

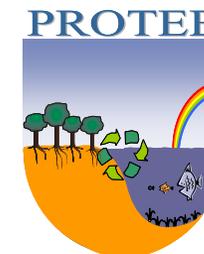


**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |

**Pierre HENNEBERT**

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**



**Raquel BERTHOLDO**



**Isabelle LAFFONT-SCHWOB**



**Pascale PRUDENT**

**Laurent VASSALO**

---

# 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

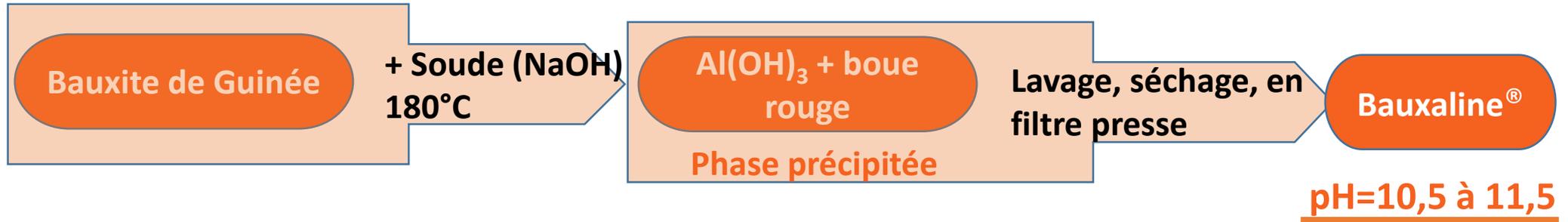
## L'industrie de l'alumine et de l'aluminium produit :

- 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

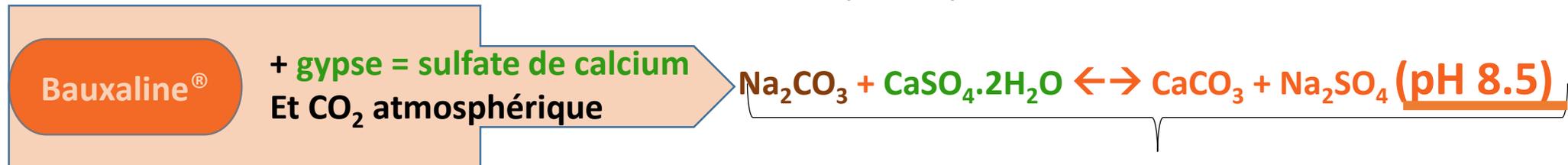
## PRODUCTION DE LA BAUXALINE



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 Scientifique

### Partie SHS

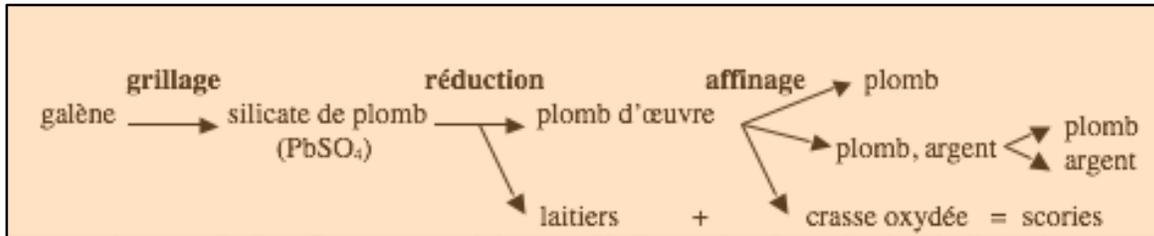
- ① **A quelle dose** le RBM est-il efficace pour immobiliser les éléments métalliques et métalloïdes présents dans les sols contaminés et les scories?
- ② Les mélanges **RBM+sol** et **RBM+scories** offrent-ils des milieux **acceptables pour les plantes**?  
Est-il possible pour **des plantes sauvages 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?

# 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
- 



# QUESTIONNAIRE : LA MÉTHODE

- 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

## Quelques questions clés

### Identification du sondé

- ◆ Attachement au quartier
- ◆ Identité environnementale
- ◆ Usage des espaces naturels dans votre ville

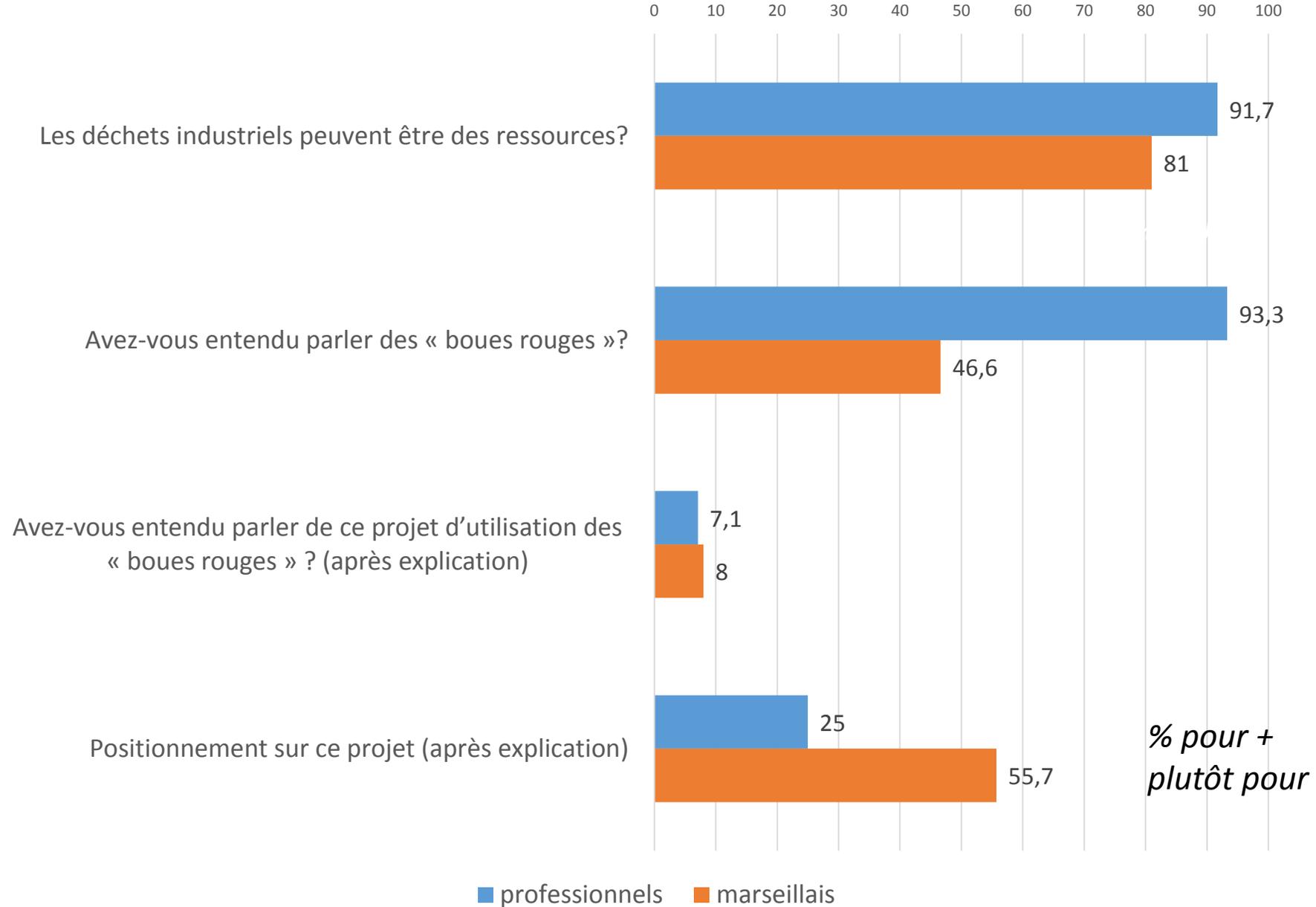
### Identification du risque perçu

- ◆ Que savez-vous sur le sujet des boues rouges? Sur celui de **valorisation des « boues rouges »** dans la région ?

### Paramètres d'accentuation?

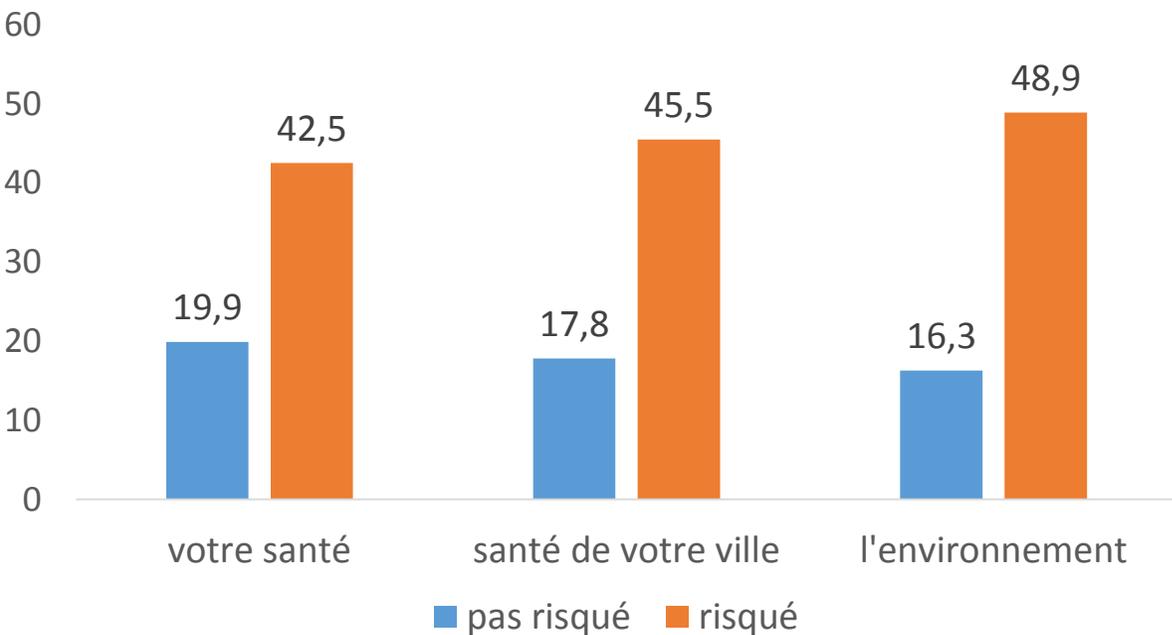
- ◆ **Bénéfices vs Risques** pour ce projet de valorisation des boues rouges?
- ◆ A quel niveau vous faites **confiance** : à la science, aux scientifiques, à l'information, aux organismes privés, aux institutions de l'état ?

# Connaissances générales du sujet



# Risque perçu pour le projet de valorisation: risque pour quoi?

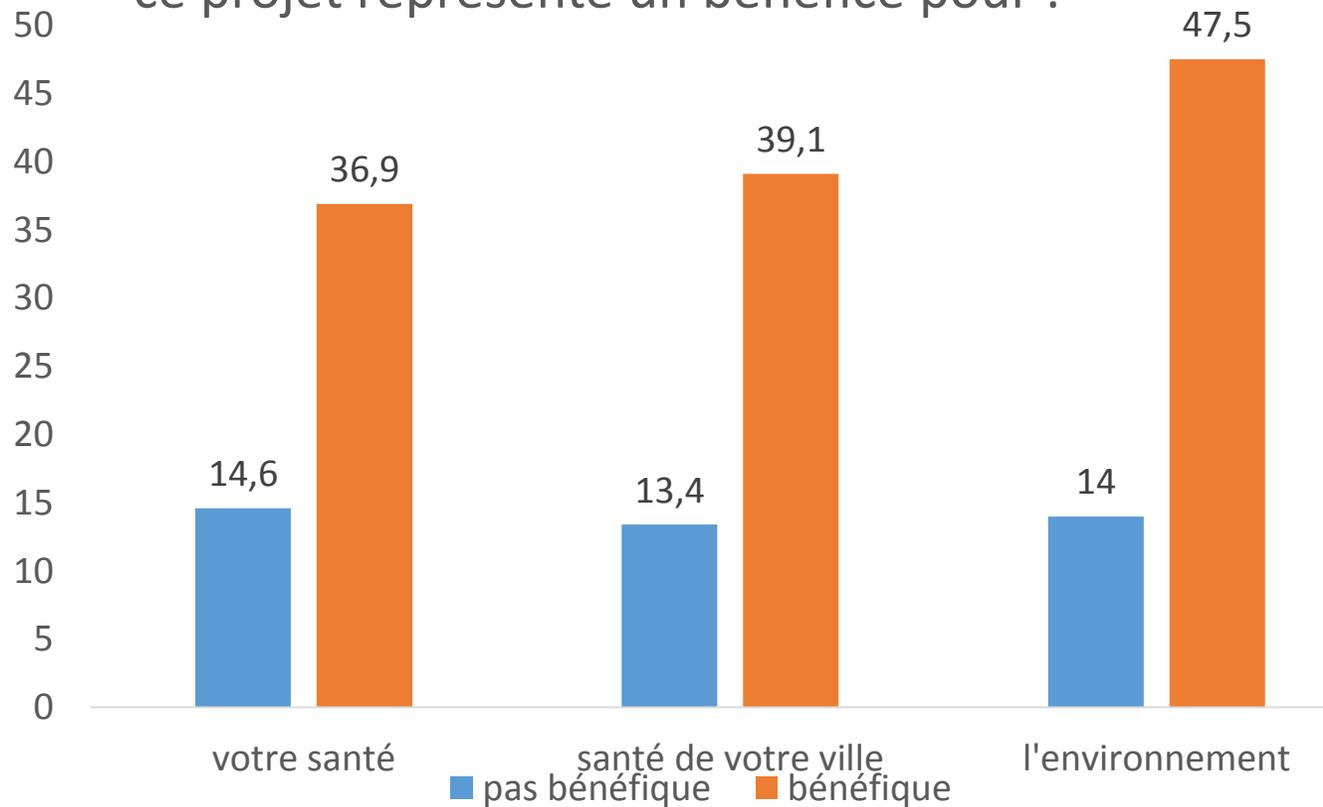
ce projet d'utilisation des boues rouges  
représente un risque pour :



C'est risqué + plutôt risqué

Ce n'est pas risqué + peu risqué

ce projet représente un bénéfice pour :

