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).

Partenaires impliqués : PROTEE (UTLN), ESPACE (AMU), LCE (AMU), IMBE (AMU), INERIS

MERDY Patricia, CEREGE (ex-PROTEE, UTLN), merdy@univ-tln.fr : porteur du projet
LUCAS Yves, CEREGE (ex-PROTEE, UTLN), lucas@univ-tln.fr
BERTOLDO Raquel, ESPACE (AMU), raquel.BOHN-BERTOLDO@univ-amu.fr
PRUDENT Pascale, LCE (AMU), pascale.prudent@univ-amu.fr
LAFFONT-SCHWOB Isabelle, IMBE (AMU), isabelle.laffont-schwob@imbe.fr
HENNEBERT Pierre, INERIS (Aix-En-Provence), Pierre.Hennebert@ineris.fr

Principaux résultats :

Résumé :
Le présent projet propose de rechercher une procédure d'inertage des résidus de bauxite pour produire un résidu de bauxite modifié (RBM) à faible phytotoxicité et qui soit valorisable dans le traitement in-situ d'anciens sites industriels contaminés et dans le traitement ex-situ d'autres déchets ultimes tels que les scories du site de l'Escalette. Le projet vise donc à traiter un sol contaminé et des scories par le RBM et à identifier l'efficacité et les risques d'un tel traitement par (i) la compréhension des mécanismes physico-chimiques régissant la mobilité des contaminants et (ii) l'évaluation de la phytotoxicité du RBM après traitement des matériaux contaminés par des tests de croissance de plantes et analyses des éléments chimiques accumulés.

Par ailleurs, la présence de l'entreprise Altéo, à cause de sa forte production de déchets, peut engendrer des perceptions négatives de son activité industrielle. La réutilisation des boues rouges pour réhabiliter des sites contaminés pourrait alors être localement perçue soit comme une double solution, soit, compte tenu de l'attachement local - entre autres dynamiques représentationnelles – comme l'addition d'un deuxième problème à un environnement déjà pollué. La mise en œuvre d'un tel dispositif d'inertage pourrait ainsi être freinée par la résistance des communautés locales ou de professionnels de l'environnement sur la base de leur attribution de risques à ces dispositifs. Il s'agit donc d'identifier les perception locales à ce projet d'inertage par le RBM.

Objectif du projet et mise en contexte :

Les "boues rouges" sont des déchets obtenus à l'issue de la production d'alumine à partir de bauxite. Dans le cadre du respect de la convention de Barcelone pour la protection de la mer Méditerranée, et en accord avec l'arrêté préfectoral du 1er juillet 1996, les quantités de boues rouges rejetées en mer au large de Cassis ont été progressivement réduits depuis 1990 et ont pris fin le 31 décembre 2015, seul le résidu liquide étant à présent évacué en mer. Alteo a choisi de mettre en oeuvre une filtration par filtres presse des boues rouges produites, produisant ainsi 300.000 t/an des déchets solides de résidus de bauxite (Bauxaline®), qui sont stockés sur le site de Mange-Garri. Pour s'inscrire dans la politique européenne de développement durable, les quantités produites par Altéo sont telles que des solutions doivent être apportées pour réduire ces stocks. Les résidus de bauxite présentent en effet un risque environnemental par leurs teneurs élevées en métaux et métalloïdes, en particulier Al, Fe, Ti,

Zn et As, ainsi que par leur pH très basique. Un simple stockage à l'air libre de ces déchets comporte donc des risques élevés de dissémination de contaminants par le vent (poussières), par le ruissellement lié aux pluies et par la percolation vers les nappes phréatiques de solutions riches en métaux.

Le projet a deux objectifs principaux: la diminution par recyclage des stocks de boues rouges et la stabilisation à long terme, in-situ ou ex-situ, par du résidu de bauxite modifié, des contaminants dans des sols et matériaux d'anciens sites industriels.
La réussite globale du projet passe par les sous-objectifs suivants :

(1) Etablir par ajustement les formulations chimiques du RBM qui permettent une stabilisation pérenne des contaminants du résidu de bauxite, et ce par des choix les plus écologiques possibles. L'objectif sera de garantir l'immobilisation des contaminants potentiels métaux et métalloïdes dans le résidu solide, afin de minimiser tout transfert vers la nappe phréatique ou vers les plantes.

(2) Evaluer la stabilité des sols traités in-situ et matériaux traités ex-situ par le RBM. L'objectif sera ici de garantir l'immobilisation à long terme des contaminants potentiels métaux et métalloïdes dans le mélange RBM – matériau contaminé. Plus particulièrement, les scories et sols contaminés provenant du site de l'Escalette seront traités en laboratoire avec une formulation à base de RBM qui devra être développée pour atteindre l'innocuité totale des échantillons finaux et permettre la pousse de plantes.

