



HAL
open science

Phyto-extraction des terres rares à partir de résidus de bauxite modifiés

Blanche Collin, Tao Celce, Youssef Lamwati, Claire Lallemand, Perrine Chaurand, Catherine Keller, Criquet Stéven, C. Levard

► To cite this version:

Blanche Collin, Tao Celce, Youssef Lamwati, Claire Lallemand, Perrine Chaurand, et al.. Phyto-extraction des terres rares à partir de résidus de bauxite modifiés. Séminaire annuel de restitution de l'OHM-BMP 2022, OHM-BMP, May 2022, Rousset, France. hal-03695121

HAL Id: hal-03695121

<https://hal.science/hal-03695121>

Submitted on 14 Jun 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Phyto-extraction des terres rares à partir de résidus de bauxite modifiés

Blanche Collin, Tao Celce, Youssef Lamwati, Claire Lallemand, Perrine Chaurand,
Catherine Keller, Steven Criquet, Clément Levard



Transition énergétique

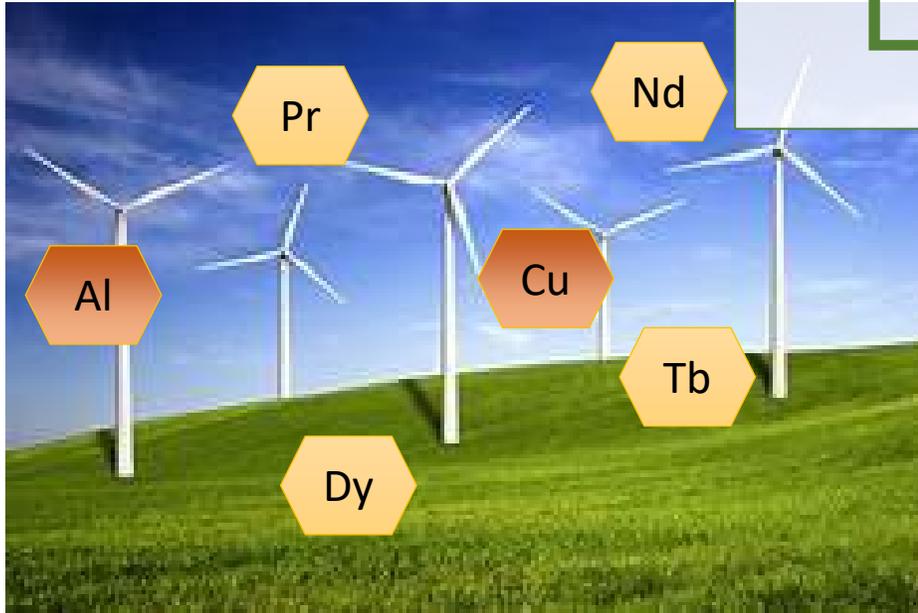




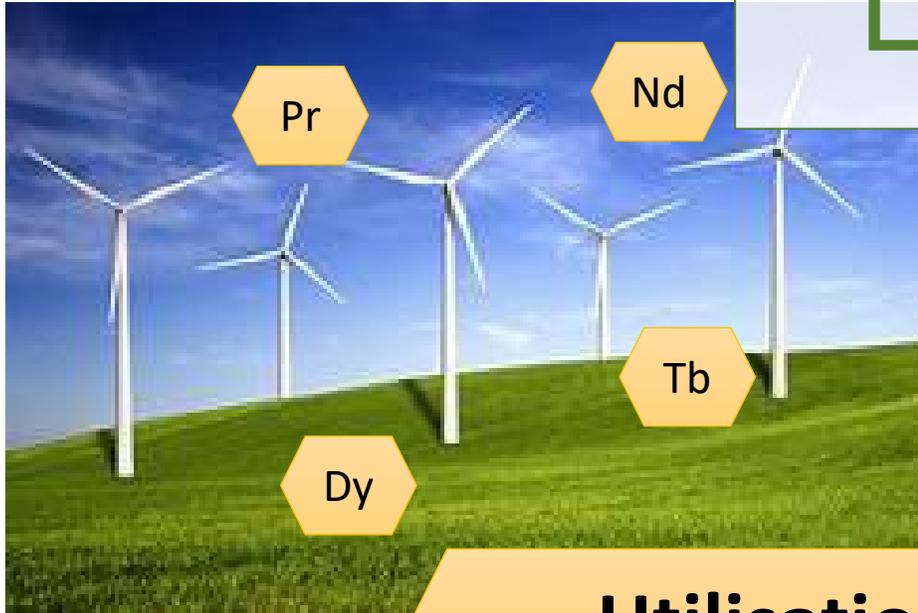
Transition énergétique & numérique



Les métaux !



