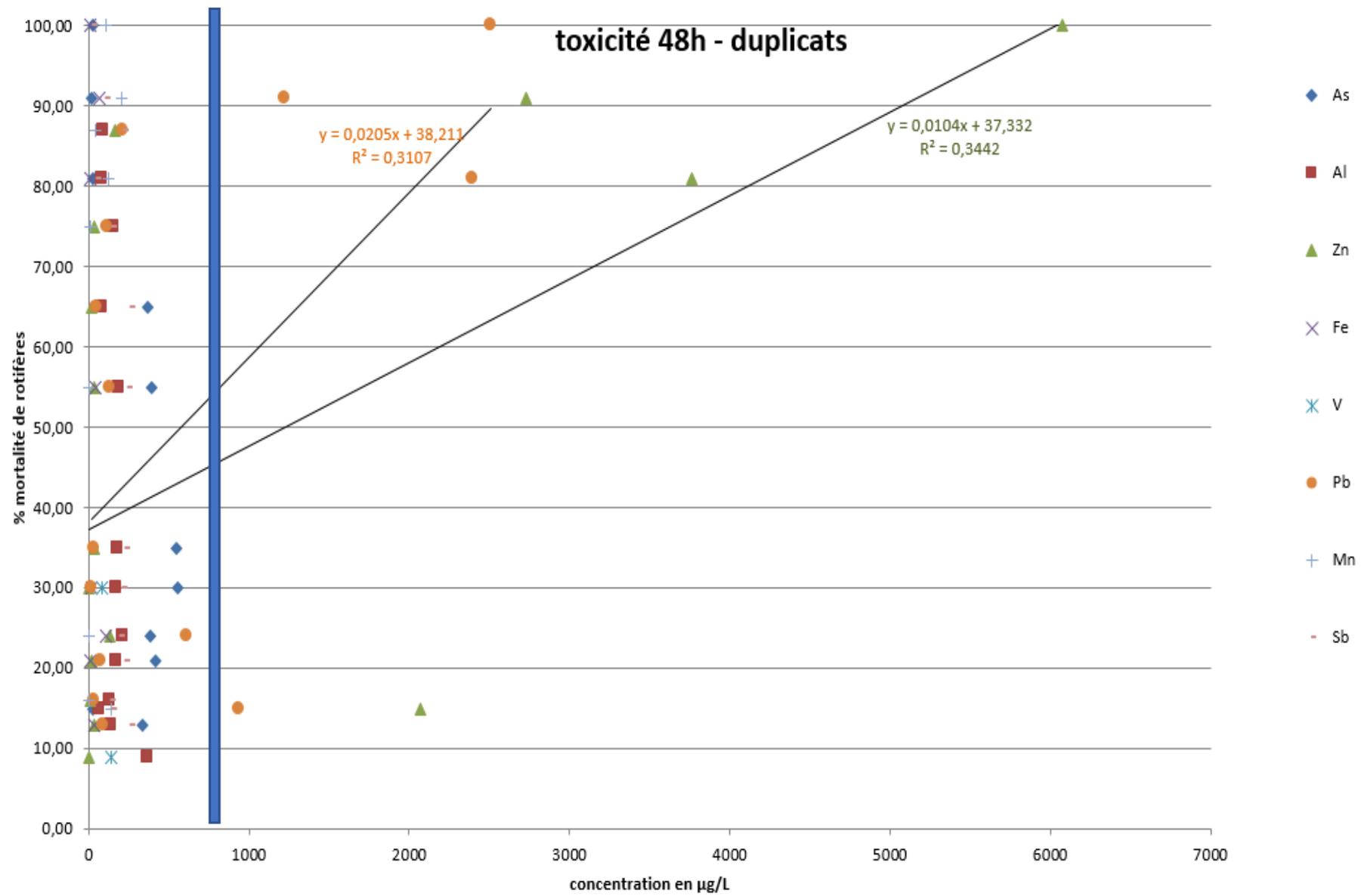
↓  
Sur le solide: analyses au CHNS:  
COT, Soufre, Azote