(3) Identifier les espèces végétales qui seront capables de s'installer d'une part sur le RBM brut, d'autre part sur des matériaux contaminés traités par ajout de RBM, et ceci à long terme. Deux variétés d'intérêt agronomique (une poacée, le dactyle pelotonné (*Dactylis glomerata Cultivar Niva*), et une fabacée, le sainfoin cultivé (*Onobrychis sativa Cultivar Zeus*)) ont été choisies pour ces tests et seront comparées à des plantes sauvages (*Dactylis glomerata*, Poacées et *Coronilla juncea*, Fabacées, issus de semences locales). L'objectif est in fine de revégétaliser avec des espèces du fond floristique local pour éviter l'appauvrissement génétique des sites réhabilités.

(4) S'agissant de la perception des risques par les communautés locales et les professionnels de l'environnement, la recherche proposée ici a pour objectif de mieux comprendre les enjeux et dynamiques psychosociales locales. Elle s'appuiera sur un questionnaire en ligne diffusé sur internet à des groupes sociaux concernés: participants locaux tout venants, associations et parties prenantes locales – identifiés avec le support de l'équipe du projet. Il s'agira d'explorer, à partir de cette enquête en ligne, les enjeux existant dans la région ainsi que les variables susceptibles d'amplifier ou de modérer les risques associés à l'utilisation des propriétés chimiques d'un déchet industriel pour traiter des sols pollués (proximité des sites ; connaissances/croyances sur la situation actuelle du site; attachement au lieu; visions du monde;
échelle NEP « Nouveau Paradigme Écologique »; confiance dans les institutions).

Méthodologies :

(1) Dans le cadre du premier objectif, le résultat attendu est une formulation qui permettra au résidu de bauxite modifié (RBM) d'avoir à la fois une structure stable (le résidu de bauxite brut n'a pas de structure correctement agrégée) et une efficacité à très long terme de la stabilisation des contaminants. L'application de RBM pourra être étendue à bien d'autres sites industriels français et européens si, à l'échelle pilote, nous réussissons à atteindre ces premiers objectifs.

(2) Dans le cadre du second objectif, le résultat attendu est l'identification (i) des processus d'immobilisation des métaux toxiques après traitement des sols et matériaux contaminés par les résidus de bauxite modifié (RBM) et (ii) le cas échéant, du potentiel de neutralisation de l'acidité des échantillons traités par ce RBM. Cette compréhension chimique des processus à l'échelle moléculaire permettra d'expliquer les résultats expérimentaux et surtout de prévoir à long terme le devenir des phases en présence: il y a-t-il des risques de libération ultérieure des contaminants à partir des phases qui les portent? Les résultats que nous attendons sont ici clairement identifiés: nature des complexes métalliques existant aux pH de l'étude réelle; stabilité de ces complexes; conséquences de l'activité biologique sur ces complexes métalliques, et inversement; ajustement de la formulation à apporter pour optimiser les performances du traitement au RBM.

(3) Dans le cadre du troisième objectif, il s'agit d'identifier les espèces végétales méditerranéennes de la flore locale capables de résister aux conditions bio-physico-chimiques créées par l'ajout de RBM (apport de salinité) à différents types de matériaux – résidus acides, scories et sols de type Escalette – auquel cas elles seront de bonnes candidates pour la revégétalisation de sites miniers ou métallurgiques en région PACA. Les résultats que nous attendons de ces tests sont les suivants: a) la Bauxaline® transformée en RBM peut se substituer à un sol pour des plantes naturelles et cultivées; b) la végétalisation du site de Mange-Garri est possible; c) le traitement des scories de l'Escalette par le RBM offre des perspectives de recyclage ex-situ du matériau. Accessoirement, une meilleure revégétalisation naturelle du site de l'Escalette après excavation des scories permettrait de limiter considérablement le lessivage de particules contaminées vers la mer. Par ailleurs, si la mise en décharge des scories est évitée par une revalorisation de ce déchet lorsqu'il est mis en contact avec le RBM, nous sommes dans une démarche souhaitable d'économie circulaire.

(4) Dans le cadre du quatrième objectif, le résultat attendu est une évaluation exploratoire des dynamiques psychosociales à la base de l'amplification ou de l'atténuation sociale de la perception des risques liées à l'utilisation des propriétés chimiques sur des sols pollués. A partir de l'analyse d'une série de variables déjà identifiés dans la littérature sur la perception des risques industriels par les communautés riveraines et les professionnels de l'environnement cette étude permettra (i) de mieux comprendre les enjeux psychosociaux locaux ; (ii) d'identifier celles les plus importantes à considérer dans la perception des risques associés à ce processus de neutralisation chimique (iii) de comprendre les attentes et freins des professionnels vis-à-vis d'une telle proposition.

Principaux résultats :

PARTIE SCIENTIFIQUE

Culture des plantes en pot, en lysimètre ou en parcelle.

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.