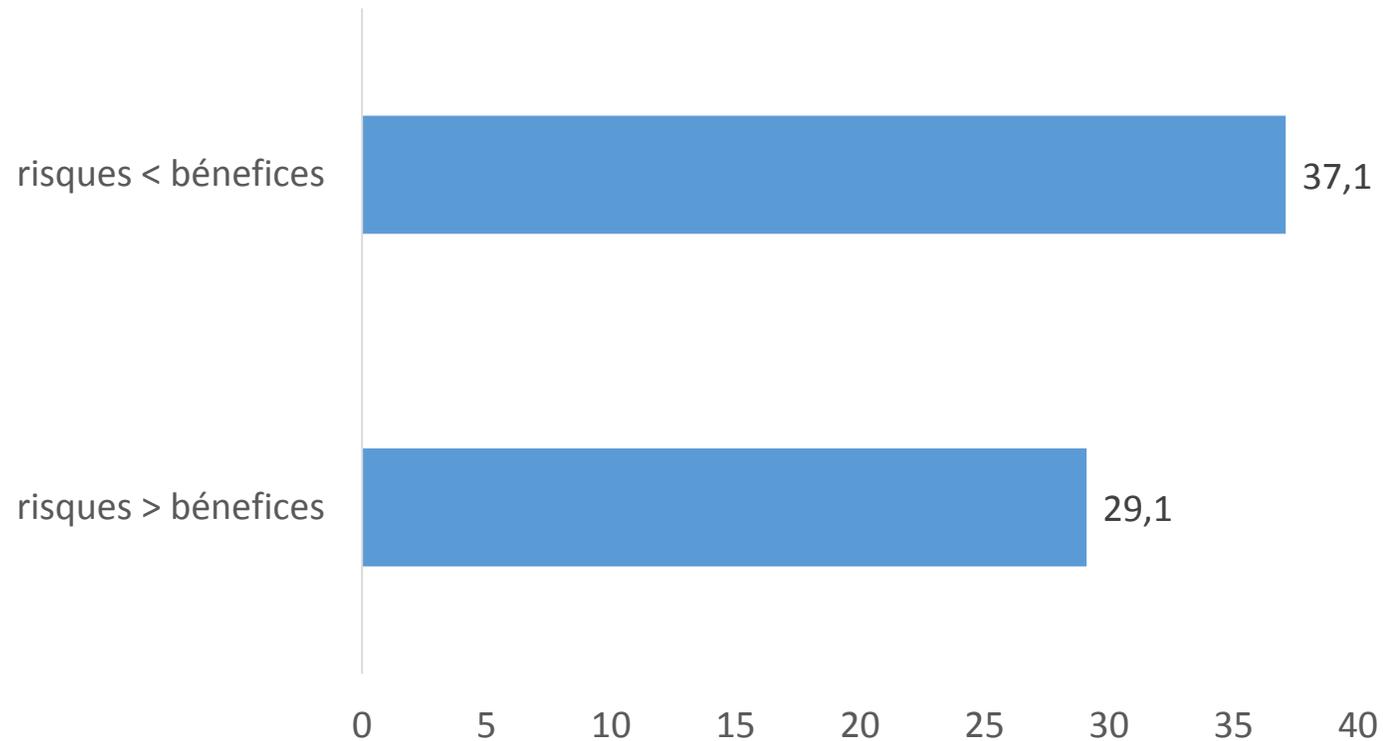


C'est bénéfique + plutôt bénéfique

Ce n'est pas bénéfique + peu bénéfique

# Risques vs Bénéfices perçus pour le projet de valorisation

Comment jugeriez-vous les risques par rapport aux bénéfices associés à ce projet



Échelle à 5 pt, résultats regroupés

## QUESTIONNAIRE : INTERPRÉTATIONS

- **L'identité écologique** est une bonne variable explicative des perceptions de risque – plus que l'attachement au lieu
- Ceux qui se considèrent comme étant plus investis sur l'environnement
  - Sont **plus informés** sur la question des boues rouges que ceux qui le sont moins ( $M = 3.45$  vs  $M = 3.8$ ) ( $t(183) = 2.29$ ,  $p = .02$ )
  - Considèrent plus que **l'enjeu des boues rouges concerne la ville de Marseille** ( $M = 3.9$  vs  $M = 4.2$ ),  $t(182) = -2.01$ ,  $p = .045$ )
  - Perçoivent **les autres marseillais acceptant mieux le projet** ( $M = 3.36$  vs  $M = 3.1$ )  $t(181) = 2.09$ ,  $p = .037$ )

---

# RESTITUTION DE LA PARTIE SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

- ① IMMOBILISATION DES ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES  
DANS LES MÉLANGES RBM-SOL ET RBM-SCORIES
  - ② ECOTOXICITÉ DES SUBSTRATS POLLUES +/-  
STABILISÉS PAR LE RBM ET CAPACITÉS DE  
CROISSANCE D'ESPÈCES VÉGÉTALES SUR CES  
SUBSTRATS
  - ③ SPÉCIATION CHIMIQUE DES ÉLÉMENTS  
MÉTALLIQUES
-

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

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

# 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%

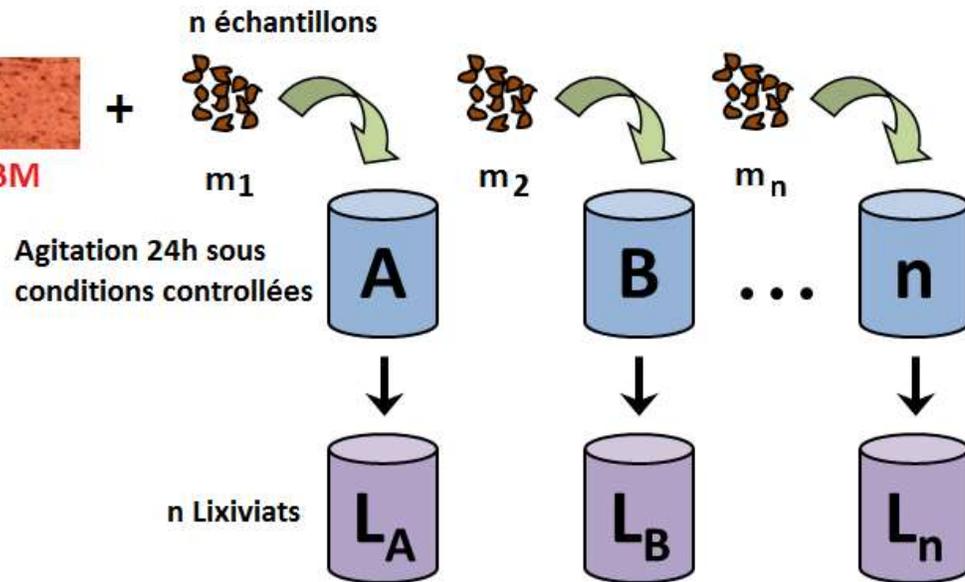


$m_1$

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

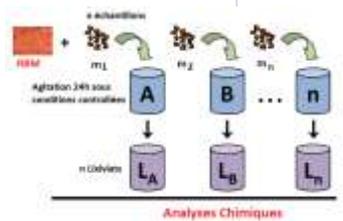
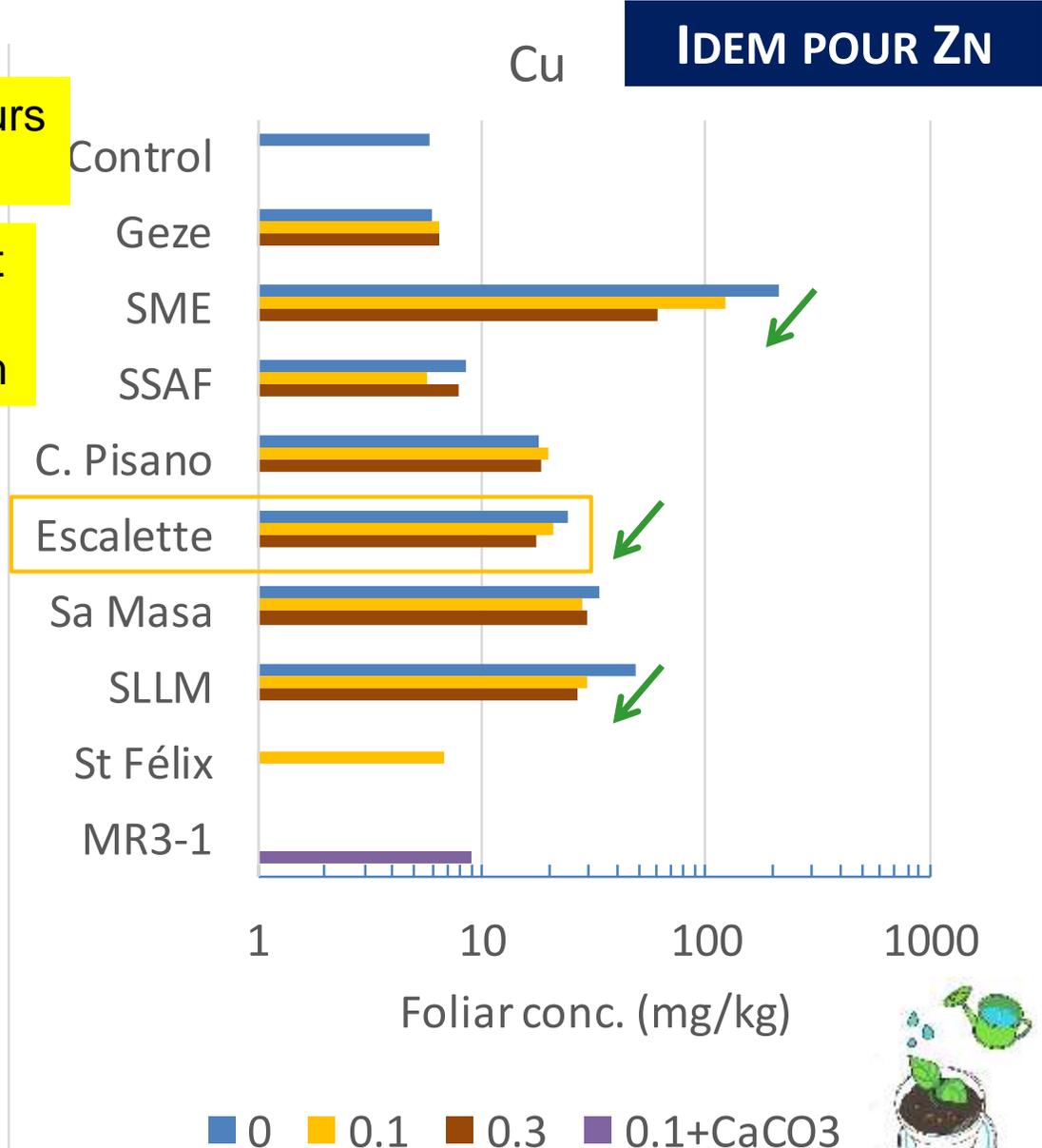
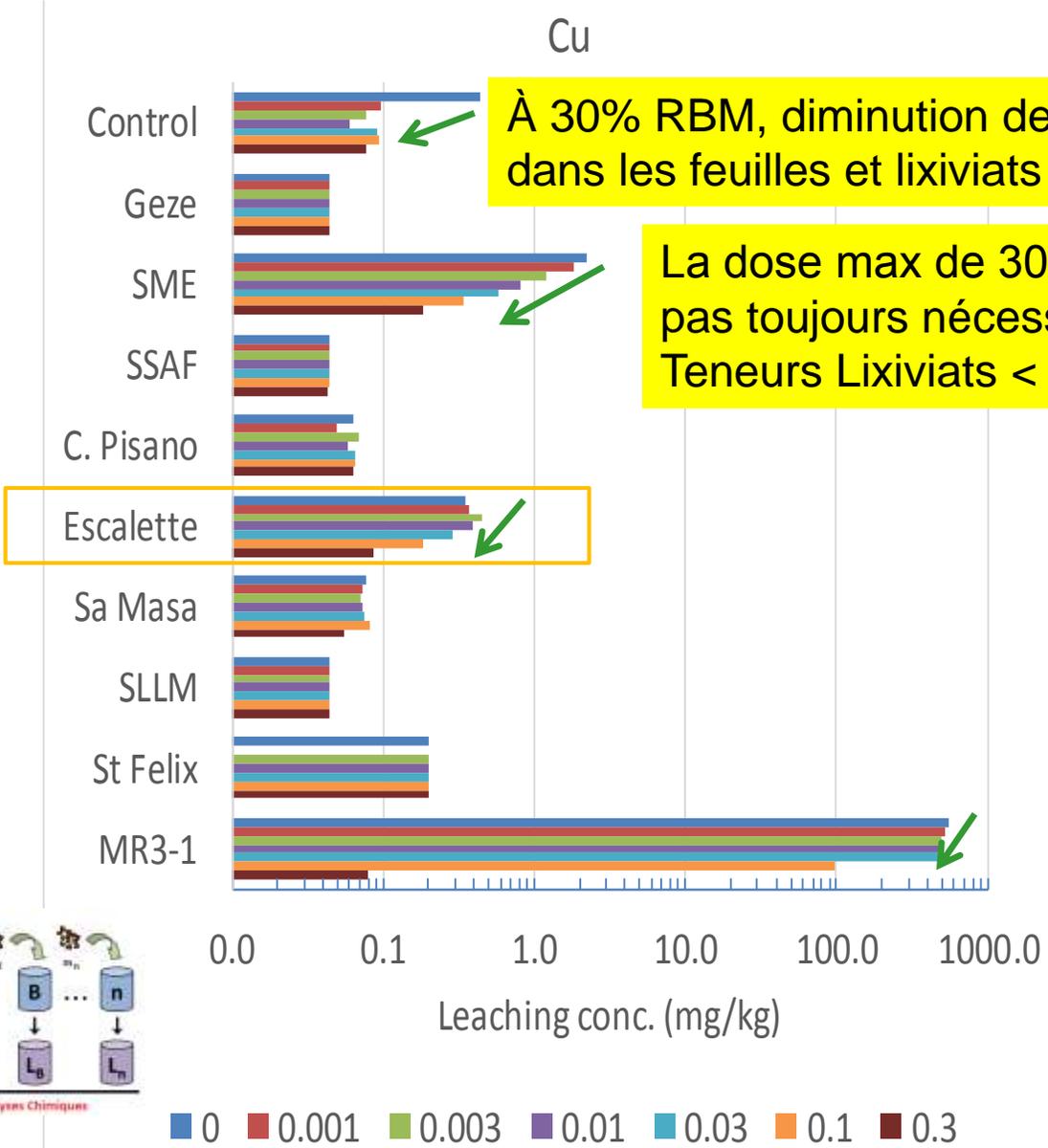
② *Dactylis glomerata* a été cultivé en lysimètres en plein air de 50 l avec les résidus miniers de St Félix et MR3-1, depuis 2014 et 2015, avec 1% de compost pour MR3-1, avec engrais NPK à dose agronomique, irrigation régulière et lixiviation libre.

La croissance avec addition de RBM a été florissante.