# TESTS ECOTOX sur ROTIFERES MARINS



*Brachionus plicatilis*

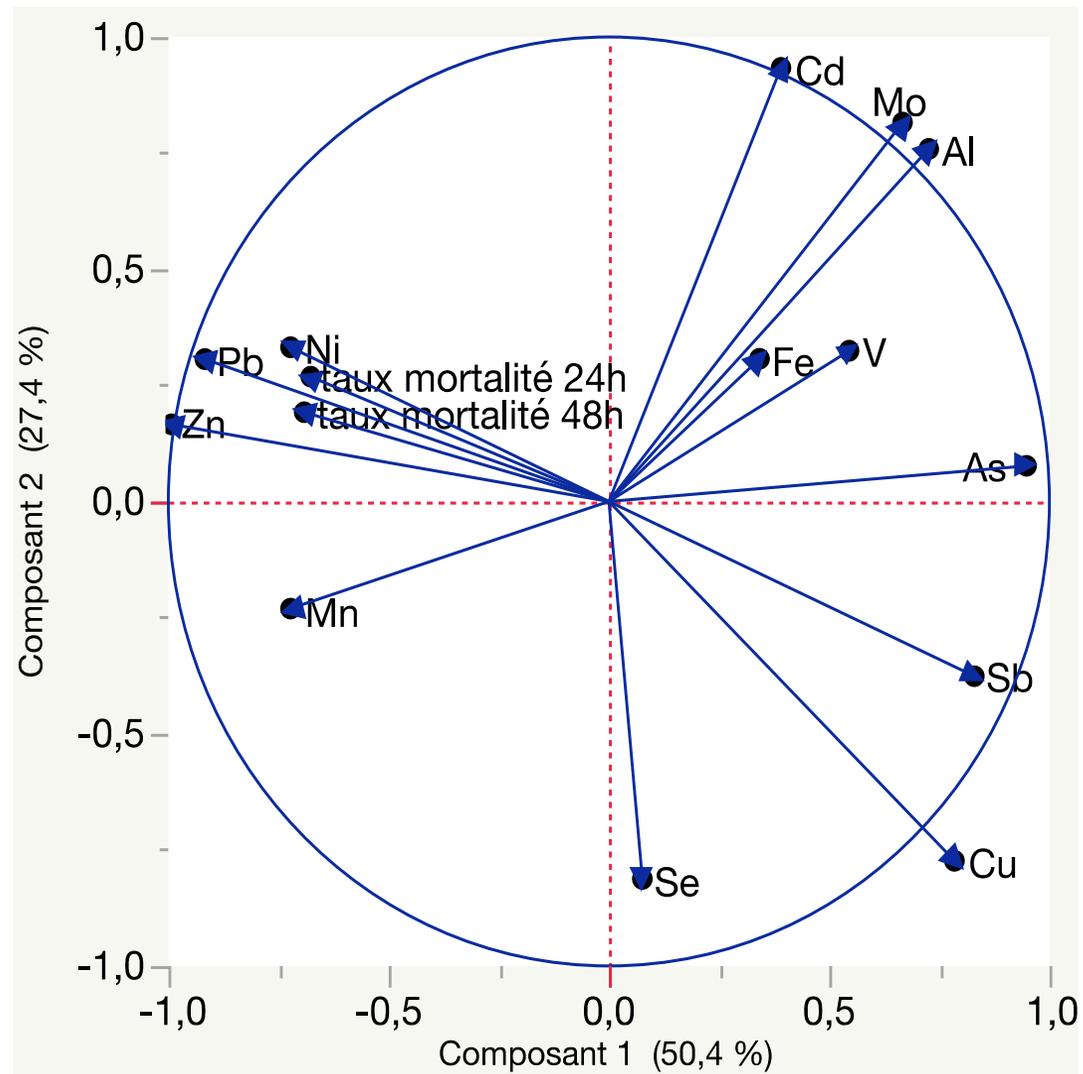




✓ Zn et Pb responsables à priori des taux de mortalité les plus élevées

✓ Valeur seuil < 1000 µg/L?

## Traitement statistique des données: Isabelle Schwob



**Zn, Pb et Ni semblent être statistiquement corrélés aux taux de mortalité contrairement au Sb et As.**

## 2-B-Partie CAPACITE de CROISSANCE des Plantes



**Pascale PRUDENT**

**Laurent VASSALO**



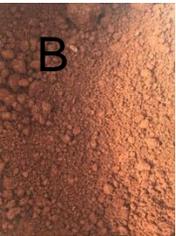
**Isabelle LAFFONT-SCHWOB**

## 2-B- CAPACITÉS DE CROISSANCE D'ESPÈCES VÉGÉTALES SUR DES SUBSTRATS POLLUÉS +/- STABILISÉS par RBM

### Protocole : Essais en pots sous serre (5 réplicats par condition expérimentale)



- Pots de 2L
- Conditions (% en poids sec):
- Référence : sol Ardevie (**A**) + 1% compost (1100 g + 16 g)
  - **99% RBM (B)** + 1% compost (1519 g + 10 g)
  - **70% Scories Escalette broyées (C) + 30%RBM + 1% compost** (868 g RBM + 800 g scories + 19 g cpst)
  - **99% Scories Escalette broyées + 1% compost (3 réplicats)**
- Espèce végétale sélectionnée : *Dactylis glomerata* (cultivar vs semences sauvages), même quantité de graines par pot.



Cultures sous serre suivies pendant 26 jours

Ajout d'eau tous les 2 jours pour maintenir au niveau de capacité de rétention en eau chaque type de substrat



## Analyses et objectifs

### Suivi biométrique :

- Pourcentage de germination
- Hauteur
- Biomasse (masse fraîche et sèche)



### Partie aérienne :

- Concentration en métaux
- Suivi biométrique

### Substrat :

- pH, COT, NTK
- MM pseudo totaux
- MM échangeable
- MM Mobilisable

MM : métaux et métalloïdes

### **Objectifs visés :**

- Identifier une potentielle réduction de phytotoxicité des scories par l'ajout de RBM
- Définir la potentialité d'ajout de RBM pour le traitement de déchets industriels



Merci à Claire  
Mattalia, stagiaire  
L2, AMU

# Caractéristiques des substrats des tests de croissance

|                          | pH  | NTK<br>mgN/g (MS) | COT<br>% |
|--------------------------|-----|-------------------|----------|
| 99% Terre                | 7,9 | 4,5               | 6,77%    |
| 99% RBM                  | 9,6 | 0,26              | 0,32%    |
| 70% Scories +<br>30% RBM | 8,2 | 0,25              | 0,42%    |
| 99% Scories              | 6,7 | 0,20              | < 0,1%   |

Qualités agronomiques faibles sauf pour terre de référence

**Métaux et métalloïdes mobilisables à T0 (EDTA 0,05M, pH7)** (moyenne n=3 en mg/kg de MS, et % vs pseudo-total)

**Mélange RBM+Scories**



Diminution des quantités et fractions mobilisables (sauf pour Al) par rapport aux scories seules