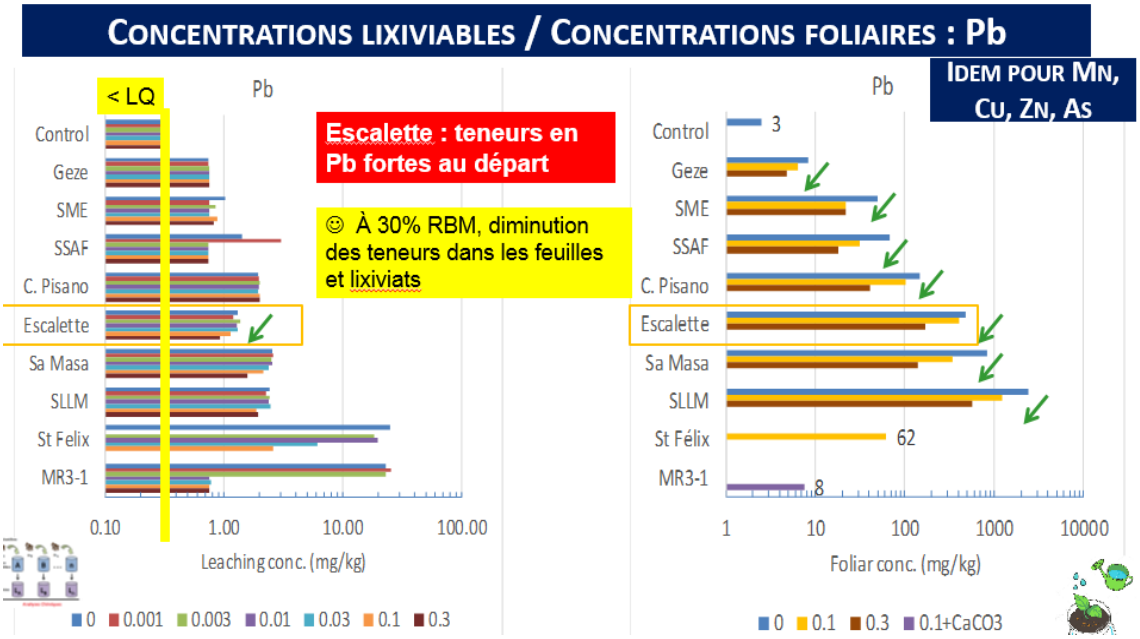
Dactylis glomerata a également été cultivé en **lysimètres** en plein air de 50 l avec les résidus miniers de St Félix et MR3-1, depuis 2014 et 2015, avec 1% de compost pour MR3-1, avec engrais NPK à dose agronomique, irrigation régulière et lixiviation libre. La croissance avec addition de RBM a été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

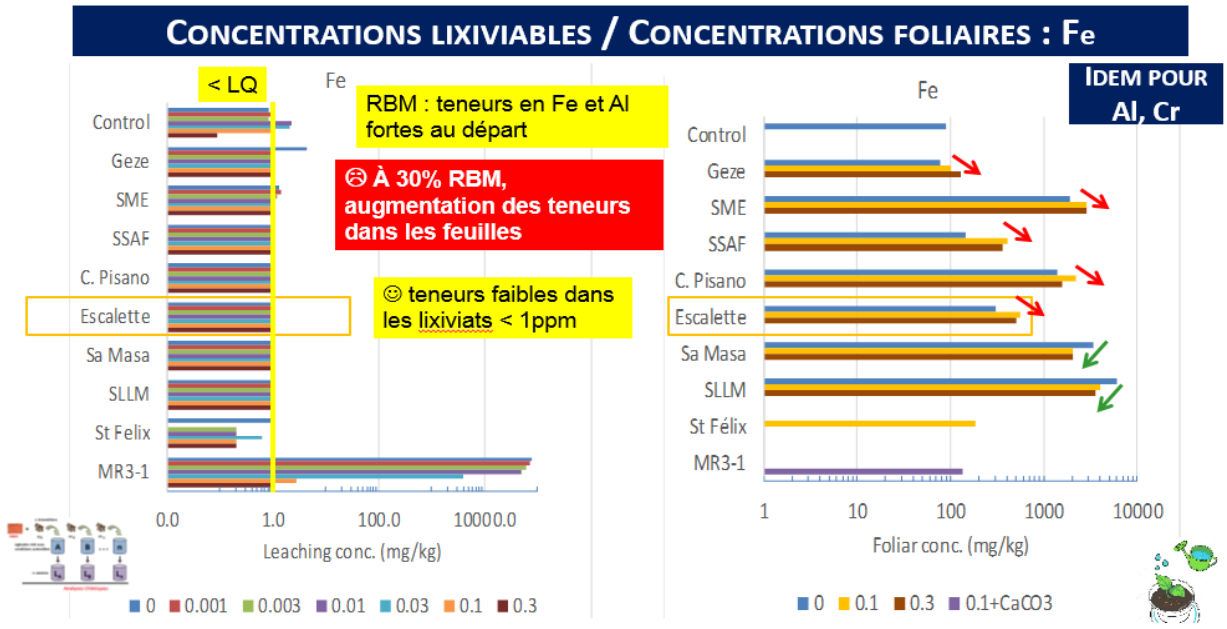




Concentrations lixiviables / Concentrations foliaires.