Les métaux !



Utilisation croissante des terre rares



Les voitures électriques et hybrides peuvent contenir de 9 à 11 kg¹ de terres rares

(Deux fois la quantité trouvée dans les voitures à essence)

Additif au carburant diesel
Cérium
Lanthane

Pile hybride NiMH
Lanthane
Cérium

Convertisseur catalytique
Cérium/Zirconium
Lanthane

Plus de 25 moteurs électriques partout dans le véhicule
Aimants de Nd

Phares
Néodyme

Pare-brise anti-UV
Cérium

Vitres et miroirs
Poudre à polir
Cérium

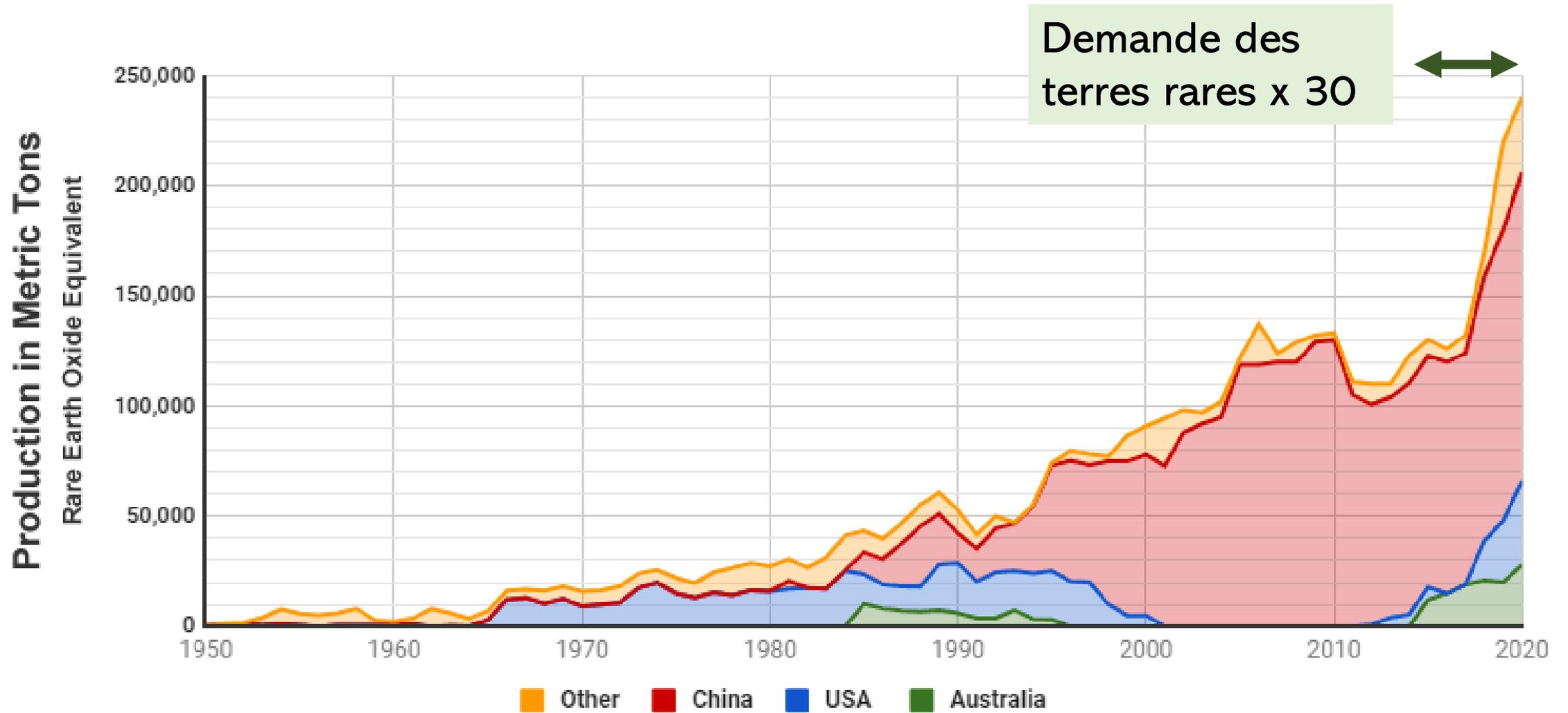
Écran ACL
Europium
Yttrium
Cérium

Capteurs des composants
Yttrium

Moteur et générateur électrique hybride
Néodyme
Praséodyme
Dysprosium
Terbium

¹Source : « The Race for Rare Metals », The Globe and Mail, 16 juillet 2011

Production des terres rares

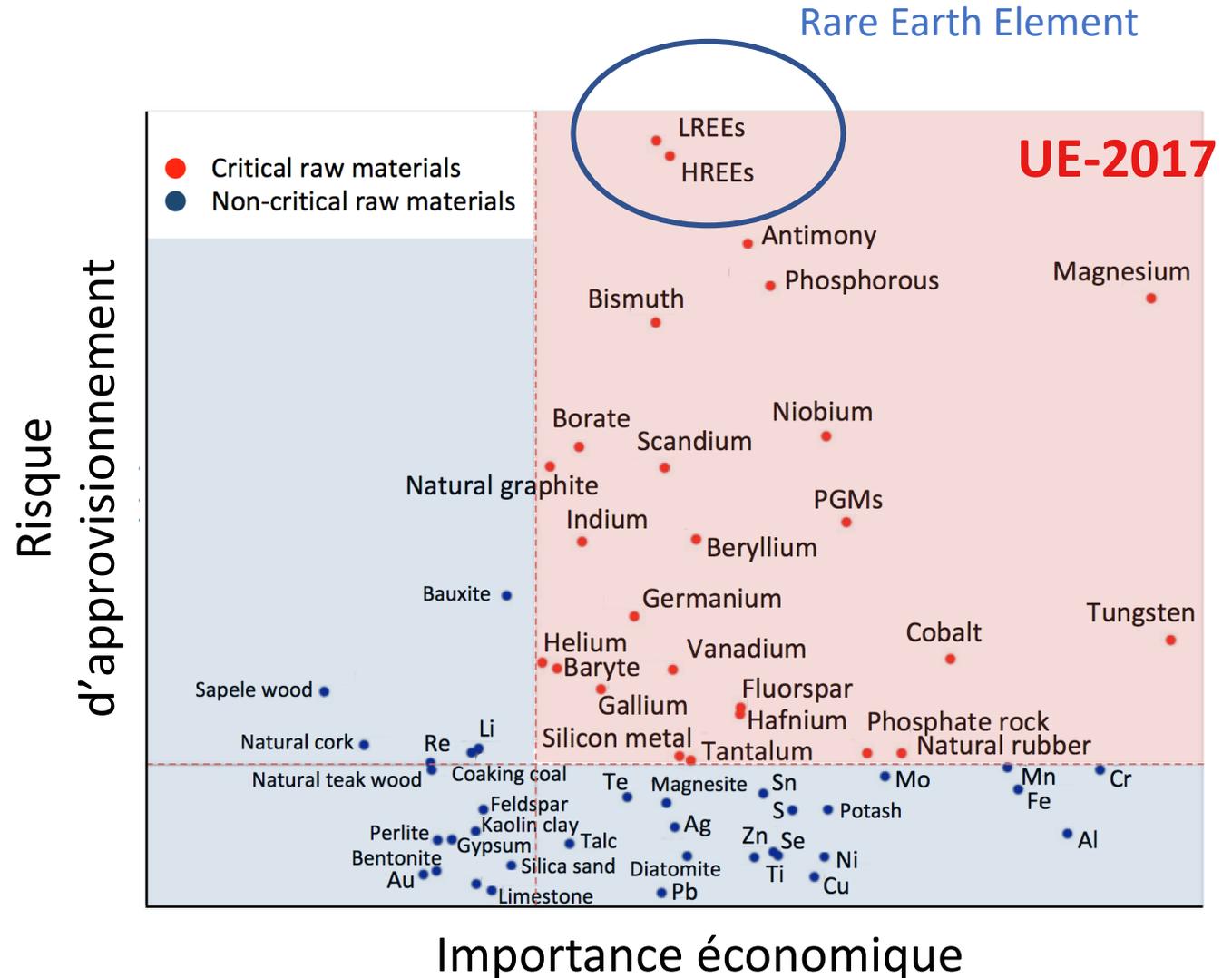


•Graph by Geology.com using data from the United States Geological Survey, 2020

Terres rares : éléments critiques

Les éléments dits **critiques** sont des éléments qui sont à la fois:

- Jugés comme stratégiques pour l'économie d'un pays, car susceptibles d'altérer la compétitivité des industries qui en dépendent
- Sujets à des risques d'approvisionnement ou à une grande volatilité des prix



Extraction des terres rares

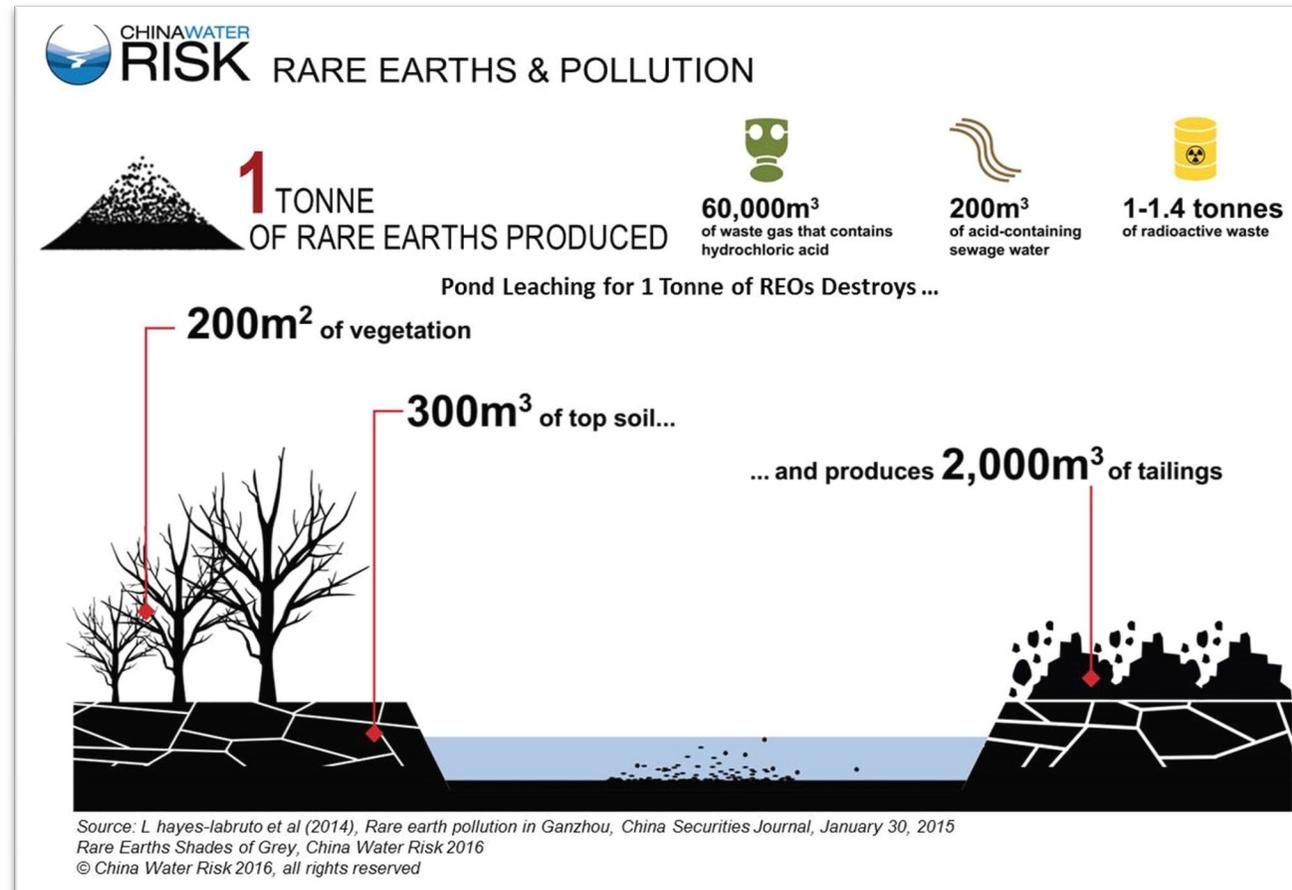


- Gisements peu concentrés en TR : TR présentes partout sur la croute terrestre mais disséminées

Extraction des terres rares



- Gisements peu concentrés en TR : TR présentes partout sur la croute terrestre mais disséminées
- Extraction polluante



Extraction des terres rares à partir de sources secondaires ?