**RBM+Scories :**

Fraction importante de Pb mobilisable

| mg/kg de MS<br>et % de la fraction totale | 99% Terre     | 70%-30%<br>Scories RBM | 99% RBM        | 99% Scories    |
|---|---------------|------------------------|----------------|----------------|
| <b>Al</b>                                 | 12<br>0,06%   | 338<br>0,7%            | 234<br>0,4%    | 25<br>0,13%    |
| <b>As</b>                                 | <0,2          | 11,5<br>4,2%           | <0,2           | 86<br>12,4%    |
| <b>Cd</b>                                 | 0,11<br>4,1%  | 0,1<br>0,25%           | 0,02<br>0,05%  | 0,4<br>0,8%    |
| <b>Cr</b>                                 | 0,11<br>0,46% | 0,71<br>0,07%          | 0,88<br>0,06%  | 3,31<br>1,3%   |
| <b>Cu</b>                                 | 1,7<br>100%   | 66<br>4,6%             | 0,7<br>6,4%    | 200<br>7,7%    |
| <b>Fe</b>                                 | 42<br>0,3%    | 206<br>0,07%           | 14,5<br>0,005% | 1495<br>0,6%   |
| <b>Mn</b>                                 | 22<br>6,4%    | 7,4<br>1,3%            | 2,5<br>1,3%    | 27<br>2,6%     |
| <b>Ni</b>                                 | 0,26<br>1,8%  | 1,0<br>1,2%            | 0,06<br>0,8%   | 6,9<br>4,5%    |
| <b>Pb</b>                                 | 11,5<br>23%   | 4419<br>33%            | 2,2<br>3,2%    | 21165<br>48,3% |
| <b>Sb</b>                                 | <0,5          | 5,4<br>2%              | 0,1<br>0,7%    | 83,2<br>15,6%  |
| <b>Zn</b>                                 | 8,4<br>18,7%  | 177<br>1,2%            | 1,03<br>1,8%   | 1076<br>2,3%   |

**Métaux et métalloïdes échangeables à T0 (Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> à 0,05M) (moyenne n=3 en mg/kg de MS, et % vs pseudo-total)**

**% fraction échangeable faible**  
Mais quantité non négligeable  
pour Pb et Zn dans Scories

**Mélange RBM+Scories**



Diminution des quantités  
et fractions échangeables par  
rapport aux scories seules,  
notamment pour Pb et Zn

| mg/kg de MS<br>et % de la fraction totale | 99% Terre      | 70%-30%<br>Scories RBM | 99% RBM       | 99% Scories   |
|---|----------------|------------------------|---------------|---------------|
| <b>Al</b>                                 | < LD           | 1,2<br>0,002%          | 1,9<br>0,003% | 0,8<br>0,004% |
| <b>As</b>                                 | < LD           | < LD                   | < LD          | < LD          |
| <b>Cd</b>                                 | < LD           | < LD                   | < LD          | 0,15<br>0,3%  |
| <b>Cr</b>                                 | < LD           | < LD                   | 0,5<br>0,03%  | < LD          |
| <b>Cu</b>                                 | < LD           | < LD                   | < LD          | 0,1<br>0,004% |
| <b>Fe</b>                                 | 0,12<br>0,001% | < LD                   | < LD          | 2<br>0,001%   |
| <b>Mn</b>                                 | 0,5<br>0,15%   | 0,06<br>0,01%          | < LD          | 1<br>0,09%    |
| <b>Ni</b>                                 | < LD           | < LD                   | < LD          | 0,3<br>0,2%   |
| <b>Pb</b>                                 | < LD           | 0,14<br>0,001%         | < LD          | 109<br>0,25%  |
| <b>Sb</b>                                 | < LD           | 0,42<br>0,15%          | < LD          | 0,64<br>0,12% |
| <b>Zn</b>                                 | 0,05<br>0,11%  | 0,03<br>0,0002%        | 0,02<br>0,03% | 33<br>0,07%   |

# Suivi de la germination



## Germination sur chaque type de substrat en % après 8 jours

|           |                    |         |            |
|-----------|--------------------|---------|------------|
| 99% terre | 30% RBM 70% scorie | 99% RBM | 99% scorie |
| 13,7±0,8a | 10,9±0,8b          | 4±2c    | <0,01      |

n=5, p≤0,05, test non paramétrique Wilcoxon

**Toxicité et problème de structure/porosité pour Scories et RBM seuls ?  
Pas de germination notable sur scories seules**

# Suivi de la croissance



## Hauteur des dactyles sur chaque type de substrat en cm après 23 jours

|           |                    |          |            |
|-----------|--------------------|----------|------------|
| 99% terre | 30% RBM 70% scorie | 99% RBM  | 99% scorie |
| 10,1±0,7a | 6,8±0,3b           | 1,8±0,6c | <0,1       |

n=5, p≤0,05, test non paramétrique Wilcoxon

**RBM+Scories = Croissance inférieure à référence mais supérieure à RBM seul (>3 fois)**

# Fin expérimentation après 26 jours



**Métaux et métalloïdes pseudo-totaux (eau régale) dans les parties aériennes (PA) des Dactyles**  
(moyenne ± écart type n=5, mg/kg de MS)

**Sur Scories+RBM :** [métaux] dans PA Dactyles > à référence, sauf pour Mn.

⇒ **Tolérance de Dactyles et limitation des transferts vers PA, mais rôle direct du RBM?**

⇒ **Effet dilution du RBM vs Scories seules**

⇒ **Impact positif du RBM sur la fraction mobilisable des métaux, sauf pour Al**

| mg/kg de MS parties aériennes | 99% Terre | 70%-30% Scories RBM |
|-------------------------------|-----------|---------------------|
| <b>Al</b>                     | 254 ±54   | 986 ±336            |
| <b>As</b>                     | <0,5      | 2,2 ±0,4            |
| <b>Cd</b>                     | <0,3      | 0,31 ±0,25          |
| <b>Cr</b>                     | 13 ±4     | 94 ±42              |
| <b>Cu</b>                     | 13 ±3     | 25 ±3               |
| <b>Fe</b>                     | 321 ±40   | 4355 ±1646          |
| <b>Mn</b>                     | 52 ±4     | 37 ±8               |
| <b>Ni</b>                     | 10 ±3     | 36 ±17              |
| <b>Pb</b>                     | 2,4 ±0,8  | 172 ±75             |
| <b>Sb</b>                     | <1        | 3,5 ±1,2            |
| <b>Zn</b>                     | 58 ±3     | 189 ±123            |

# 2-C-Essai pilote

**INERIS**

*maîtriser le risque |  
pour un développement durable*

**Pierre HENNEBERT**

# RÉSULTATS: VÉGÉTALISATION DE LA BAUXALINE® (1000 M<sup>2</sup>)

*Secale cereale*  
(seigle),  
±100 jours

Photo Marjorie  
Petit, Alteo,  
23/02/2017



# CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

## BILAN GLOBAL:

Identification des perceptions du risques pour les individus et professionnels.