Les éléments métalliques et métalloïdes ont été recherchés dans les fractions lixiviées et dans les feuilles. Les résultats principaux sont résumés ci-dessous :



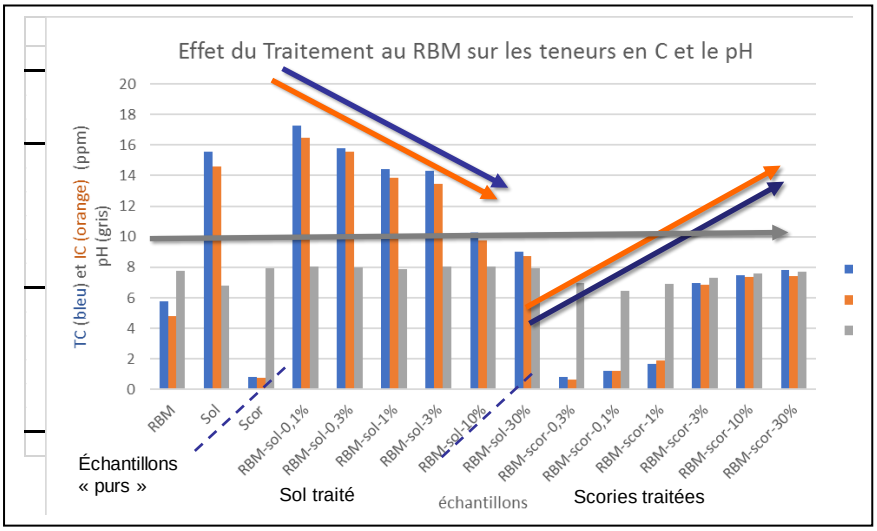


En conclusion de cette partie, on peut dire que l'addition de résidu de bauxite modifié (RBM) réduit la concentration lixiviable de tous les éléments, jusqu'à la concentration du sol témoin, ou jusqu'à la limite de quantification. Dans les pots, nous avons constaté la mort ou la

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.

Effets du Traitement au RBM sur les paramètres physico-chimiques.

L'ajout du RBM a permis d'accroitre les teneurs en carbonates et d'augmenter celles en carbone organique pour les échantillons de scories pauvres en carbone initialement. L'inverse a été observé pour le sol de l'Escalette déjà relativement riche en carbone. Les pH quant à eux sont restés stables, ne dépassant pas pH=8.