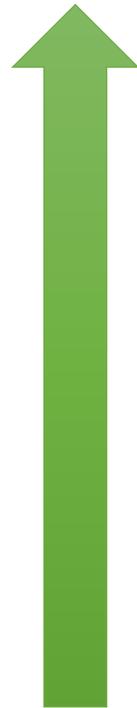
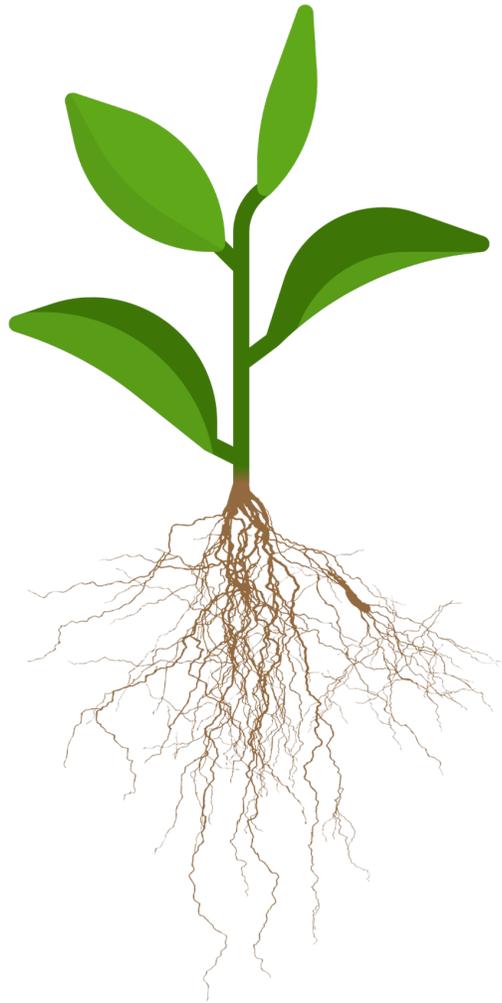
Résidus de bauxite issu de l'extraction d'alumine : moyenne 1000 mg.kg^{-1} TR

Production mondiale : 150 million de tonnes

Défi : développer des méthodes d'extraction sobres et peu polluantes

Extraction des terres rares à partir de sources secondaires ?

Les plantes hyperaccumulatrices de TR



Accumule TR dans les parties aériennes : seuil $1000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}$

Extraction des terres rares à partir de sources secondaires ?

Les plantes hyperaccumulatrices de TR



Accumule TR dans les parties aériennes : seuil 1000 mg/kg

22 espèces végétales actuellement reconnues comme hyperaccumulatrices de TR (Liu et al 2018)



Dicranopteris linearis



Phytolacca americana

Objectifs :

Les plantes sont-elles capables d'extraire et d'accumuler les TR issues des résidus de bauxite ?

- Comment modifier les résidus de bauxite pour optimiser la croissance des plantes ?

Matériel & méthodes : choix de la plante

Phytolacca americana



- Plante herbacée, vivace
- Résistance à des sols pollués
- Croissance rapide et à haute production de biomasse
- Hyperaccumulation Mn, Al et TR

...espèce invasive

Matériel & méthodes : résidus de bauxite

Utilisation de résidus de bauxite modifiés : ajout de gypse et lessivage des résidus.

Nom	Provenance	Provenance bauxite	pH	Conductivité Électrique (mS/cm)	TR (mg/kg)
RBM Vitrolles	Dépôt de Vitrolles	Provence	8,6	0,708	1575
RBM Altéo stock 1	Usine Altéo (Gardanne) Stocké 1 an à l'air libre	Guinée	9,4	0,251	862
RBM Altéo stock 2	Usine Altéo (Gardanne)	Guinée	8,4	0,239	862

Matériel & méthodes : résidus de bauxite

Utilisation de résidus de bauxite modifiés : ajout de gypse et lessivage des résidus.

Ajout de matière organique :

- Boues de station d'épuration (STEP)
- Compost

Mélange RBM + amendement organique pour atteindre 2 g/kg d'azote

Matériel & méthodes : culture des plantes

8 modalités, 6 répétitions

Alteo 1 - STEP

Alteo 1 - Compost

Alteo 2 - STEP

Alteo 2 - Compost

Vitrolles - STEP

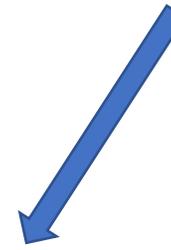
Vitrolles - Compost

Témoin (sol agricole)