Immobilisation des éléments métalliques et métalloïdes (teneurs dans les **lixiviats** faibles mais attention à **As** dans le sol de l'Escalette).

**Teneurs foliaires:** attention au **Pb, Cr, Fe**.

Tests d'écotoxicité montrant les éléments expliquant le mieux la mortalité (Zinc notamment),

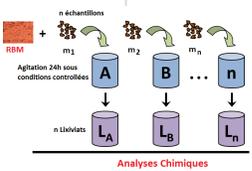
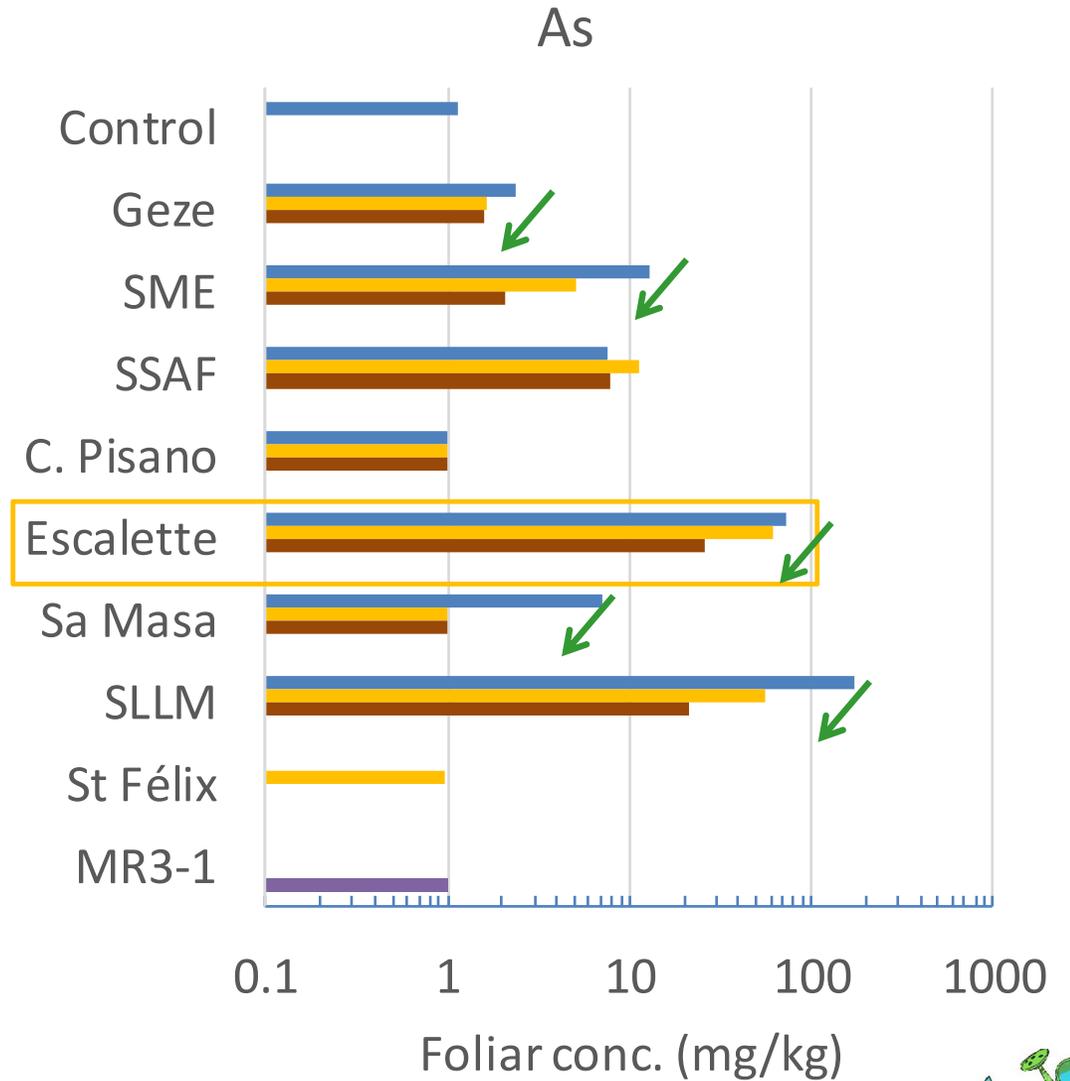
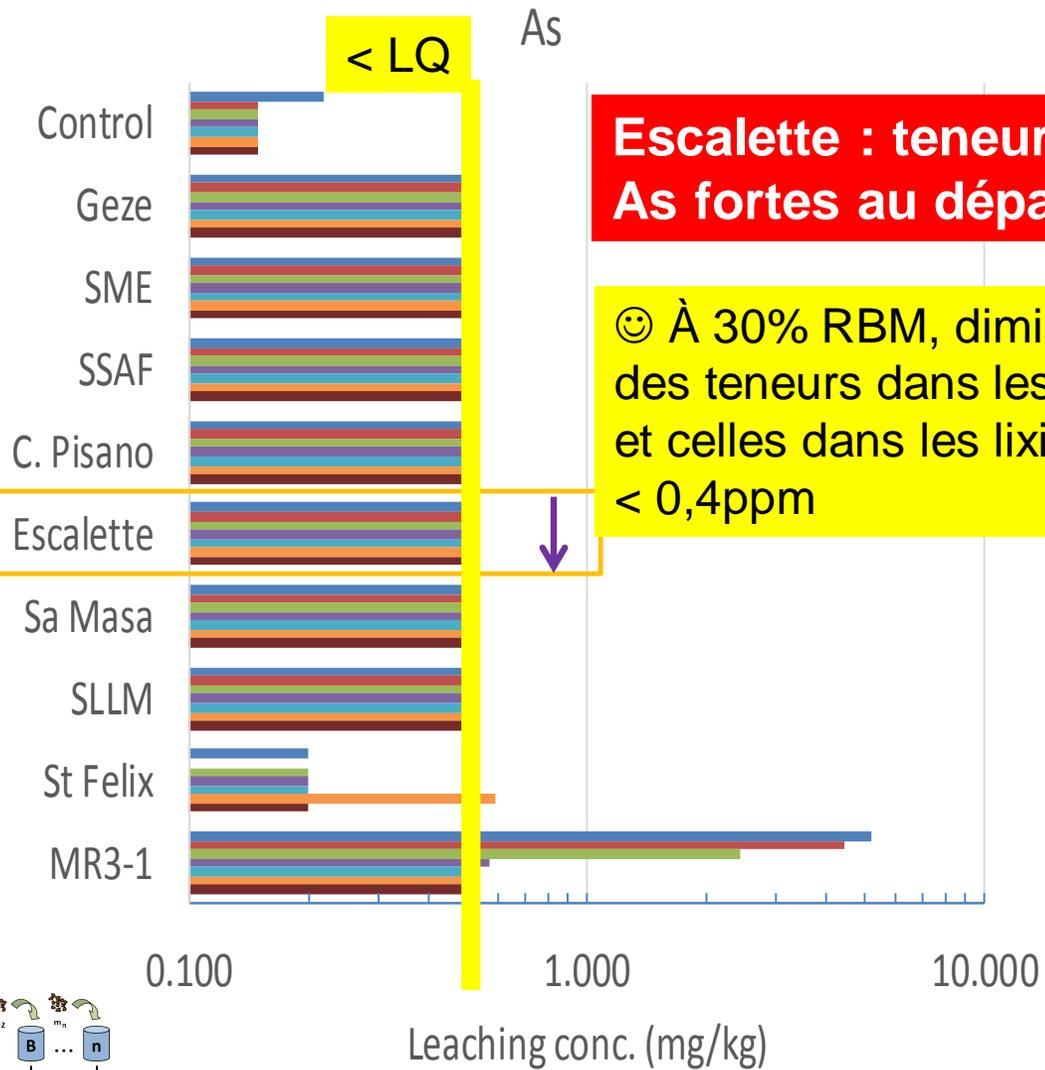
Suivi de croissance et analyses chimiques sur les essais avec plantes en serre.