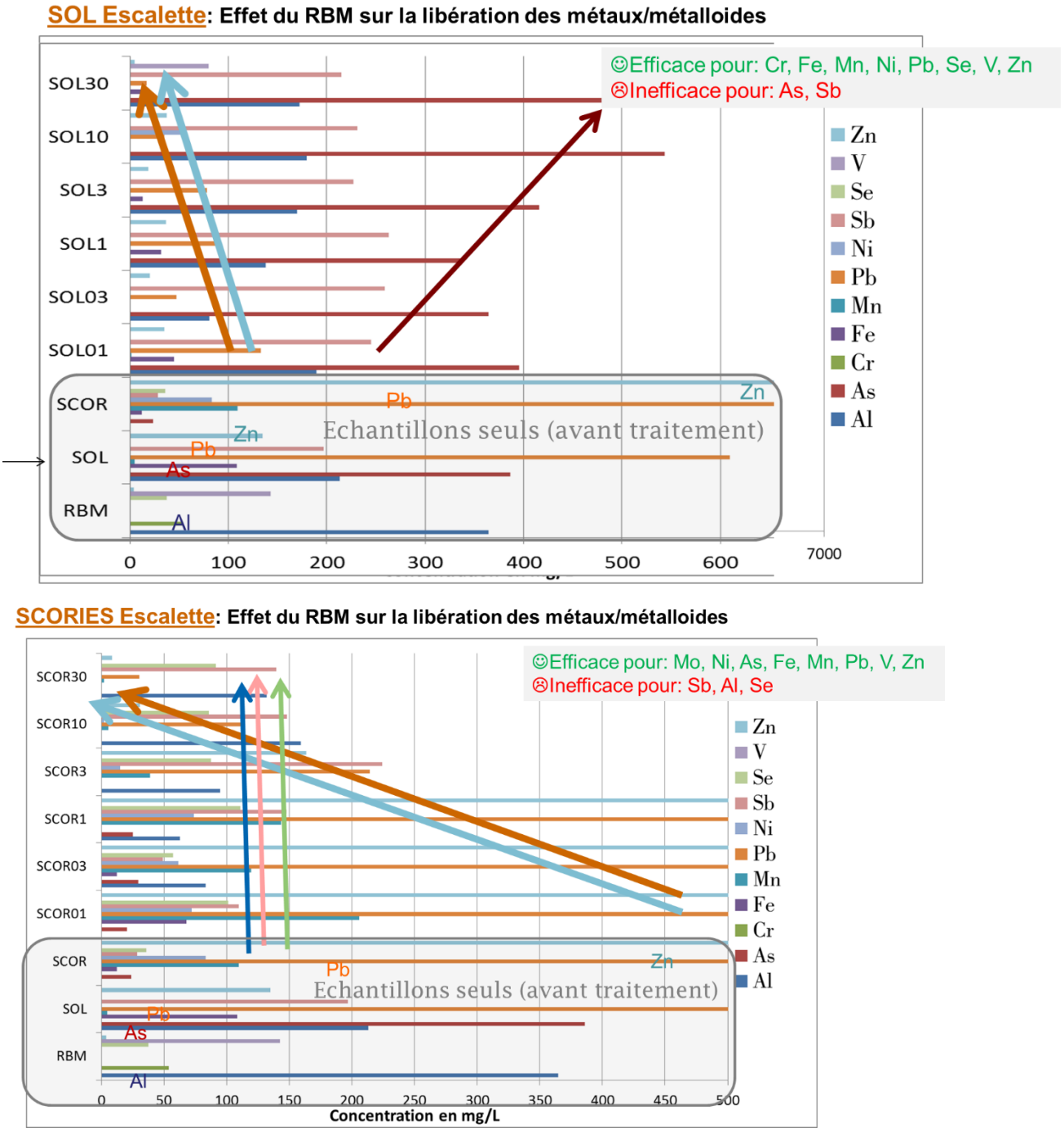


Les résultats obtenus sur les échantillons solides des teneurs en azote et carbone sont donnés ci-dessous :

	%N	%C
RBM	0,124	1,351
RBM	0,096	0,829
Scories	0,078	0,183
Scories	0,026	0,148
Scories	0,029	0,228
Sol Escalette	0,084	5,951
Sol Escalette	0,118	6,279
Sol Escalette	0,108	6,545

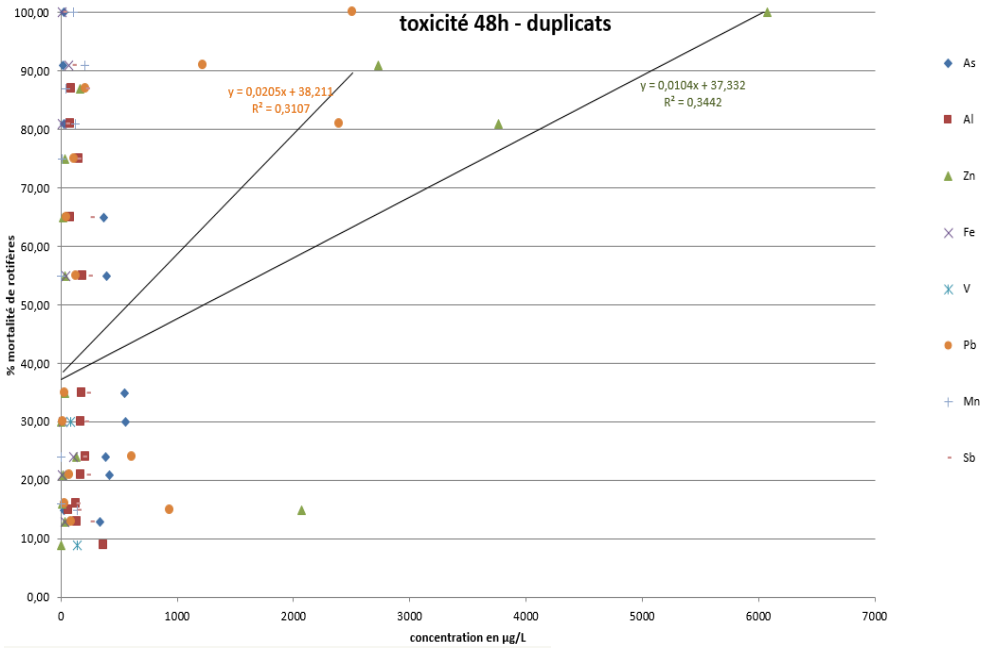
Tests de lixiviation en batch

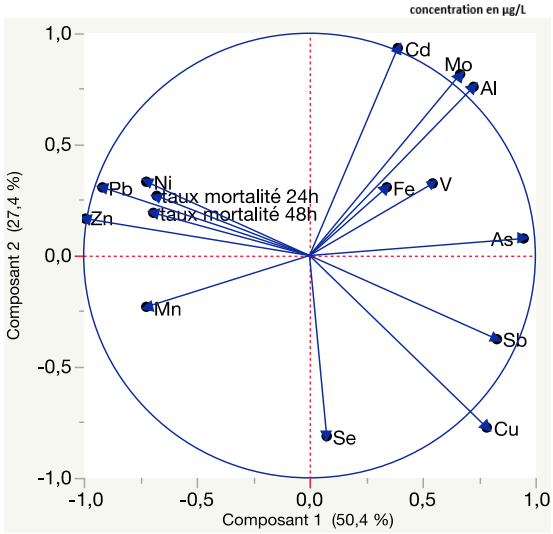
Des tests de lixiviation en batch ont permis d'évaluer les concentations en éléments métalliques libérées avant et après traitement au RBM. Quelques résultats sont décrits ci-dessous :



Tests écotoxicologiques.