Témoin dopé en Y à 250 mg/kg



Culture *P. americana* en phytotron pendant 40 jours



Mesure de la croissance des plantes

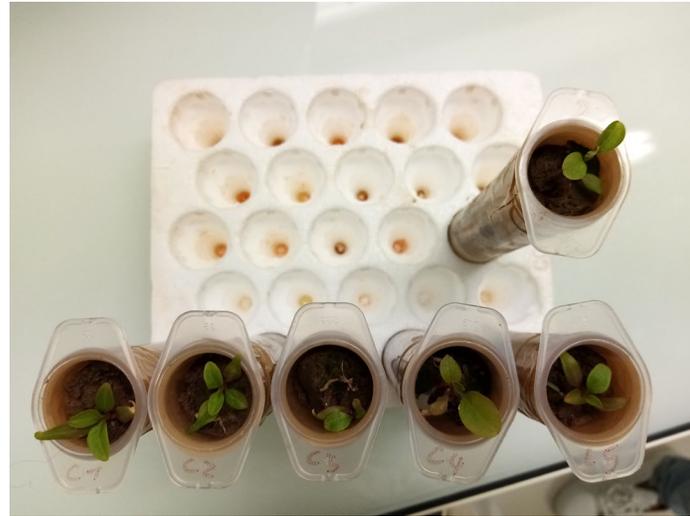


Mesure des concentrations en TR dans les plantes :
analyse par ICPMS (CEREGE)

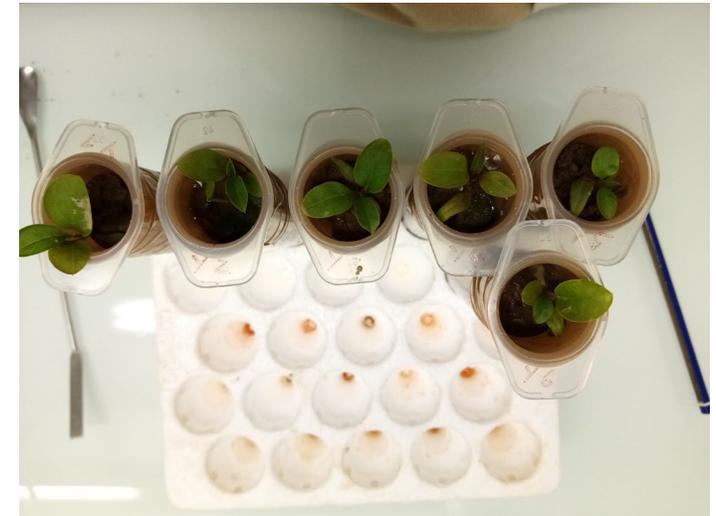


Résultats : croissance de *P. americana*

- Croissance faible sur les sols « témoins »
- Bonne croissance dans les RBM amendés