MERCI DE VOTRE  
ATTENTION



# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : As

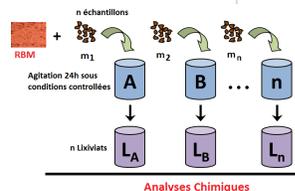
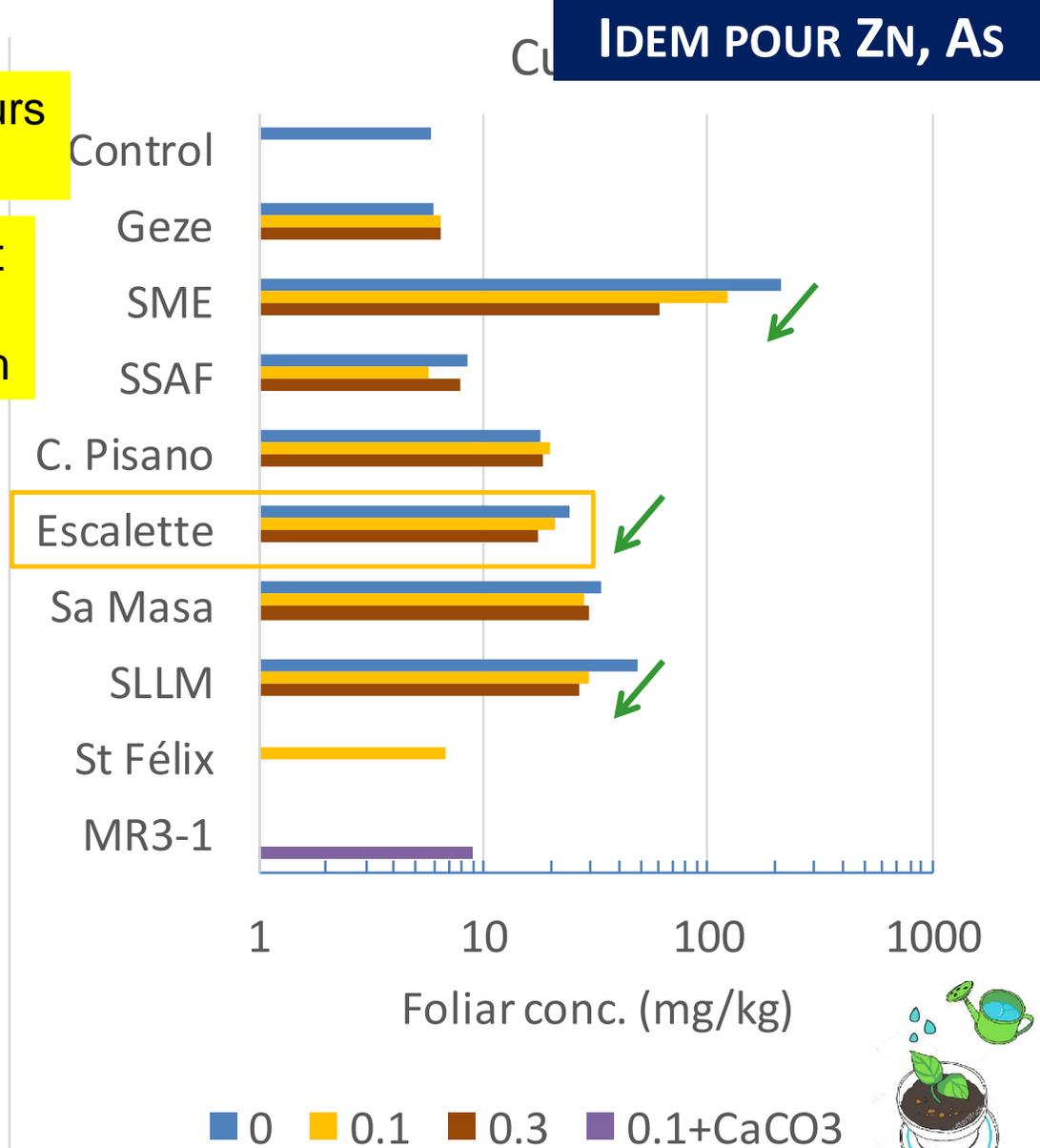
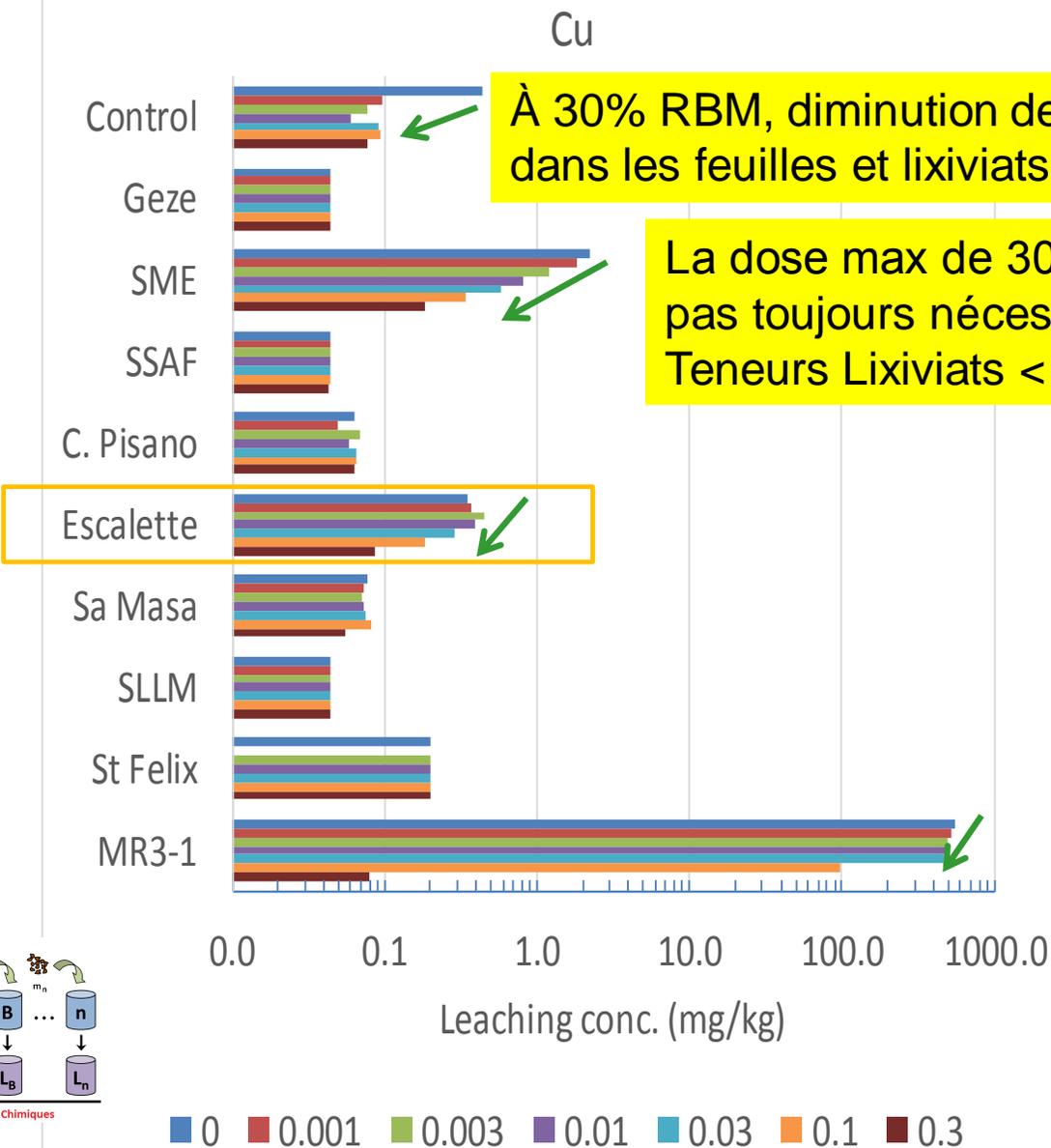