Afin de tester l'effet dose-réponse du RBM sur des organismes vivants, nous avons réalisé des tests standards écotoxicologiques. Zn et Pb semblent être responsables à priori des taux de mortalité les plus élevées.





D'après le traitement des données écotoxicologiques, nous avons pu confirmer que Zn, Pb et Ni semblent être corrélés aux taux de mortalité contrairement au Sb et As.

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

Des essais en pots sous serre (5 réplicats par condition expérimentale) ont été réalisés dans des pots de 2L sous diverses 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.

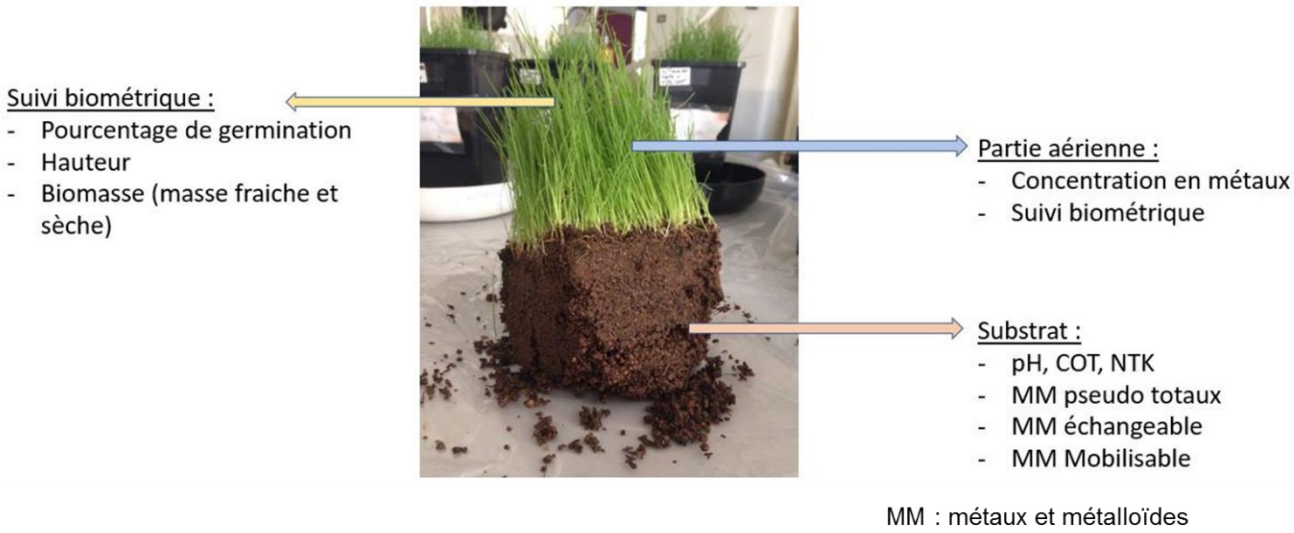
Des cultures sous serre ont été suivies pendant 26 jours. Il a été procédé à un ajout d'eau tous les 2 jours pour maintenir au niveau de capacité de rétention en eau chaque type de substrat



Les objectifs visés sont:

- 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**.**

Ci-dessous sont décrites les analyses qui ont été conduites après la croissance des pantes :



Les caractéristiques des substrats ont été mesurées :

	pH	NTK mgN/g (MS)	TC (COT en attente) %
99% Terre	7,9	4,5	12%
99% RBM	9,6	0,26	1,1%
30% Scories + 70% RBM	8,2	0,25	0,9%
99% Scories	6,7	0,20	< 0,2%

Les tests de croissance ont donné les résultats suivants selon les fractions considérées:

Fraction mobilisables à T0 (EDTA, 0,05M, pH7) - moyennes 3 réplicats analyses, mg/kg de MS

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Sb	Zn
100% Terre	<0,2	0,11	0,10	1,14	0,24	3,9	0,08	2,95
99% Terre	<0,2	0,11	0,11	1,70	0,26	11,5	0,09	8,41
100% RBM	1,9	0,02	4,22	0,51	0,05	1,9	0,06	0,40
99% RBM	1,7	0,02	0,88	0,70	0,06	2,2	0,08	1,03
30-70% RBM-sco	11,5	0,09	0,71	66	1,0	4419	5,44	177
100% scories	86,4	0,38	3,31	200	6,9	21 165	83,20	1076