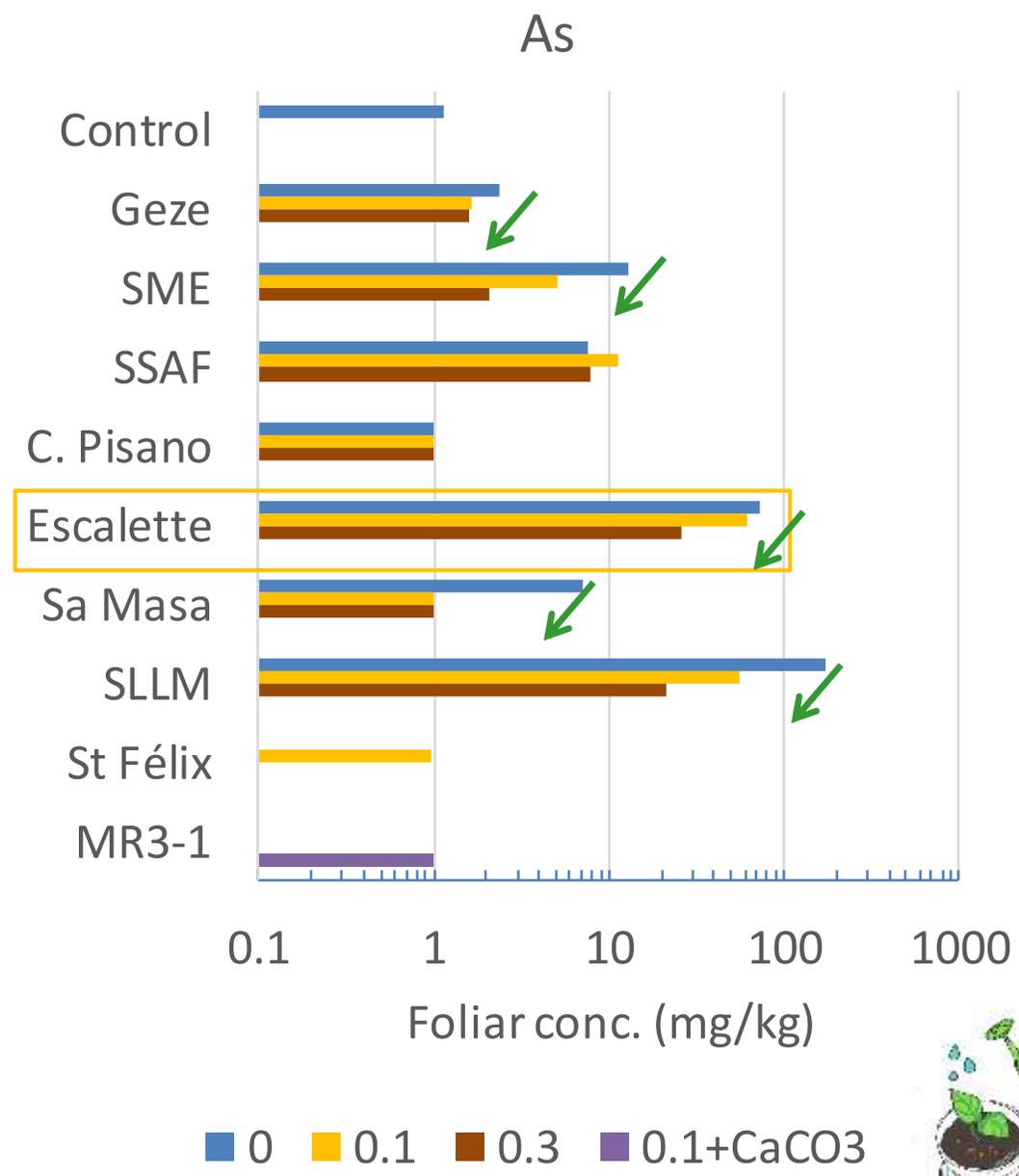
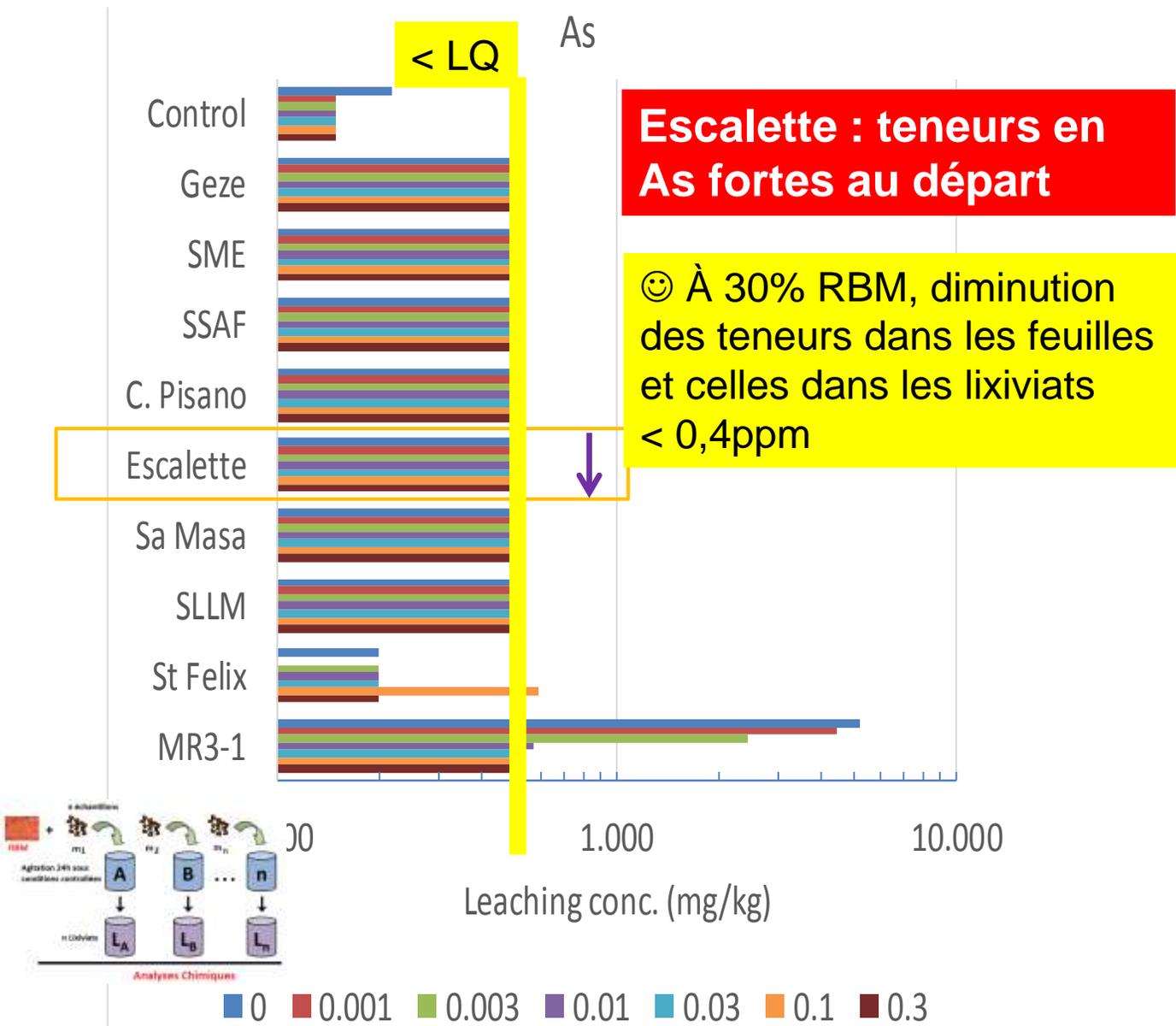


③ Un terrain d'essai de 30 m<sup>2</sup> a été installé à St Félix en 2014.

# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : Cu



# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : As



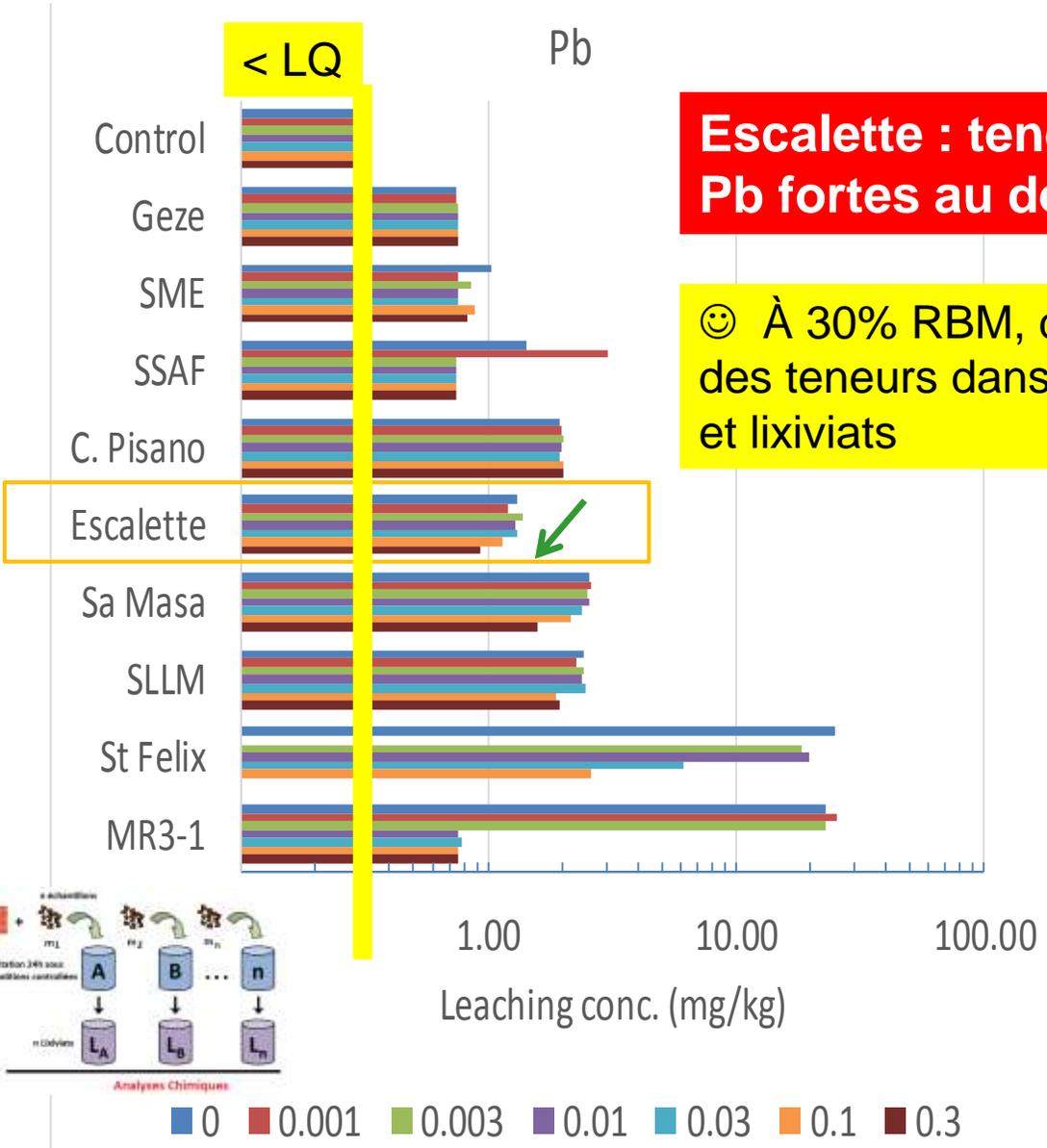
# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : Pb

< LQ

Pb

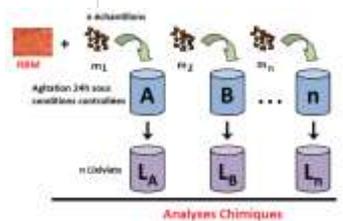
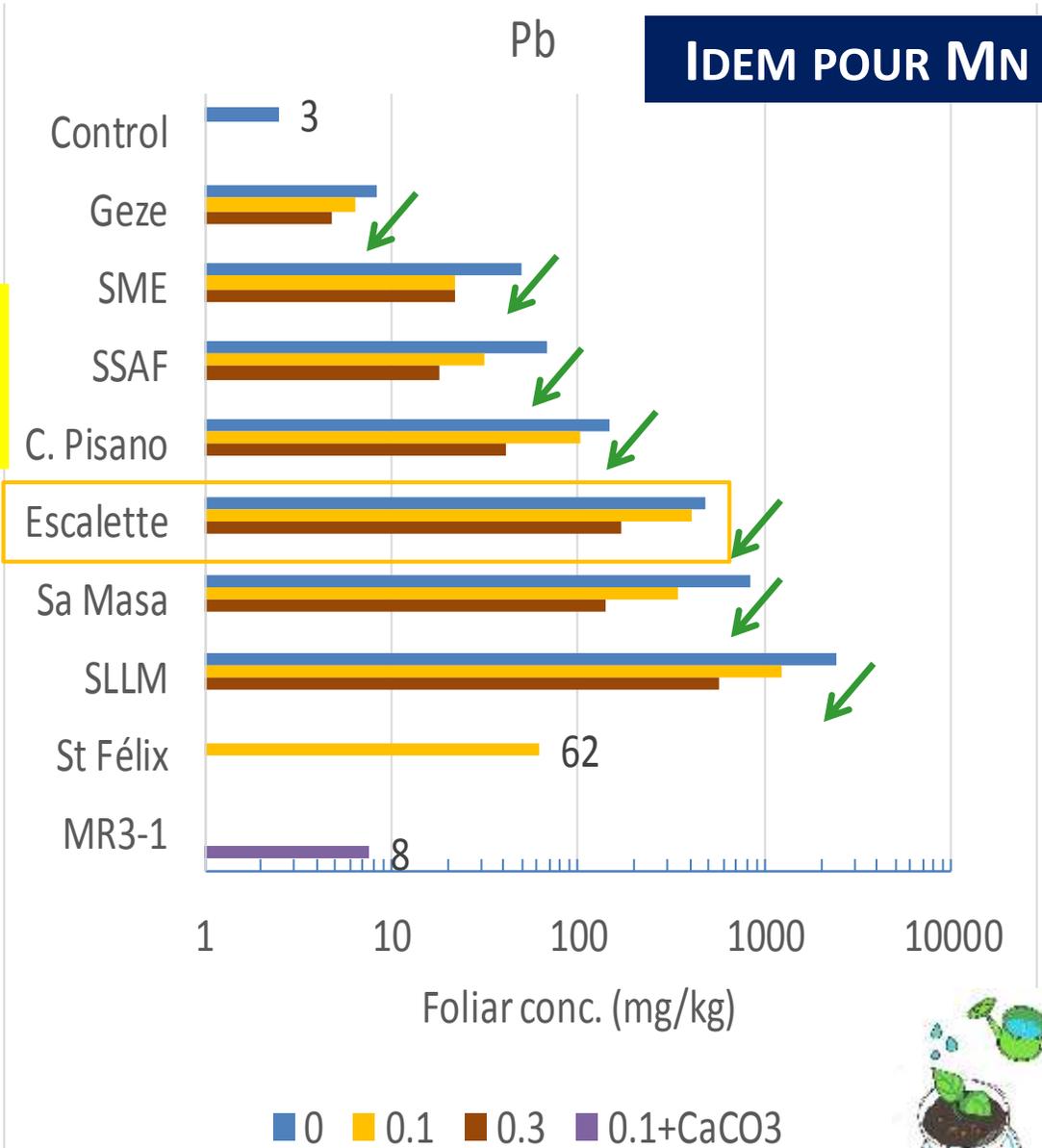
**Escalette : teneurs en Pb fortes au départ**