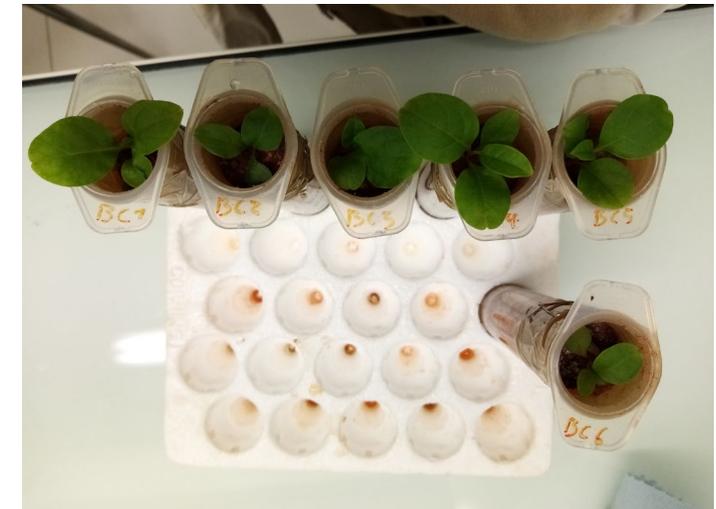
Sol agricole control 2.3



Sol agricole control 2.3 + Y 250



RBM Altéo + STEP



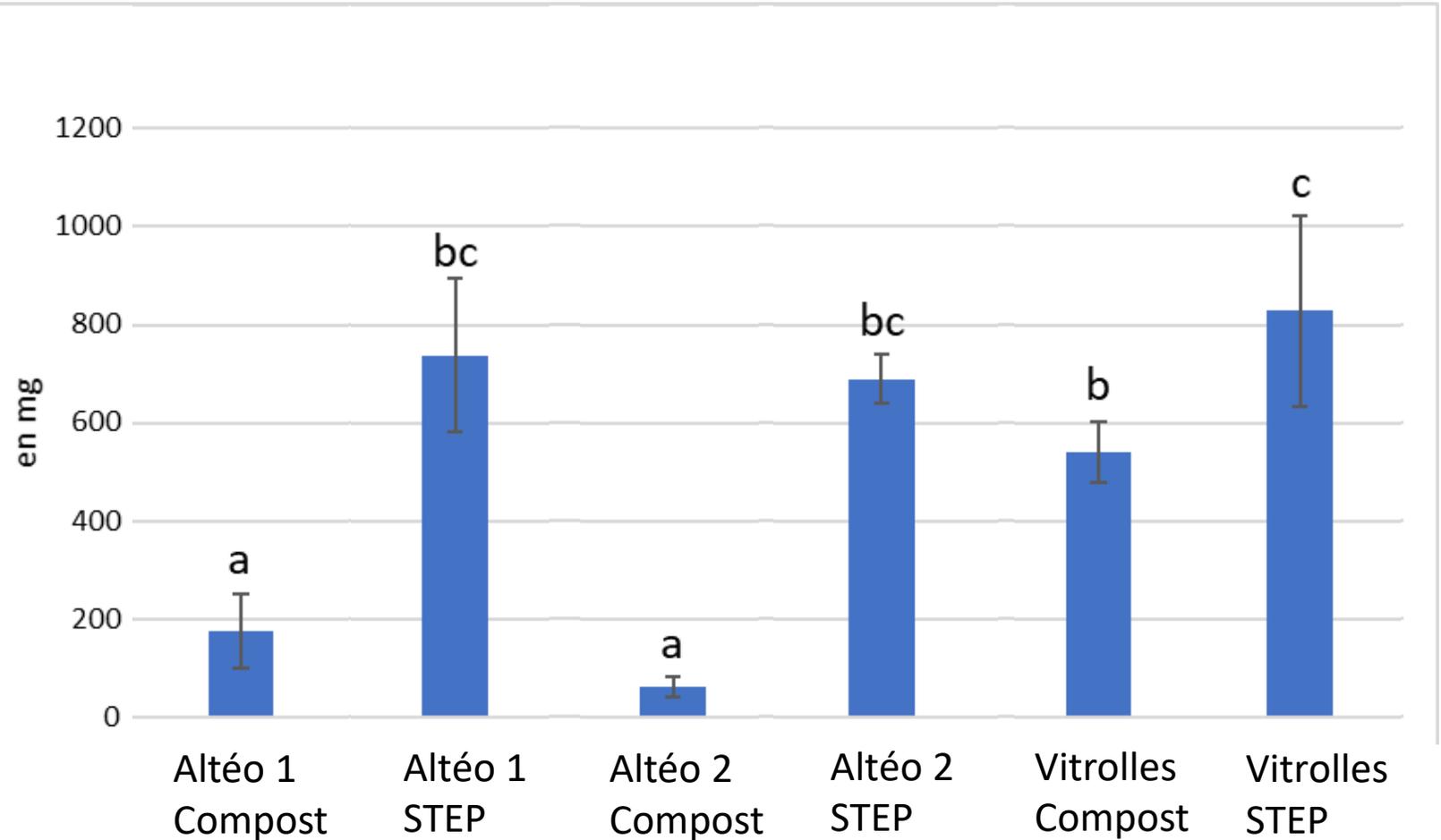
RBM Vitrolles + compost