	Al	Co	Fe	Mn	Mo	Se	Ti	V
100% Terre	12,5	0,067	31	24	<0,01	<0,3	<0,25	0,29
99% Terre	12	0,064	42	22	<0,01	<0,3	<0,25	0,30
100% RBM	306	0,021	16	2,4	0,35	0,7	10,7	40
99% RBM	234	0,020	14,5	2,5	0,41	0,6	1,0	6,5
30-70% RBM-sco	338	0,37	206	7,4	0,18	0,7	14,0	6,3
100% scories	24,6	1,90	1495	27	0,17	1,4	1,2	0,97

Fraction échangeables à T0 ($Ca(NO_3)_2$ 0,05M) - moyennes 3 réplicats analyses, mg/kg de MS

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Sb	Zn
100% Terre	<0,2	<0,003	<0,02	<0,03	<0,01	<0,1	<0,05	0,03
99% Terre	<0,2	<	<	<	<	<	<	0,05
100% RBM	<	<	3,7	<	<	<	<	0,05
99% RBM	<	<	0,47	<	<	<	<	0,02
30-70% RBM-sco	<	<	<	<	<	0,14	0,42	0,03
100% scories	<	<	<	0,1	0,3	109	0,64	33,0

	Al	Co	Fe	Mn	Mo	Se	Ti	V
100% Terre	<0,1	<0,01	0,01	1,5	<0,01	<0,3	<0,25	0,02
99% Terre	<	<	0,12	0,5	<0,01	<0,3	<0,25	0,06
100% RBM	1,9	<	<	<	0,35	0,3	<	0,2
99% RBM	1,9	<	<	<	0,38	0,01	<	0,13
30-70% RBM-sco	1,2	<	<	0,06	0,06	0,12	<	0,04
100% scories	0,8	0,15	1 à 3	0,98	<	0,27	<	0,03

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

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

L'observation essentielle est que la toxicité et le problème de structure/porosité sont apparus comme des facteurs négatifs pouvant expliquer un problème de germination, en ce qui concerne les 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

Le RBM avec les Scories donne une croissance inférieure à la référence mais supérieure au RBM seul (>3 fois)

Après 26 jours d'expérimentation, les élément métalliques ont été dosés :



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

Les résultats obtenus sont répertoriés dans le tableau suivant:

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

Il apparaît une certaine tolérance des Dactyles et une limitation des transferts vers PA. Nous nous interrogeons sur le rôle direct du RBM. De plus, nous constatons un effet

dilution du RBM par rapport aux Scories seules. Enfin, l'impact du RBM est positif sur la fraction mobilisable des métaux, sauf pour Al.

PARTIE SHS, Raquel Bertoldo, Laboratoire ESPACE (AMU)

S'agissant de la perception des risques par les communautés locales et les professionnels de l'environnement, la recherche proposée ici a pour objectif de mieux comprendre les enjeux et dynamiques psychosociales locales. Elle s'appuiera sur un questionnaire (en ligne et en version papier) diffusé à des groupes sociaux concernés : participants locaux tout venants et professionnels de la dépollution des sites. Il s'agira d'explorer les variables susceptibles d'amplifier ou de modérer les risques associés à l'utilisation des propriétés chimiques d'un déchet industriel pour traiter des sols pollués (connaissances/croyances sur la situation actuelle du site ; attachement au lieu; confiance dans les institutions).

L'évaluation exploratoire des dynamiques psychosociales à la base de l'amplification ou de l'atténuation sociale de la perception des risques liées à l'utilisation des propriétés chimiques sur des sols pollués doit être faite. A partir de l'analyse d'une série de variables déjà identifiés dans la littérature sur la perception des risques industriels par les communautés riveraines et les professionnels de l'environnement cette étude permettra (i) de mieux comprendre les enjeux psychosociaux locaux ; (ii) d'identifier celles les plus importantes à considérer dans la perception des risques associés à ce processus de neutralisation chimique (iii) de comprendre les attentes et freins des professionnels vis-à-vis d'une telle proposition.

Dans cet objectif une enquête par questionnaire a été menée auprès de deux populations : les habitants de différents quartiers de Marseille (N = 191); et des professionnels de la dépollution des sites (N = 17). Le premier groupe a été enquêté dans les quartiers autour de la Croix Rouge – plus proches de l'Escalette – dans la gare Saint Charles ainsi que dans des transports en commun de la région. Ce groupe de répondants a été abordé par un stagiaire et a répondu à la version en papier du questionnaire. Le groupe des professionnels de la dépollution des sites était distribué par tout le territoire français. Du fait de leur spécificité et de leur distance géographique, ce groupe a été abordé par téléphone avant de recevoir nominalement une version adaptée du questionnaire, en ligne sur Qualtrics.