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

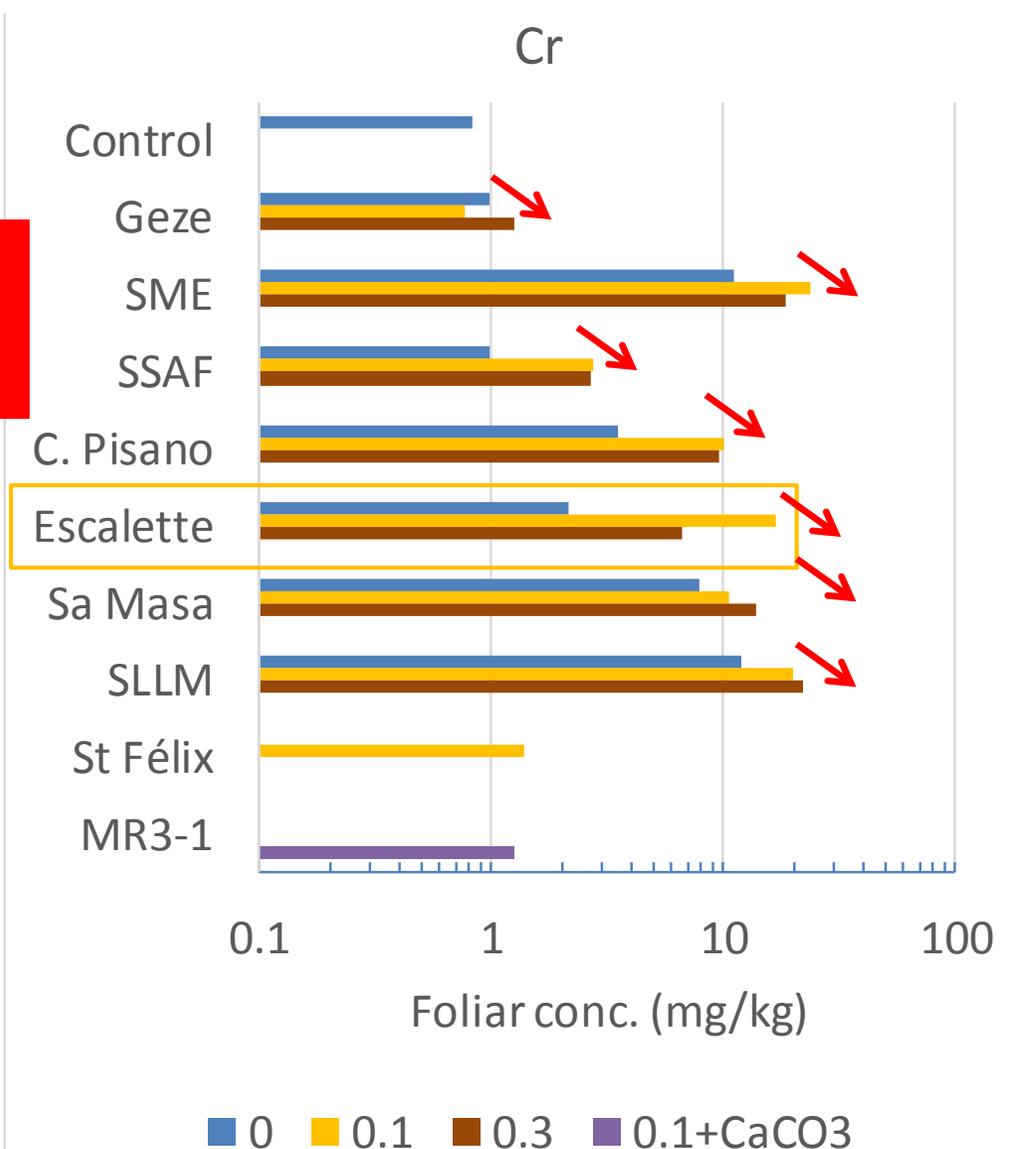
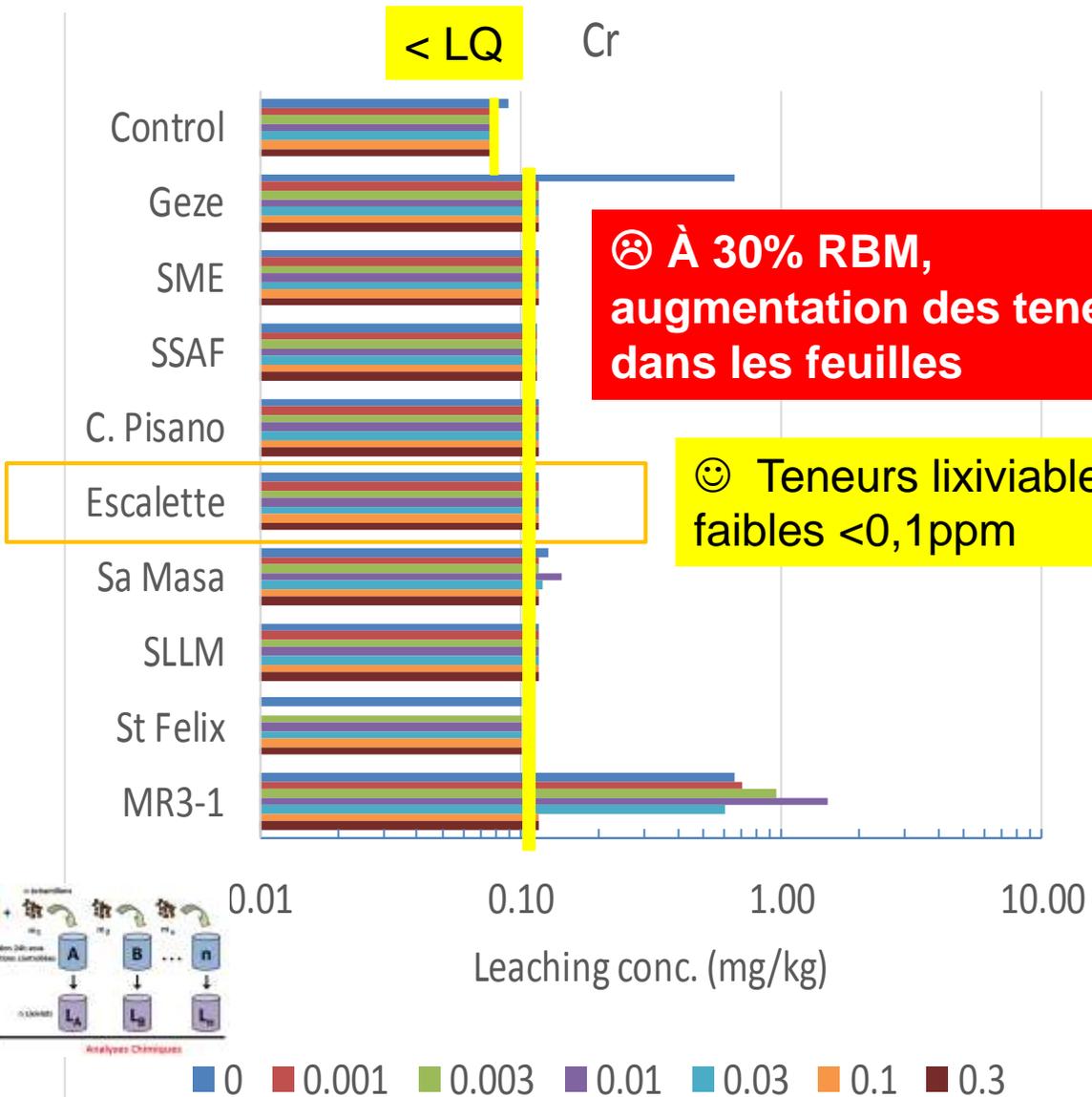


Pb

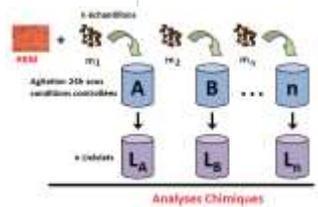
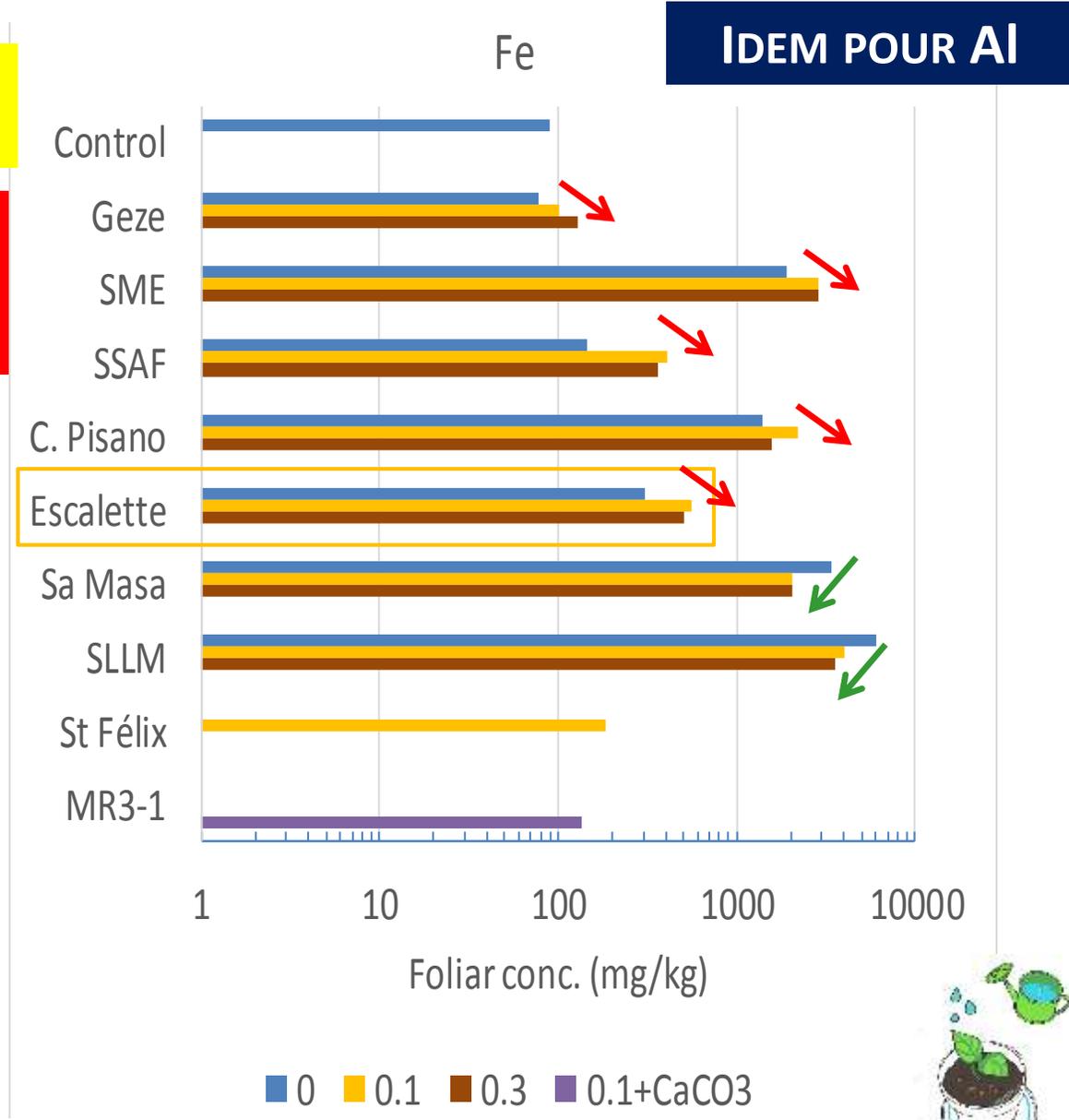
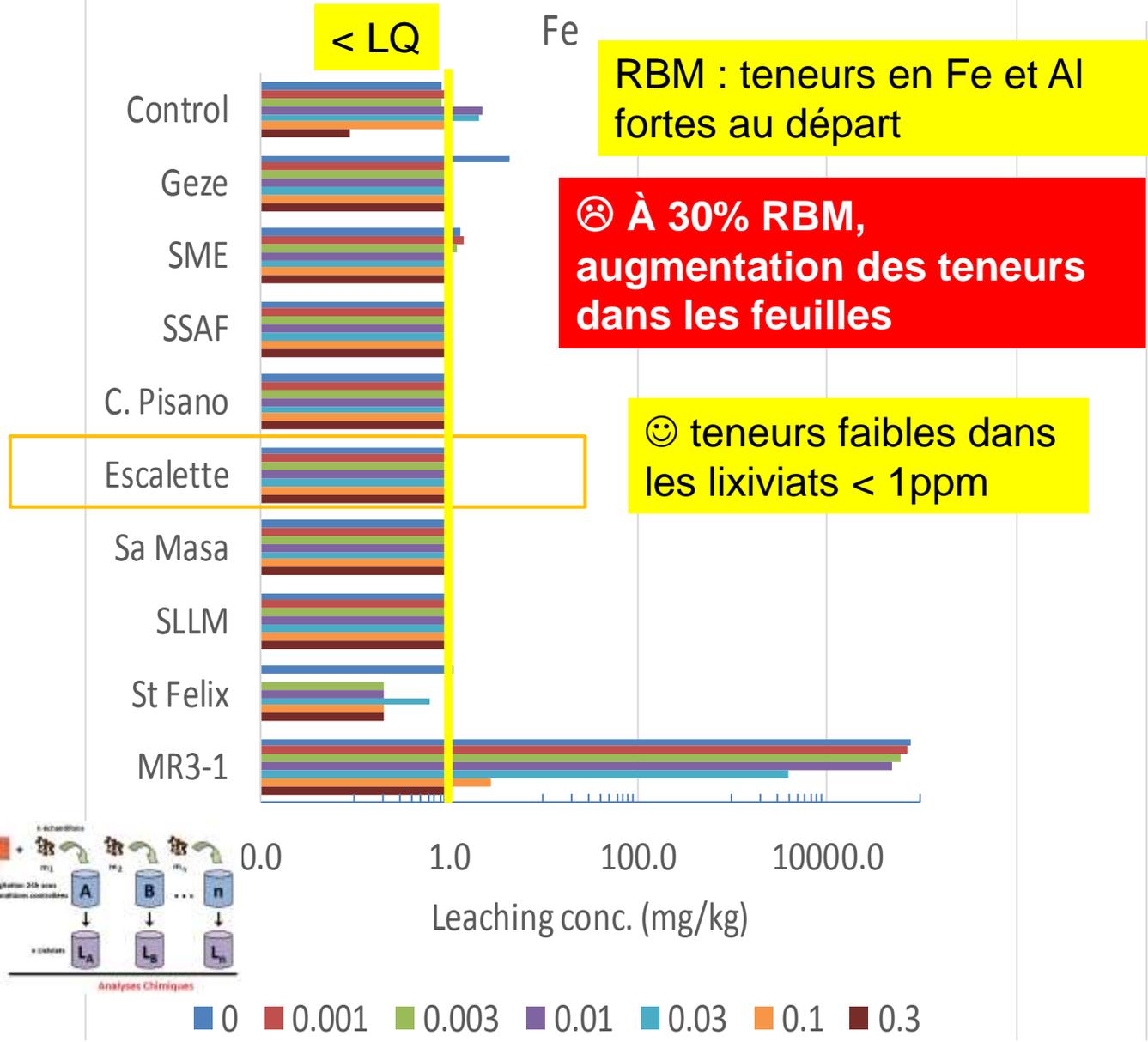
**IDEM POUR MN**



# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : CR

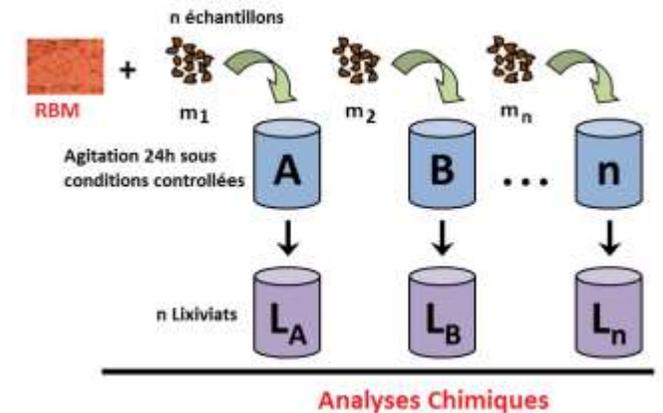


# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : Fe



# 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 partie de RBM. Les concentrations foliaires sont réduites avec l'ajout de RBM.

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

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

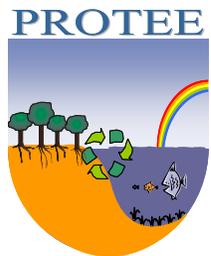
Dans les lysimètres et les parcelles, la croissance est bonne et les concentrations foliaires sont réduites jusqu'à la celles du témoin pour tous les éléments, **sauf pour le plomb, chrome, Fe,**



Les concentrations lixiviables (avec de l'eau désionisée) peuvent être utilisées pour tester les amendements du sol, à l'exception du plomb.