■ 0 ■ 0.001 ■ 0.003 ■ 0.01 ■ 0.03 ■ 0.1 ■ 0.3

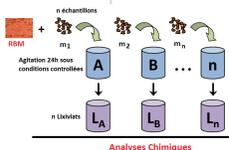
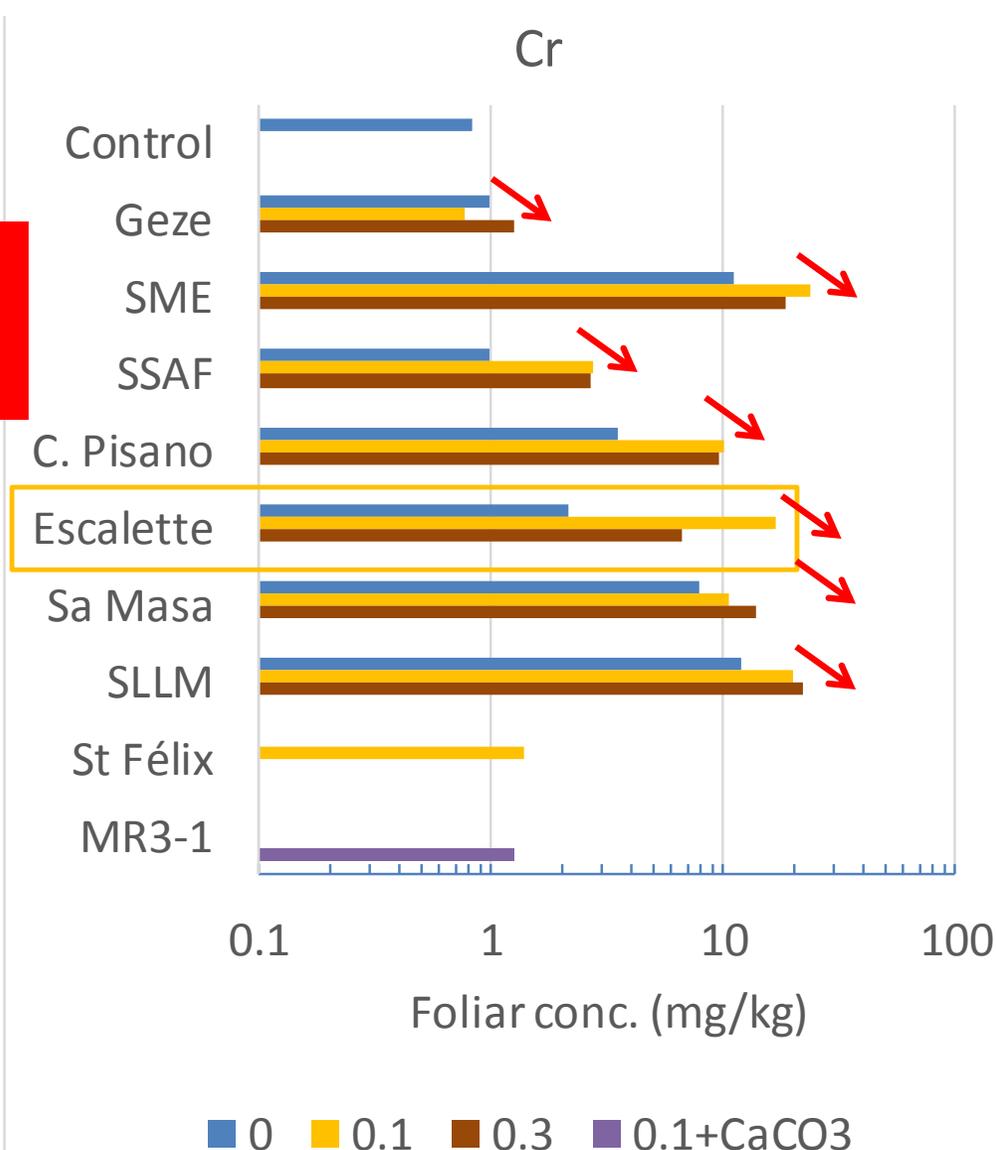
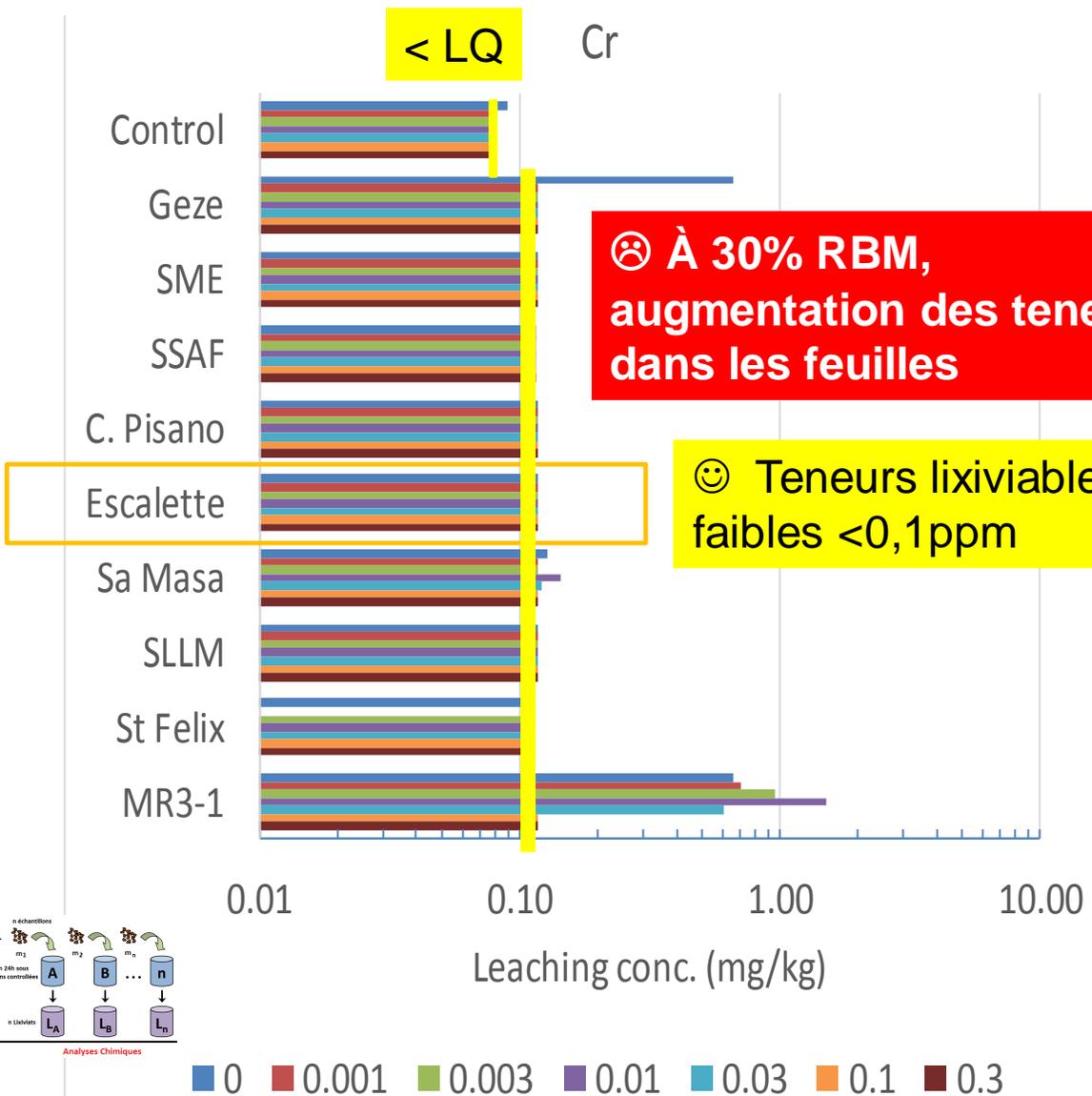
■ 0 ■ 0.1 ■ 0.3 ■ 0.1+CaCO3



# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : CU



# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : Cr



# Caractéristiques des substrats des tests de croissance

Métaux et métalloïdes pseudo-totaux (eau régale) à T0 (moyenne±écart type n=3, mg/kg de MS)

| mg/kg de MS | 99% Terre  | 70%-30% Scories<br>RBM | 99% RBM       | 99% Scories   |
|-------------|------------|------------------------|---------------|---------------|
| <b>Al</b>   | 20412 ±219 | 48687 ±3085            | 62540 ±1826   | 18553 ±2029   |
| <b>As</b>   | <1         | 274 ±113               | <1            | 693 ±69       |
| <b>Cd</b>   | 2,7 ±0,2   | 40 ±1                  | 41,3 ±0,9     | 46 ±5         |
| <b>Cr</b>   | 23,6 ±0,3  | 1029 ±14               | 1570 ±33      | 249 ±89       |
| <b>Cu</b>   | 1,7 ±0,1   | 1426 ±208              | 11,0 ±0,6     | 2585 ±525     |
| <b>Fe</b>   | 13342 ±100 | 273042 ±7648           | 276215 ±11449 | 243263 ±31790 |
| <b>Mn</b>   | 345 ±4     | 567 ±34                | 185 ±5        | 1052 ±109     |
| <b>Ni</b>   | 14,0 ±0,1  | 80 ±60                 | 7,3 ±0,1      | 152 ±48       |
| <b>Pb</b>   | 50 ±4      | 13355 ±960             | 69 ±2         | 43773 ±7855   |
| <b>Sb</b>   | <1         | 274 ±128               | 14,2 ±0,3     | 533 ±80       |
| <b>Zn</b>   | 45 ±1      | 14947 ±845             | 56 ±4         | 46881 ±5543   |

RBM : concentré en Al, Cr et Fe

Scories: concentrées en As, Cu, Pb, Sb et Zn



Impact mélange avec RBM = effet dilution sur scories notamment pour As, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Zn mais inverse pour Al et Cr

# Fin expérimentation après 26 jours



## Masses de matières fraîches et sèches des parties aériennes des dactyles récoltées sur chaque type de substrat en g après 26 jours

| 99% terre        | 30% RBM 70% scorie | 99% RBM | 99% scorie |
|------------------|--------------------|---------|------------|
| 6,1±0,6a (frais) | 1,8±0,3b (frais)   | <0,05   | <0,01      |
| 0,7±0,1a (sec)   | 0,25±0,07b (sec)   | <0,05   | <0,01      |

n=5, p≤0,05, test non paramétrique Wilcoxon

**RBM+Scories = parties aériennes inférieures à référence (environ 3 fois moins)**  
**Trop faibles quantités de matières récupérées sur RBM seul pour faire des calculs**

# Fin expérimentation après 26 jours

## Métaux et métalloïdes pseudo-totaux (eau régale) dans les parties aériennes (PA) des Dactyles

(moyenne ± écart type n=5, mg/kg de MS)

| mg/kg de MS parties aériennes | 99% Terre | 70%-30% Scories RBM |
|-------------------------------|-----------|---------------------|
| <b>Al</b>                     | 254 ±54   | 986 ±336            |
| <b>As</b>                     | <0,5      | 2,2 ±0,4            |
| <b>Cd</b>                     | <0,3      | 0,31 ±0,25          |
| <b>Cr</b>                     | 13 ±4     | 94 ±42              |
| <b>Cu</b>                     | 13 ±3     | 25 ±3               |
| <b>Fe</b>                     | 321 ±40   | 4355 ±1646          |
| <b>Mn</b>                     | 52 ±4     | 37 ±8               |
| <b>Ni</b>                     | 10 ±3     | 36 ±17              |
| <b>Pb</b>                     | 2,4 ±0,8  | 172 ±75             |
| <b>Sb</b>                     | <1        | 3,5 ±1,2            |
| <b>Zn</b>                     | 58 ±3     | 189 ±123            |

**Sur Scories+RBM** : concentrations en MM dans PA Dactyles > à référence, sauf pour Mn.

**Facteurs de BioConcentration** FBC (concentration dans parties aériennes/concentration pseudo-totale dans substrat) =

- Sur **Scories+RBM** :

**<0,1** ( 0,017 pour Cu - 0,013 pour Pb et Zn - 0,065 pour Mn - 0,091 pour Cr) sauf pour Ni avec 0,446

- Sur **Terre référence** :

FBC supérieurs à Scories+RBM sauf pour Al (0,012 pour Terre et 0,020 pour Scories+RBM )

FBC importants pour Cu (7,76) et Zn (1,30)

⇒ **Tolérance de Dactyles et limitation des transferts vers PA, mais rôle direct du RBM?**

⇒ **Effet dilution du RBM vs Scories seules**

⇒ **Impact positif du RBM sur la fraction mobilisable des MM, sauf pour Al**