Variables

Le questionnaire mesurait des variables démographiques (âge, genre, éducation, secteur de résidence, etc.), variables psycho-sociales (attachement au lieu, identité environnementale et confiance aux institutions) et variables spécifiquement liés aux risques associés aux boues rouges ainsi qu'au projet de traitement des sols pollués avec de la bauxaline.

La polémique des boues rouges à Marseille a été très présente ces dernières années dans les médias locaux. Malgré la présence de ce débat dans la sphère publique, 46,6% des marseillais enquêtés ont déjà entendu parler du sujet – ce pourcentage s'élève à 93,3% parmi les professionnels distribués par tout le territoire français.

Suite à une présentation standardisée sur ce qui sont les boues rouges et, dans ce contexte, comment se présenterait la possibilité d'utilisation de la bauxaline pour traiter des sols pollués, les répondants se sont positionnés pour ou contre ce projet.

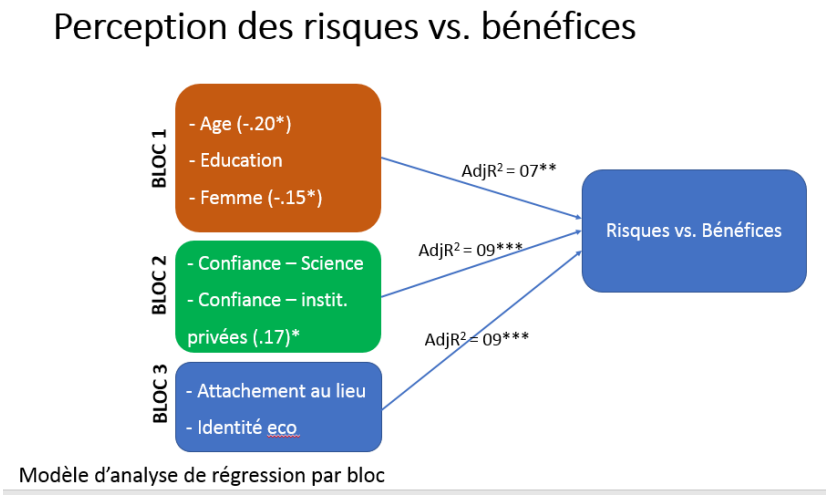
Parmi les marseillais, 55,7% sont pour un tel projet d'utilisation de déchets industriels ; un pourcentage que se réduit à 25% chez les professionnels de la dépollution.

Certaines variables psycho-sociales ont pu être significativement associés à la perception de la pollution et des risques associés au projet : l'attachement au lieu, l'identité écologique et la confiance dans les institutions. Parmi ces différents nous avons choisi une analyse de régression qui a intégrée différentes variables sous une même analyse.

Cette analyse a eu par but modéliser les « risques ← → bénéfices » associées au projet en fonction des variables psychosociales et démographiques mentionnés ci-dessus.

D'abord les variables démographiques ont été contrôlés (Adj R^2 = .07, $F(3,144)$ = 4,5, p < .01). Un effet significatif de l'âge a été identifié (B = -.20) ce que suggère que les personnes le plus âgées attribuent plus de risque au projet (p < .05).

Ensuite un bloc avec des variables mesurant la confiance à la science et aux institutions privées a été rentré (Adj R^2 = .09, $F(5,144)$ = 3,7, p < .01). Ces résultats montrent que le plus on fait *confiance* aux institutions privées (médias et entreprises) le plus on attribue de bénéfices à ce projet (p < .05). Finalement un troisième bloc a vérifié l'impact des variables d'attachement au lieu et d'identité écologique mais aucune de ces variables a été associé à l'attribution de risques-bénéfices au projet (Adj R^2 = .09, $F(7,144)$ = 2,9, p < .01).



CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats principaux sont :
1- Nous pouvons observer une certaine immobilisation des éléments métalliques et métalloïdes (teneurs dans les lixiviats faibles mais attention à As dans le sol de l'Escalette). En ce qui concerne les teneurs foliaires: les concentrations en Pb, Cr, Fe augmentent avec le RBM.

2- Les tests d'écotoxicité montrent les éléments expliquant le mieux la mortalité (Zinc notamment),
3- Le suivi de croissance et les analyses chimiques sur les essais avec plantes en serre ont permis de mettre en évidence un impact du RBM positif sur la fraction mobilisable des métaux, sauf pour Al.

4- Enfin, l'identification des perceptions du risques pour les individus et professionnels ont été mieux comprises en fonction de variables spécifiques.

Perspectives :

Les résultats sont en cours d'acquisition mais nous pouvons espérer une meilleure compréhension des effets à long terme du RBM par ce processus de recyclage par les modélisations géochimiques réalisées sur les expériences présentées ci-dessus.

Publications, congrès : congrès de l'association française de psychologie environnementale. Rennes, septembre 2017. « Le danger à côté : la perception des risques associés au traitement des sols pollués à partir des résidues de bauxite. » R. Bertoldo, T. Berrhoun, P. Merdy

Suite donnée au projet (contrats plus vastes, bourses de thèse…):