## 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**



**Pascale PRUDENT**

**Laurent VASSALO**

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



**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

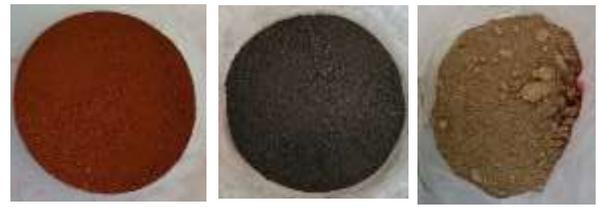
## Protocole opératoire

**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

Lixiviation

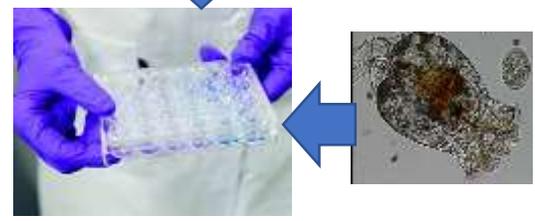


Filtration à  
0,45µm



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)



Test éco-  
toxicologique

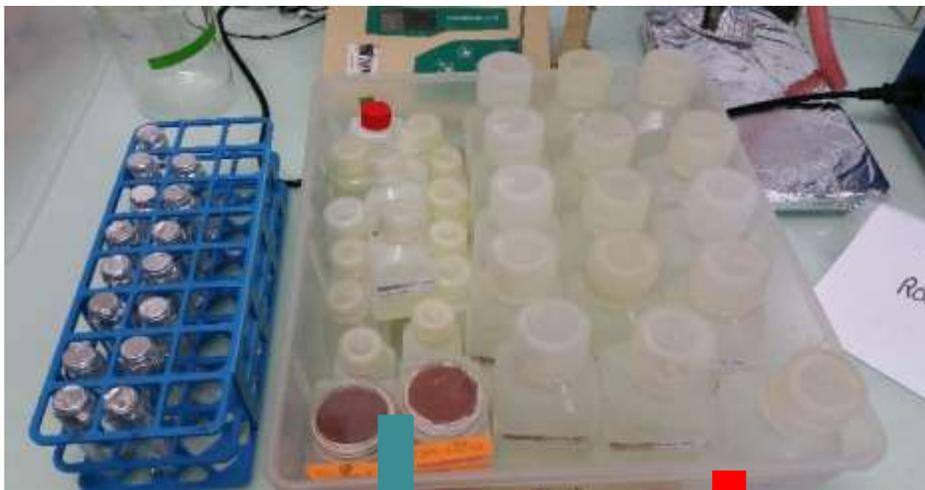
Comptage après  
24h de contact



# 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



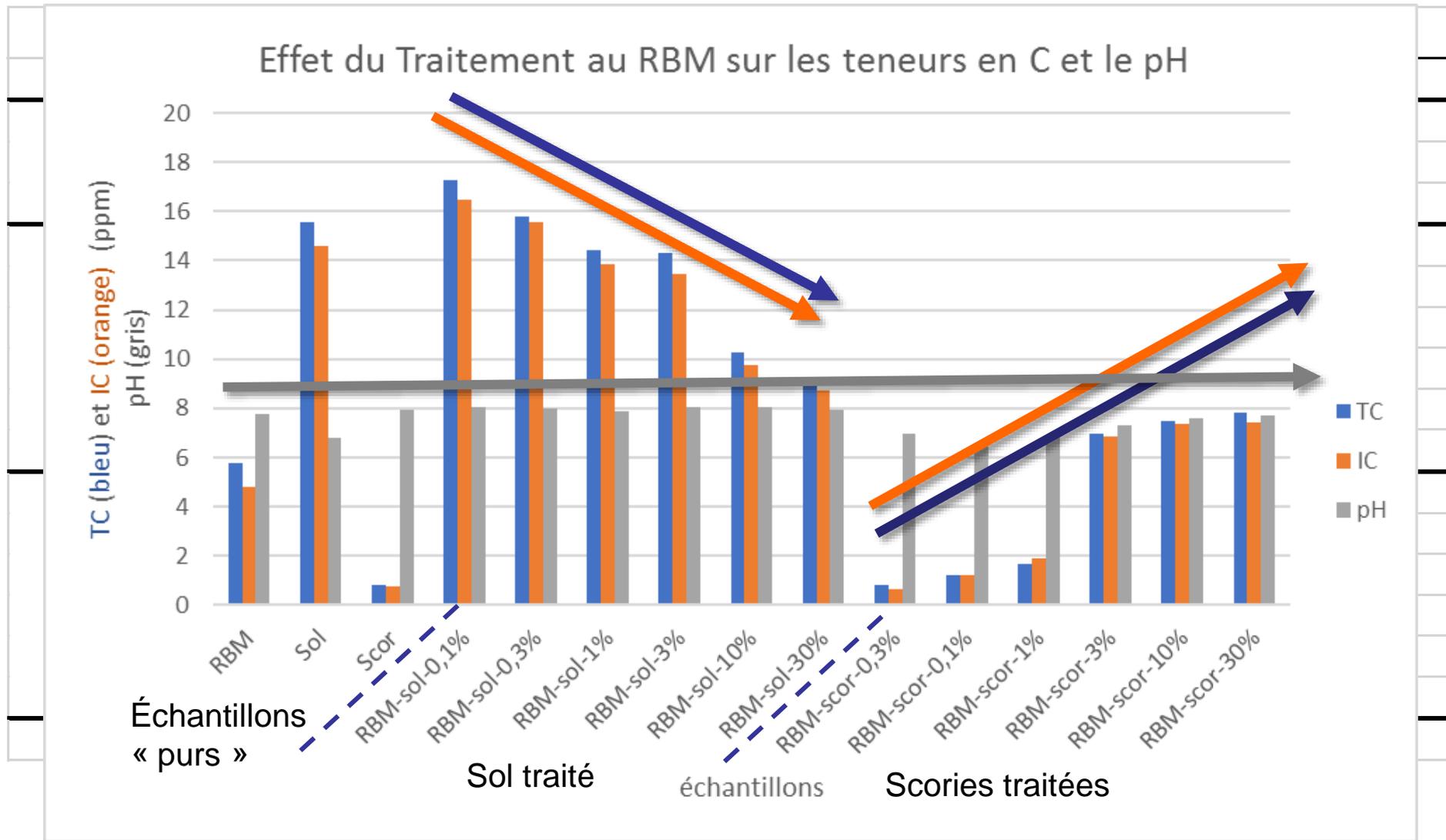
↓  
TOC-mètre:  
COT, CI

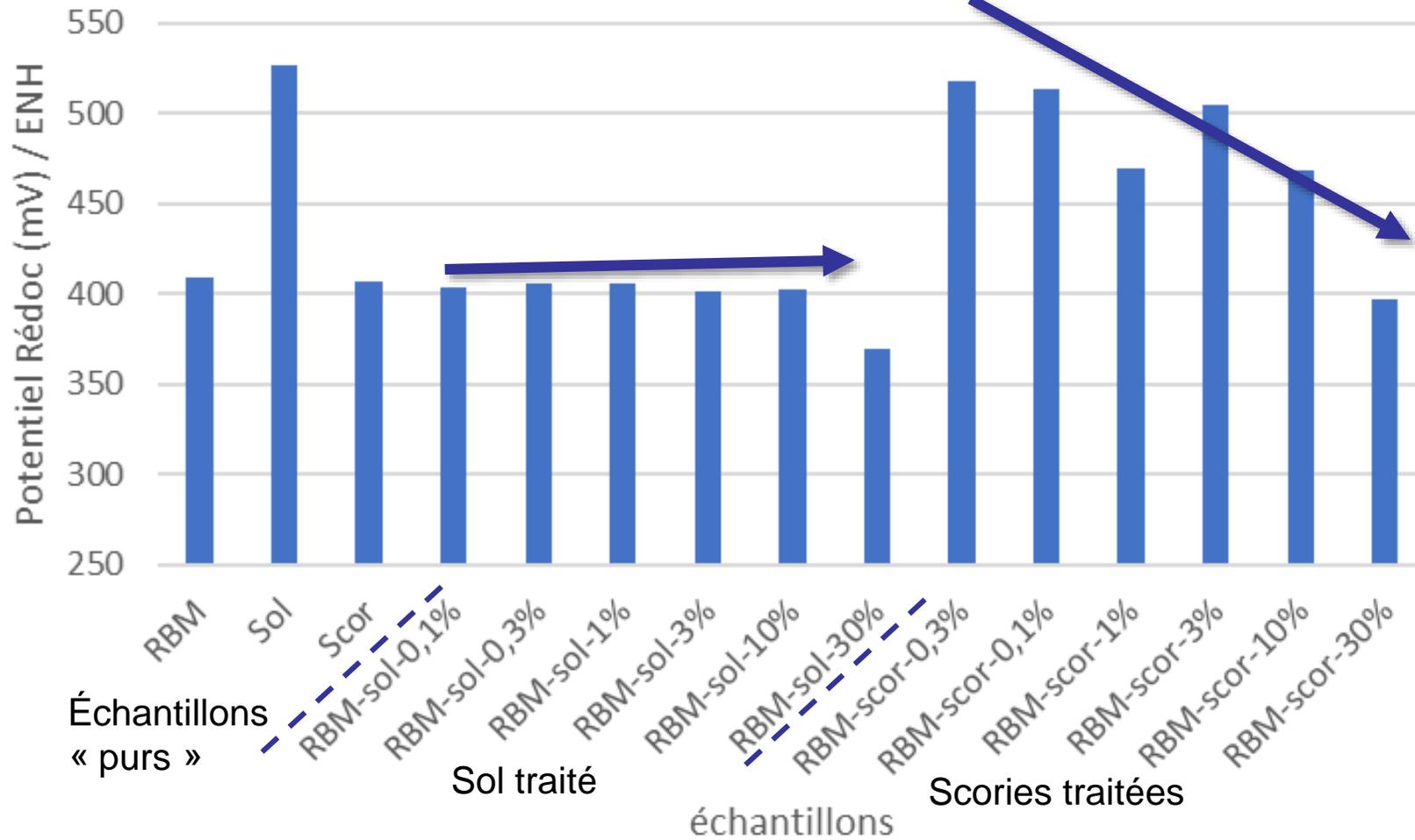
↓  
ICP/AES:  
métaux/métalloïdes

↓  
Tests écotox+ions

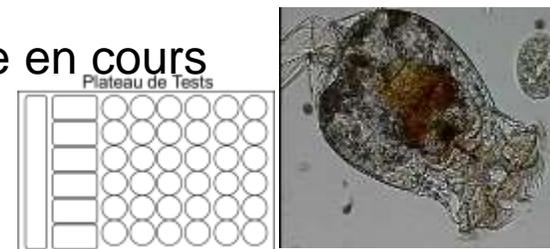
↓  
Sur le solide: analyses au CHNS:  
COT, Soufre, Azote

# Résultats préliminaires



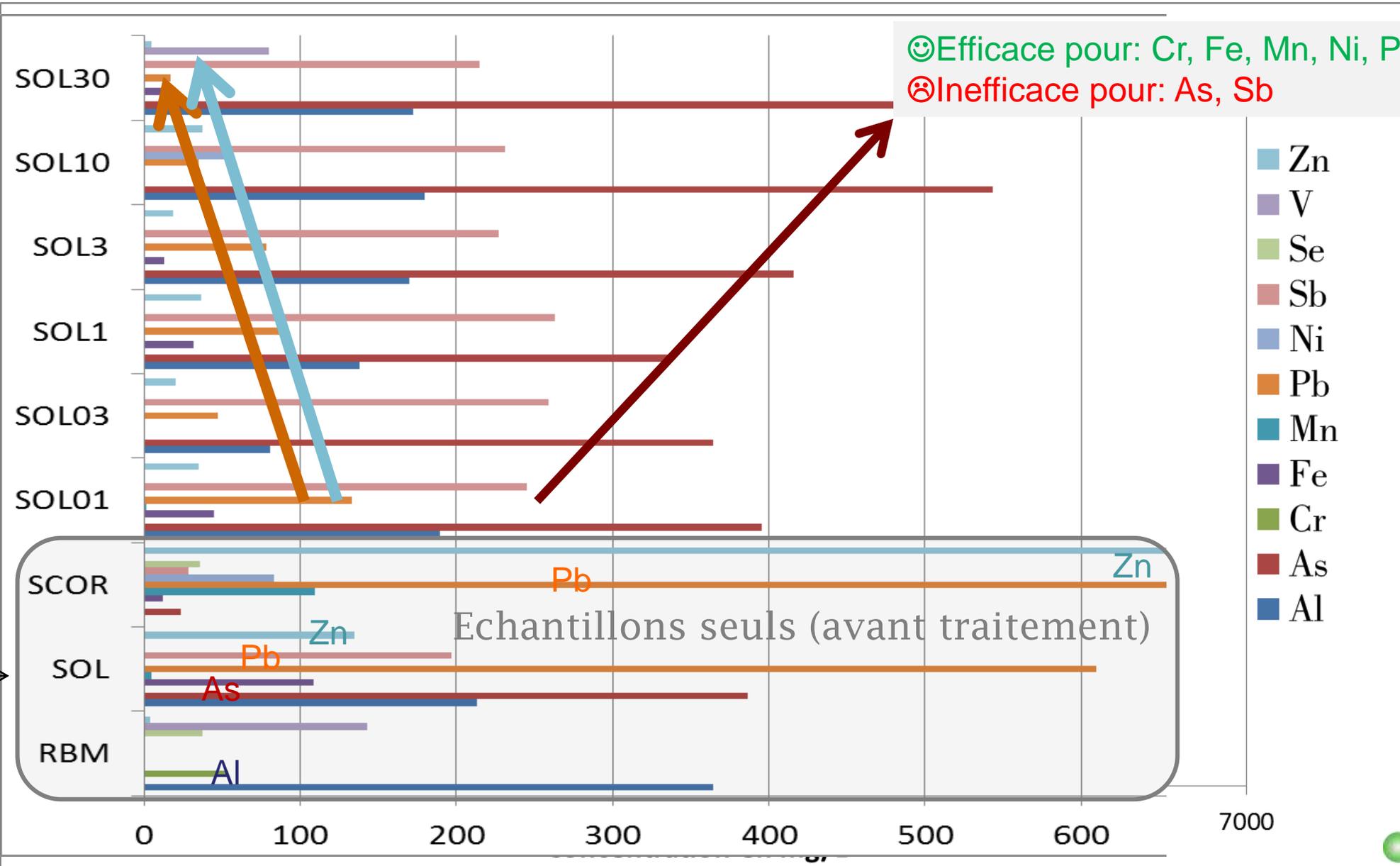


Dosage des **anions et cations** par chromatographie ionique en cours  
 Analyses **CHNS des solides**! Échantillons prêts à l'analyse  
**Tests écotox**: en cours : phase d'éclosion.

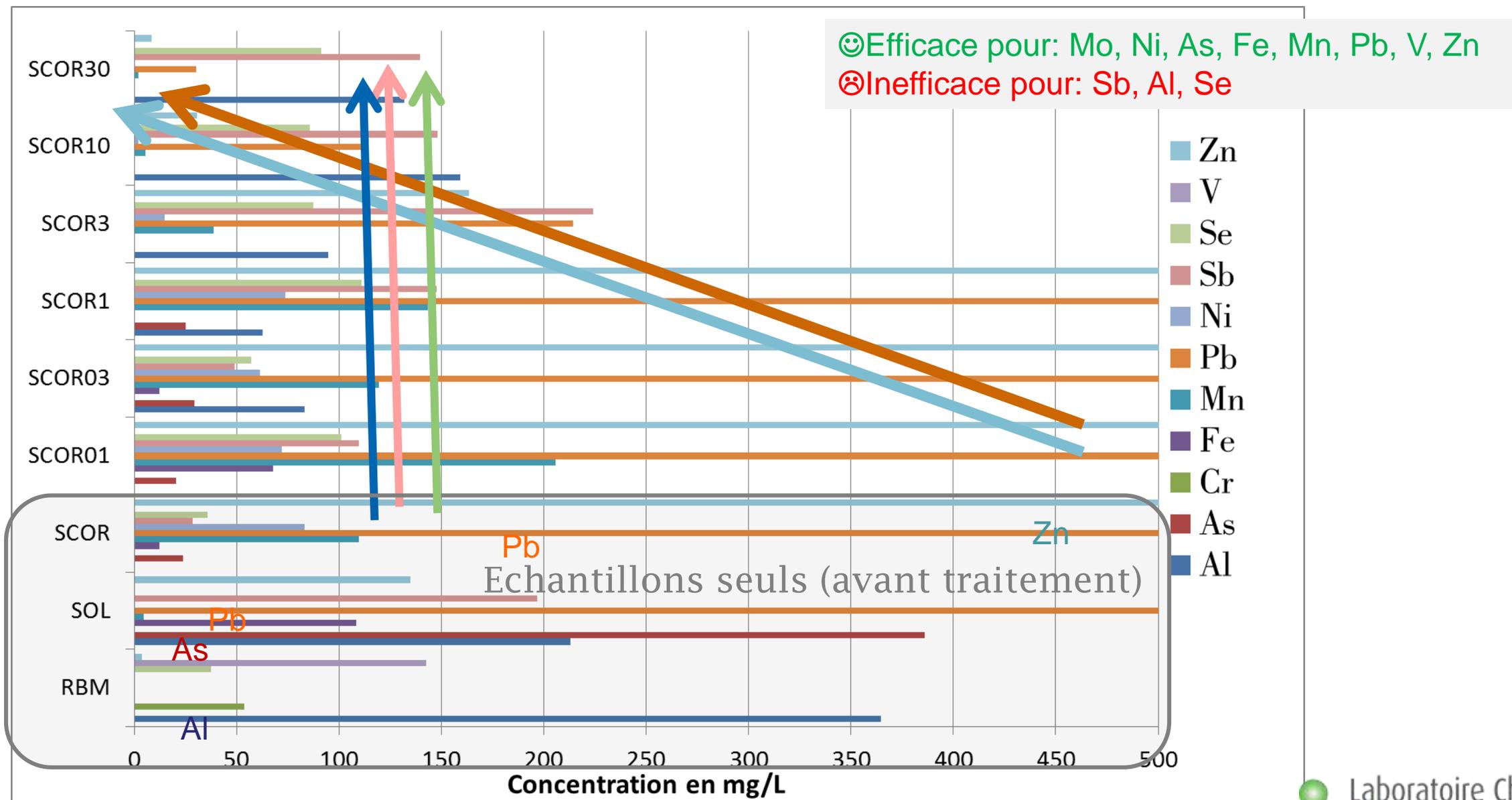


# SOL Escalette: Effet du RBM sur la libération des métaux/métalloïdes

☺ Efficace pour: Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Se, V, Zn  
 ☹ Inefficace pour: As, Sb



# SCORIES Escalette: Effet du RBM sur la libération des métaux/métalloïdes

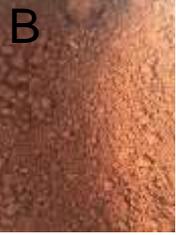


## 2-B- CAPACITÉS DE CROISSANCE D'ESPÈCES VÉGÉTALES SUR DES SUBSTRATS POLLUÉS +/- STABILISÉS PAR LE RBM



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

- Pots de 2L
- Conditions :
  - Référence : sol Ardevie (A) +1% compost
  - 100% RBM (B) + 1% compost
  - 70% Scories Escalette broyées (C) + 30%RBM + 1% compost
  - 90% Scories Escalette broyées + 10%RBM + 1% compost
- Espèce végétale sélectionnée : *Dactylis glomerata* (cultivar vs semences sauvages)
- Expérimentation en cours de réalisation



### Mesures programmées :

- Caractérisation des métaux et métalloïdes dans les substrats (pseudo-totaux et mobilisables)
- Biométrie (croissance végétale)
- Suivi non-destructif de phytométabolites liés à la tolérance aux métaux et métalloïdes
- Dosage final des métaux et métalloïdes dans les parties racinaires et aériennes des plantes



- 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

## 2-c- Du résidu de bauxite au sol

1. Lavage de la boue rouge en filtre presse → **Bauxaline®**

2. Gestion du pH par l'addition de calcium soluble (gypse,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et le  $\text{CO}_2$  atmosphérique : de pH 10.5 à pH 8.5

→ **Résidu de Bauxite Modifié (RBM)**

3. Gestion de la salinité  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  par drainage actif ou passif (pluies) < 4 mS/cm

→ **Résidu de Bauxite Modifié dessalé (RBM dessalé)**

4. Gestion du statut nutritif et biologique par ajout de 1% de compost de déchets verts et de l'engrais NPK à dose agronomique

→ **Sol synthétique**

### 5. Végétalisation avec des espèces communes ou spécifiques

A trois mois, les traits microbiens (Vitesse de croissance maximale, Respiration microbienne induite (OxiTop®), Profils physiologiques des communautés microbiennes (Biolog®), Activités enzymatiques de ce nouveau sol ont la même intensité qu'un sol témoin (Projet OHM DORIS, Camille Fourier, Mathieu Luglia, Steven Criquet).

→ **Néo-Sol (Anthroposol)**

BR Vitrolles: stabilisation progressive de la structure par le système racinaire.

# 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:**

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**.

## **RESTE À FAIRE:**

Finalisation des tests d'écotoxicité dans 3 semaines,

Modélisation Orchestra pour la spéciation des éléments chimiques: fin dans 1 mois.

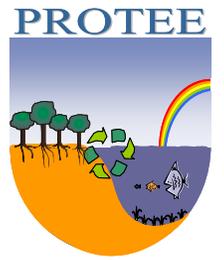
Suivi de croissance et analyses chimiques sur les essais avec plantes en serre.

Tests de stabilité des mélanges sol+RBM



MERCI DE VOTRE  
ATTENTION

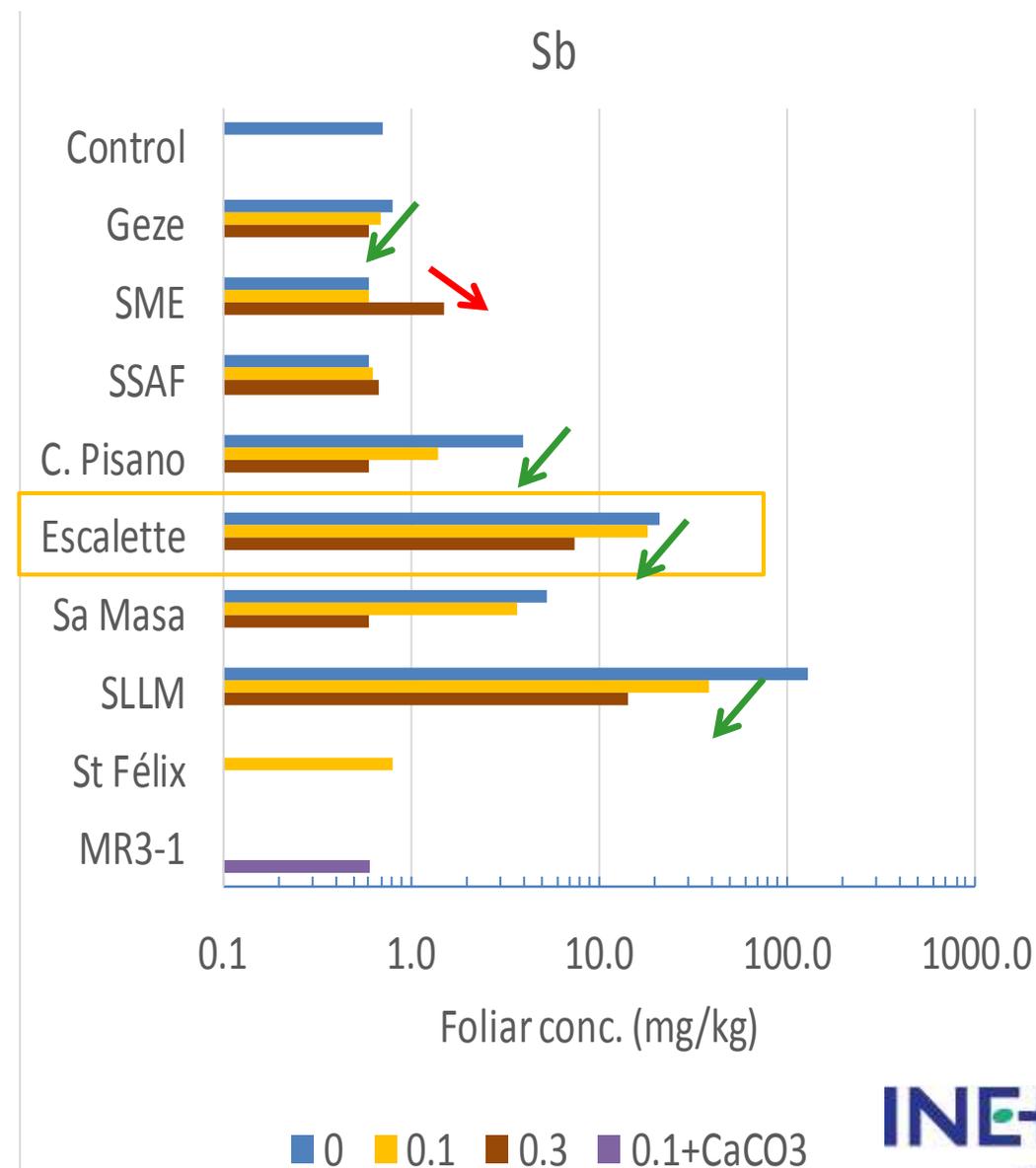
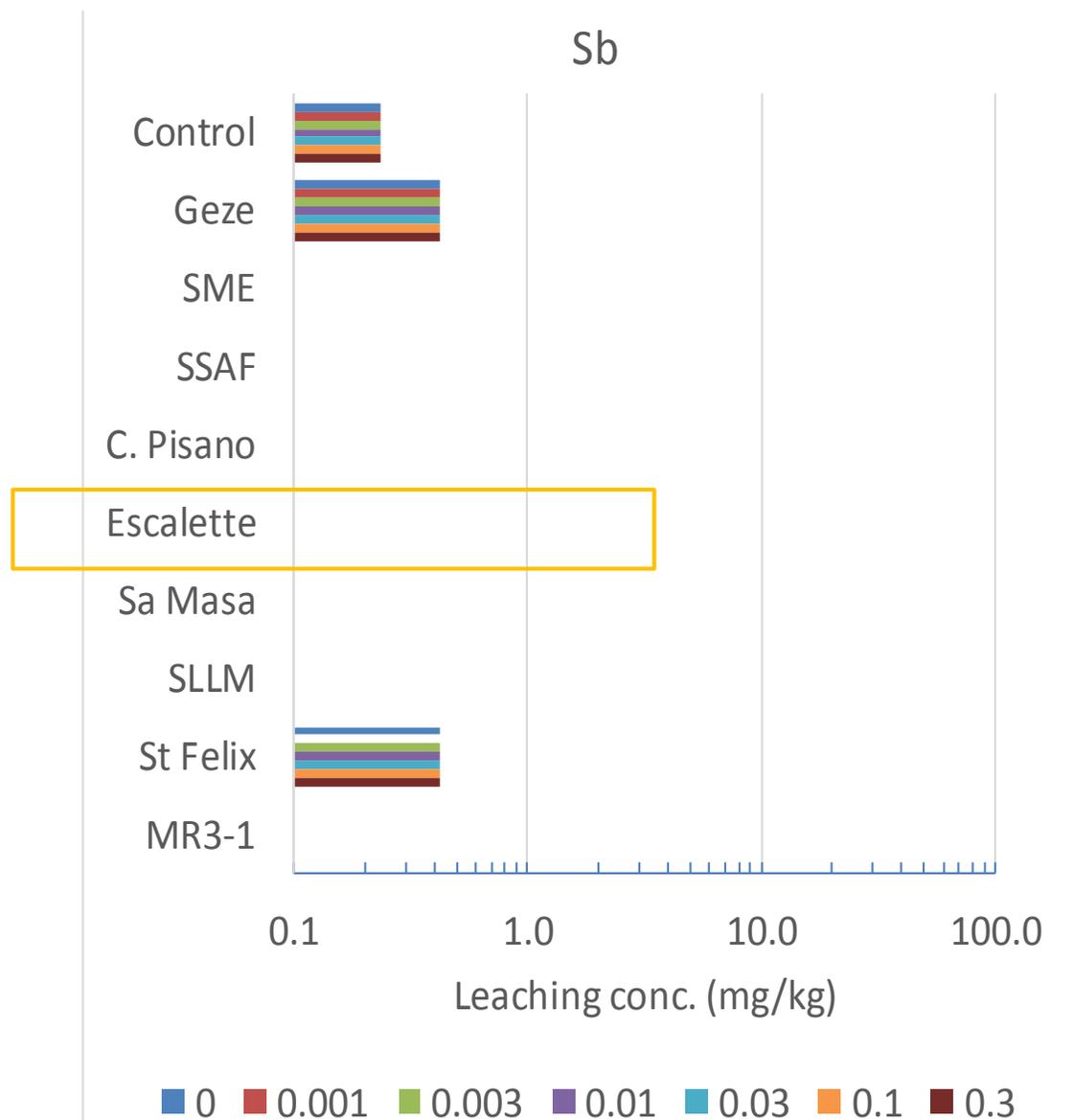




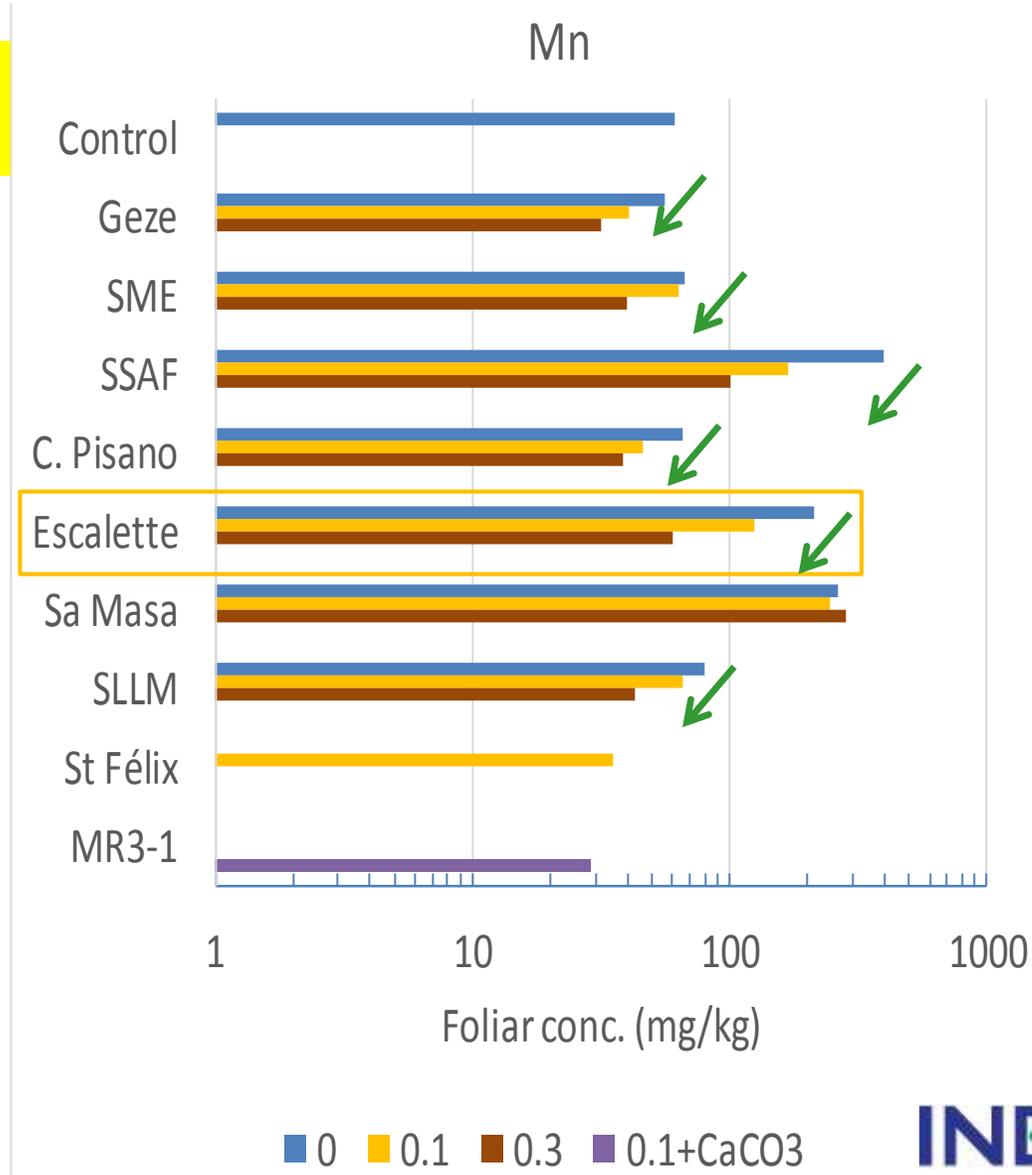
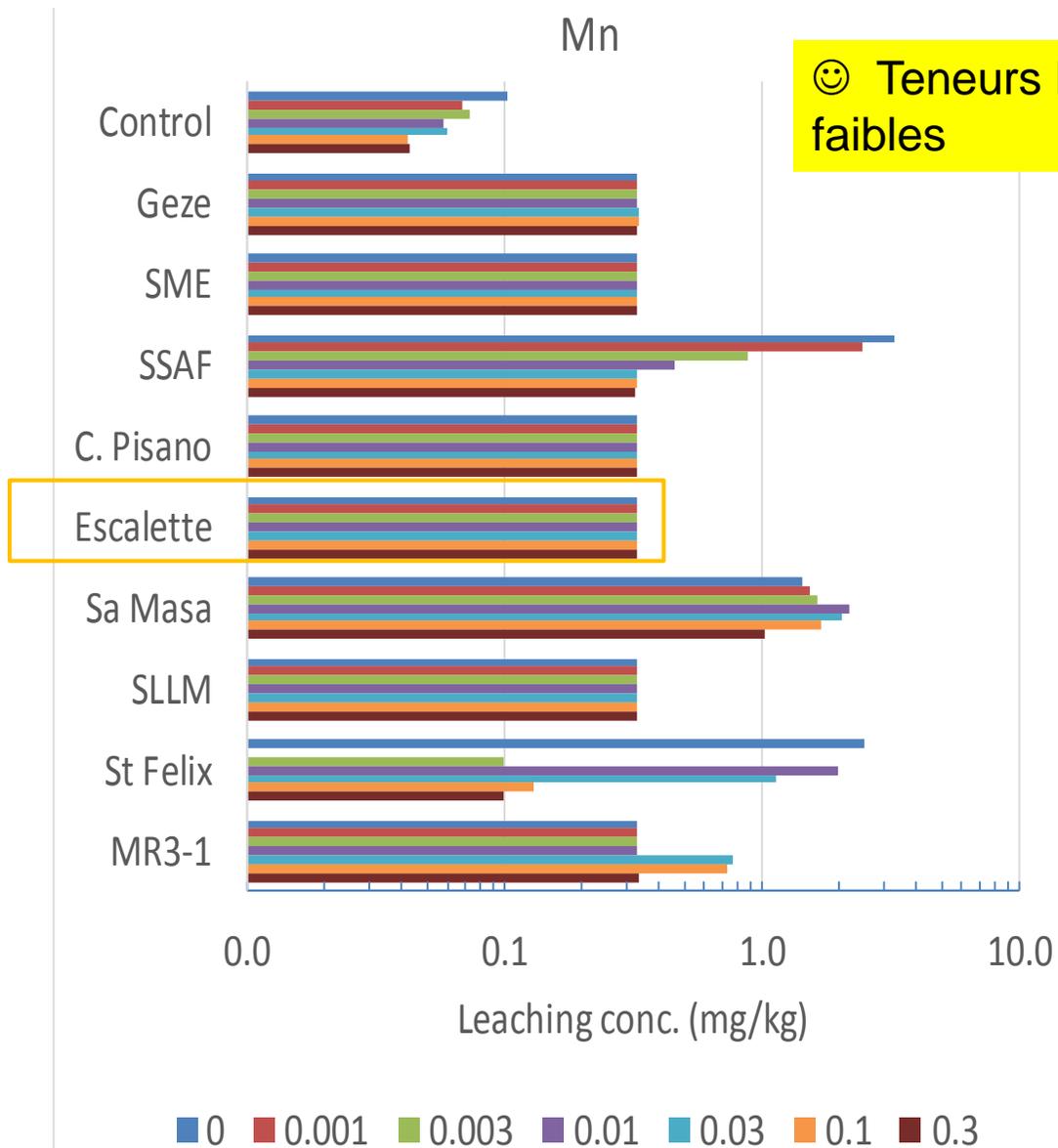
## Lixiviation à l'eau et pH non imposé.

conc.en µg / L	RBM	SOL	SCOR	SOL 0,1%	SOL 0,3%	SOL 1%	SOL 3%	SOL 10%	SOL 30%	SCOR 0,1%	SCOR 0,3%	SCOR 1%	SCOR 3%	SCOR 10%	SCOR 30%
<b>Al</b>	364,77	213,12	< LD	189,68	80,94	137,77	169,96	179,85	172,26	< LD	83,04	62,82	94,60	159,42	132,03
<b>As</b>	< LD	386,10	23,89	395,59	364,01	336,00	416,07	543,46	554,90	20,53	29,47	25,00	< LD	< LD	< LD
<b>Cd</b>	< LD	2,34	1,22	1,61	0,69	1,02	0,85	1,13	1,32	0,32	0,47	0,56	< LD	< LD	< LD
<b>Cr</b>	53,92	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
<b>Cu</b>	< LD	< LD	9,13	< LD	< LD	< LD	< LD	47,44	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
<b>Fe</b>	< LD	108,37	12,33	45,22	< LD	31,73	12,94	< LD	13,70	67,73	12,42	< LD	< LD	< LD	< LD
<b>Mn</b>	< LD	4,59	109,54	1,31	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	205,72	119,40	143,23	38,66	5,64	1,94
<b>Mo</b>	19,28	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	2,12	3,36	7,55	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	2,30
<b>Ni</b>	< LD	< LD	83,20	< LD	< LD	< LD	< LD	51,96	< LD	72,13	61,44	73,99	14,92	1,95	< LD
<b>Pb</b>	< LD	609,75	2510,95	133,39	47,03	89,11	78,14	34,83	17,24	1221,46	2395,08	939,15	214,47	114,46	30,40
<b>Sb</b>	< LD	196,74	28,62	244,88	258,81	263,07	227,12	231,16	214,63	109,53	49,12	147,57	224,32	148,21	139,66
<b>Se</b>	37,39	< LD	35,94	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	101,13	57,11	110,94	87,55	85,87	91,24
<b>V</b>	142,65	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	80,14	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
<b>Zn</b>	3,86	134,74	6074,22	35,02	20,48	36,95	18,68	37,42	4,68	2727,10	3763,58	2072,27	163,42	30,77	8,30

# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : Sb

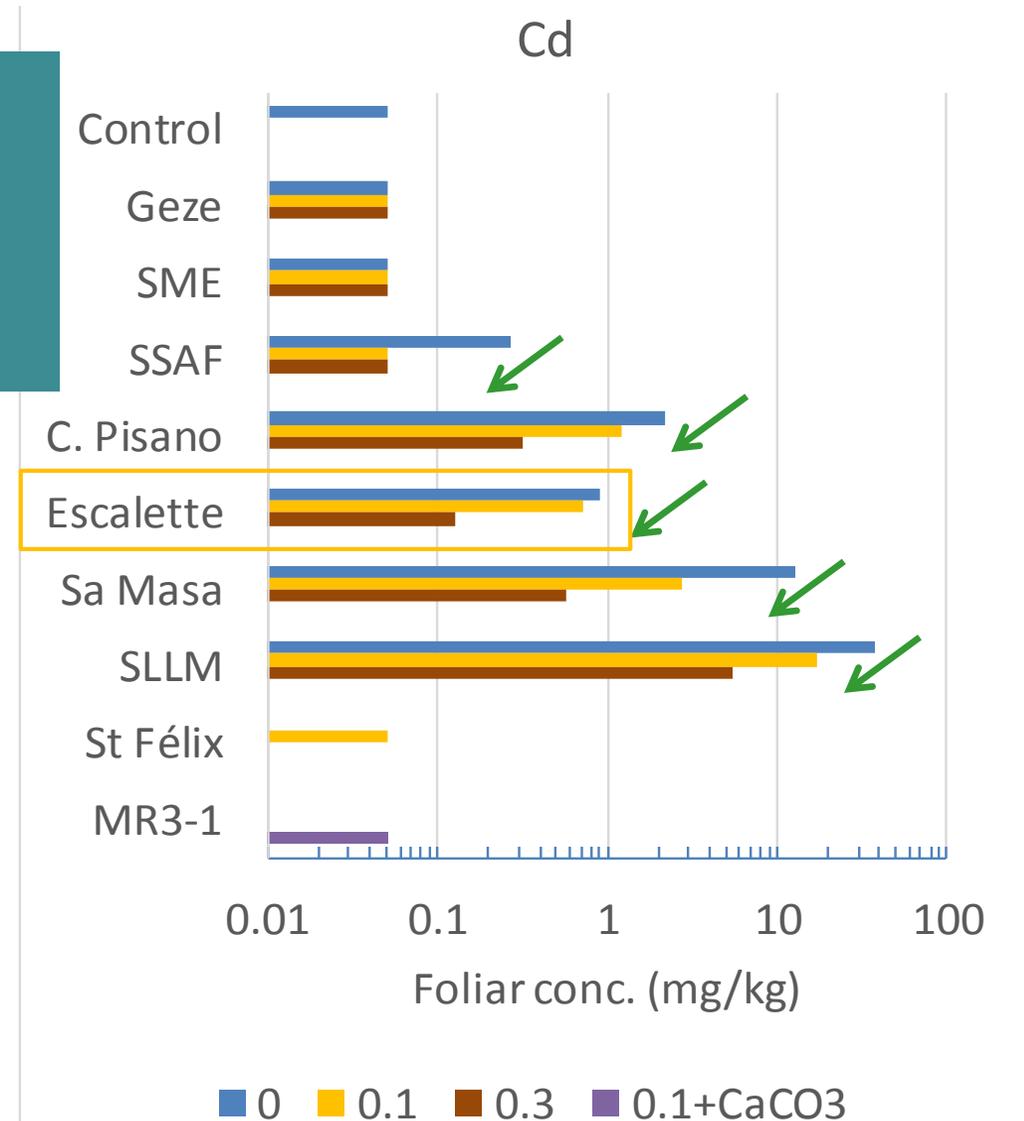
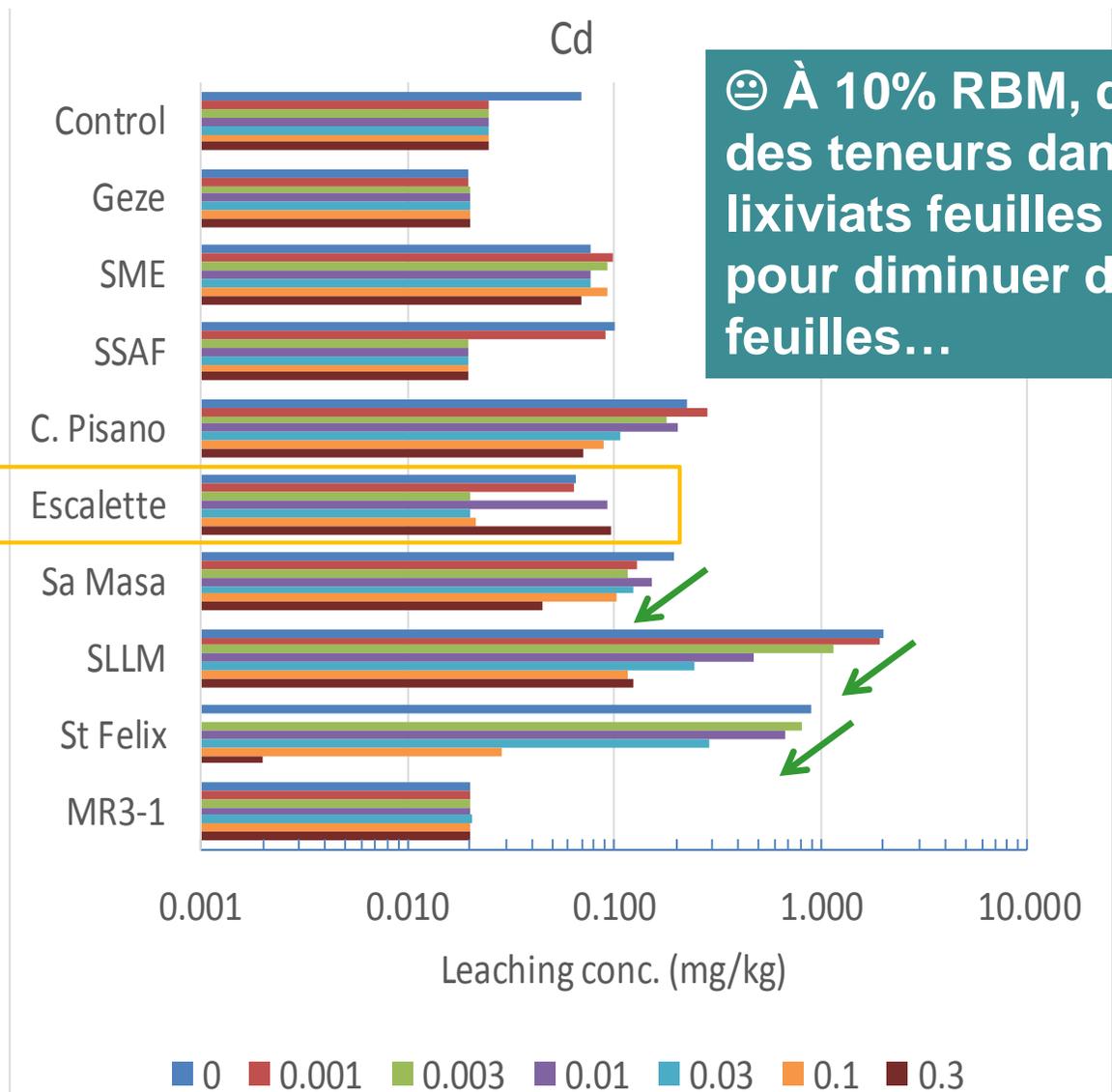


# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : Mn

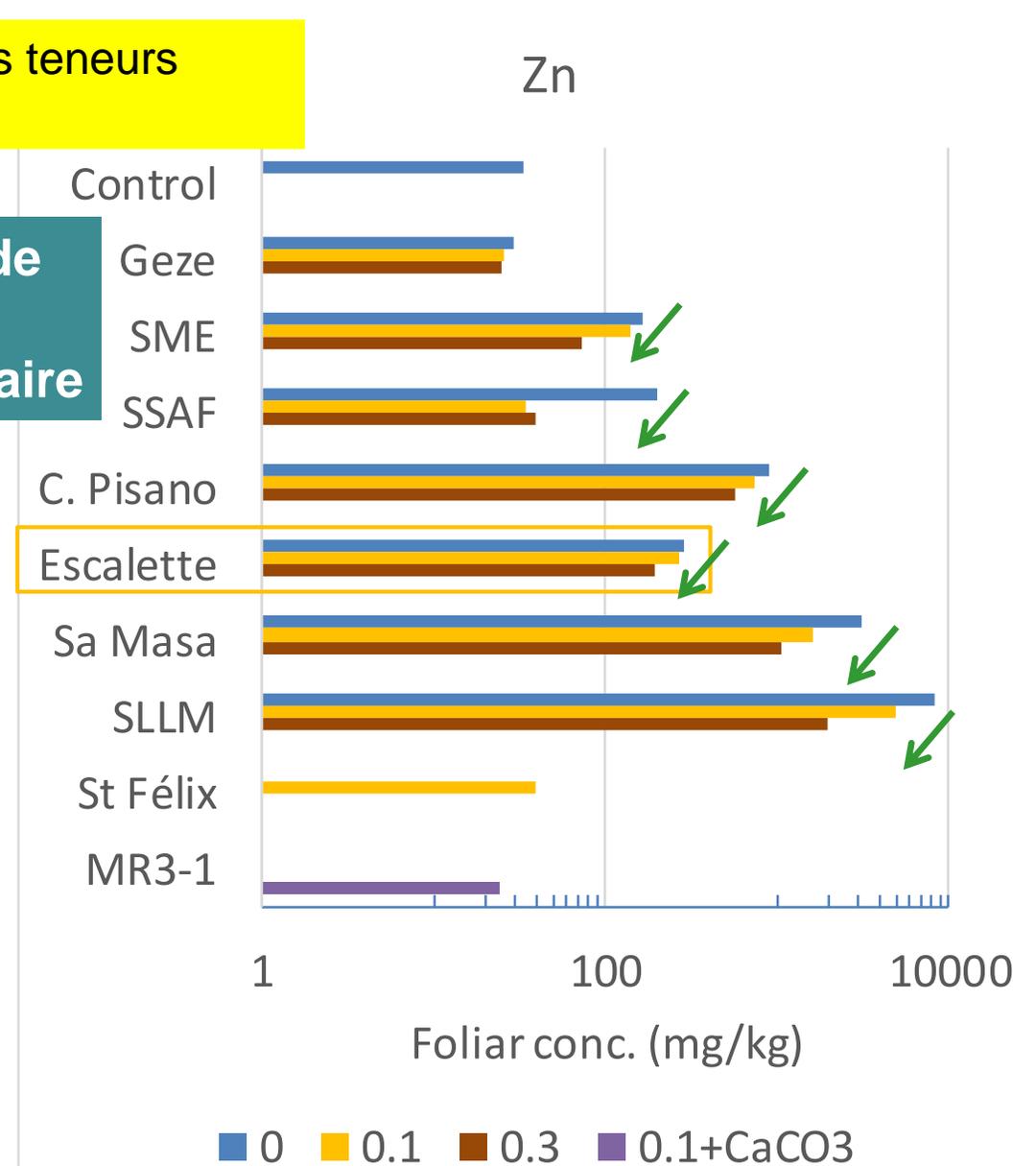
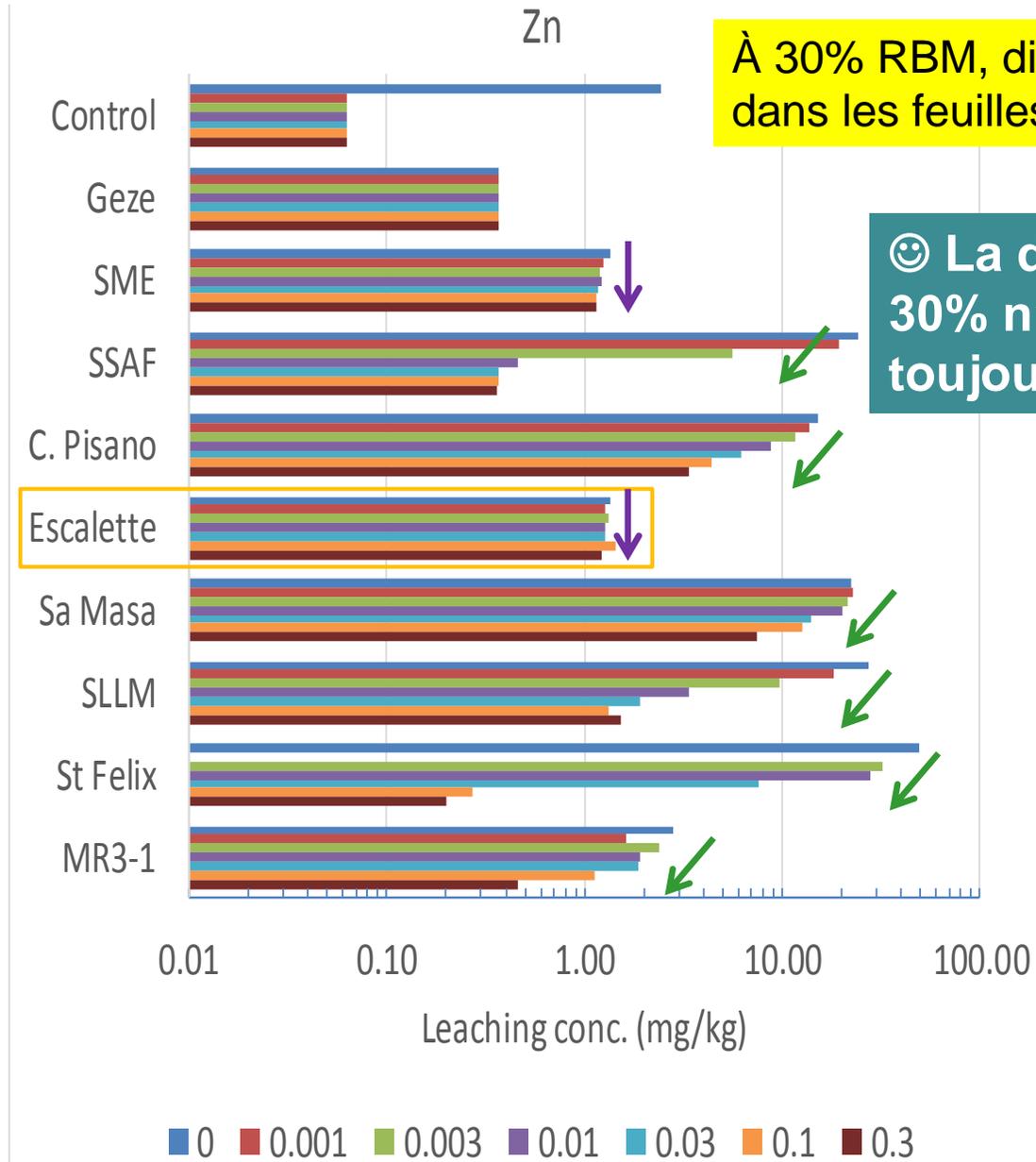


# RÉSULTATS

## CONCENTRATIONS LIXIVIBLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : Cd

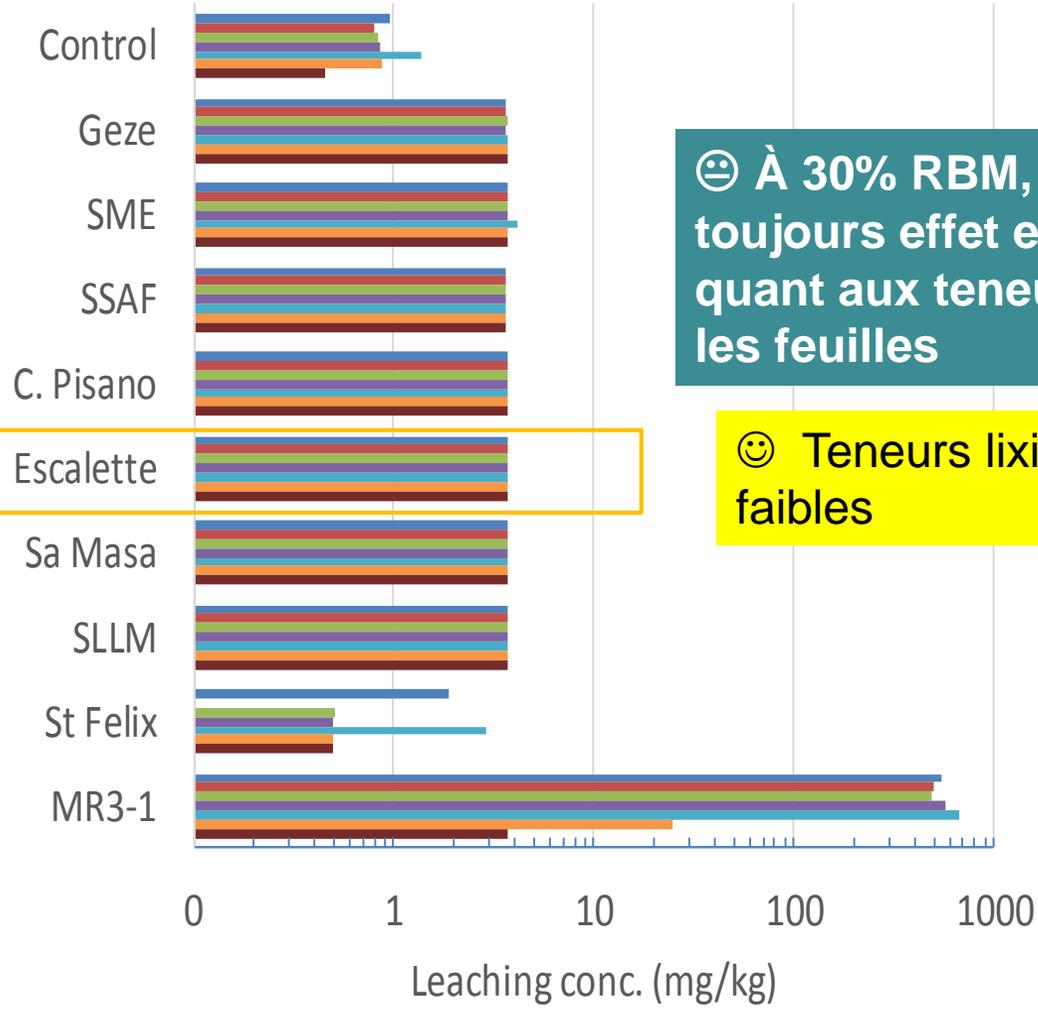


# CONCENTRATIONS LIXIVIABLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : ZN



# CONCENTRATIONS LIXIVIBLES / CONCENTRATIONS FOLIAIRES : Al

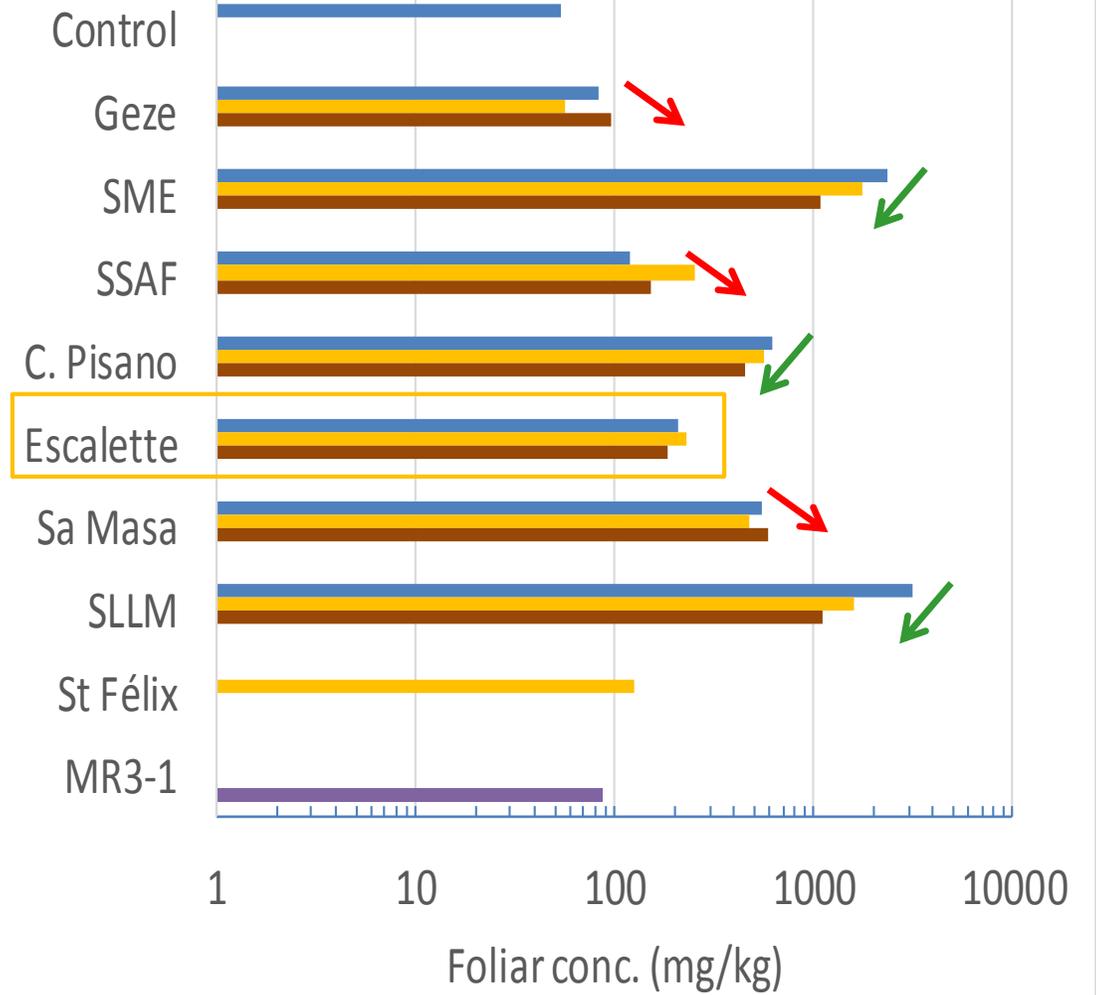
Al



☹️ À 30% RBM, pas toujours effet escompté quant aux teneurs dans les feuilles

☺️ Teneurs lixiviables faibles

Al



# RÉSULTATS: VÉGÉTALISATION DE LA BAUXALINE® (LYSIMÈTRE 700 L)

*Dactylis glomerata*,  
*Onobrychis sativa*,  
± 100 jours



# RÉSULTATS: VÉGÉTALISATION DE LA BOUE ROUGE DE VITROLLES (LYSIMÈTRE 50 L)

*Dactylis glomerata*,  
100 jours