Résultats : croissance de *P. americana*



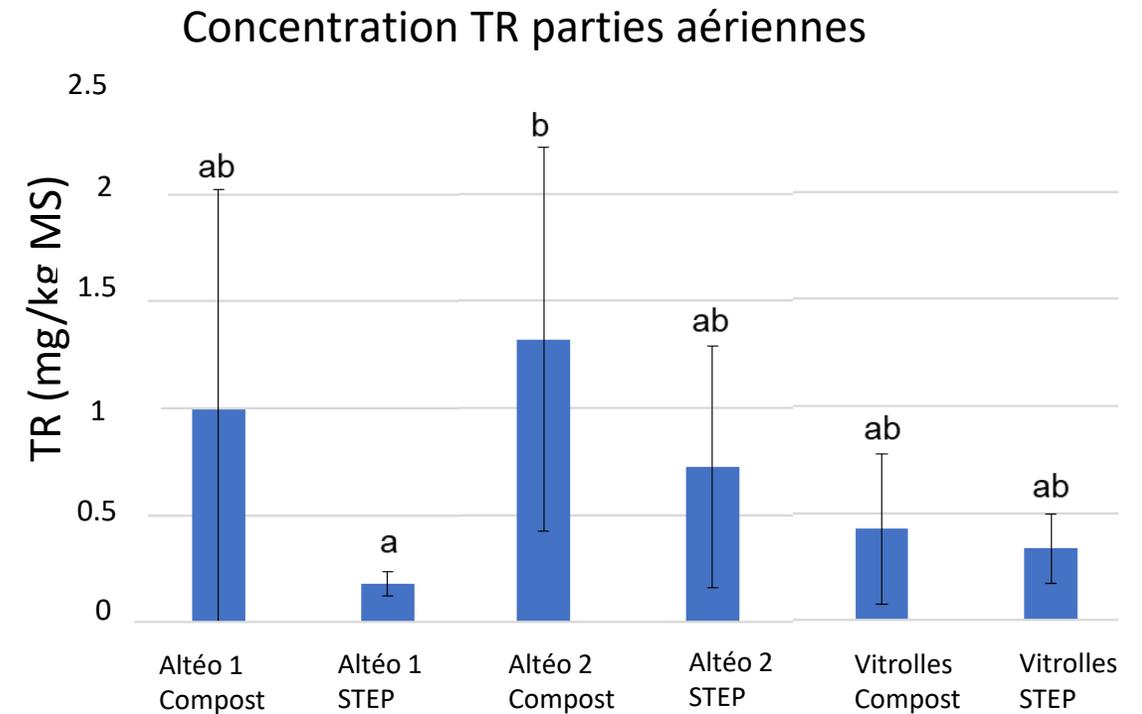
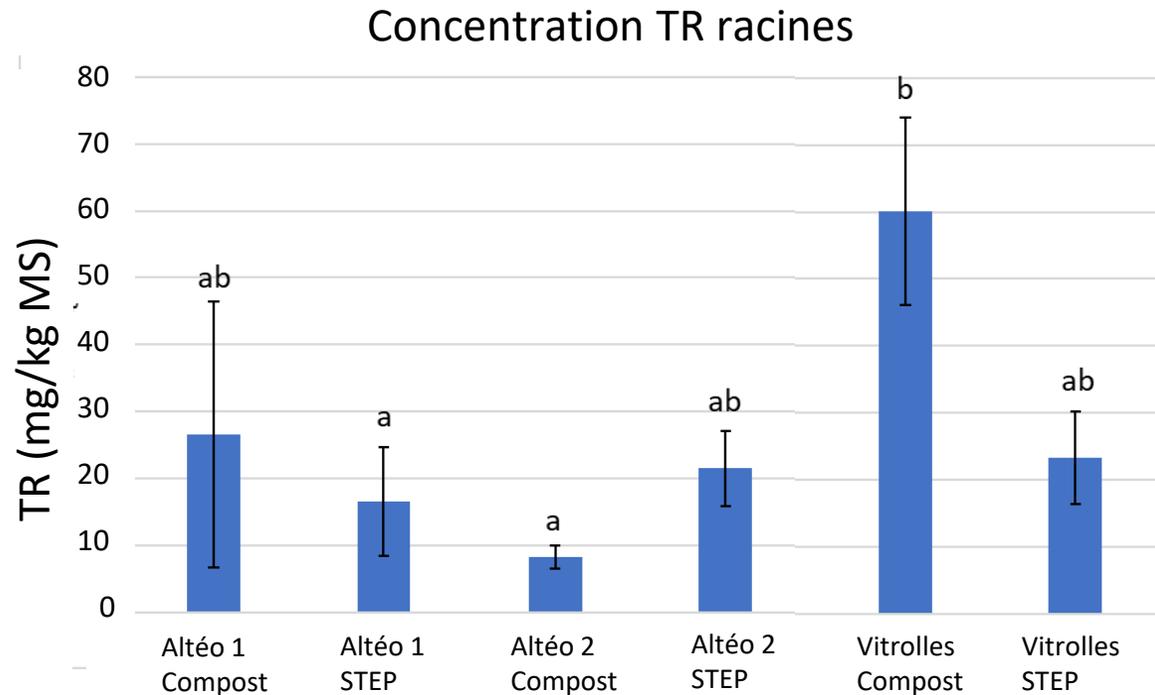
Masse (mg MF)

Masse des parties aériennes



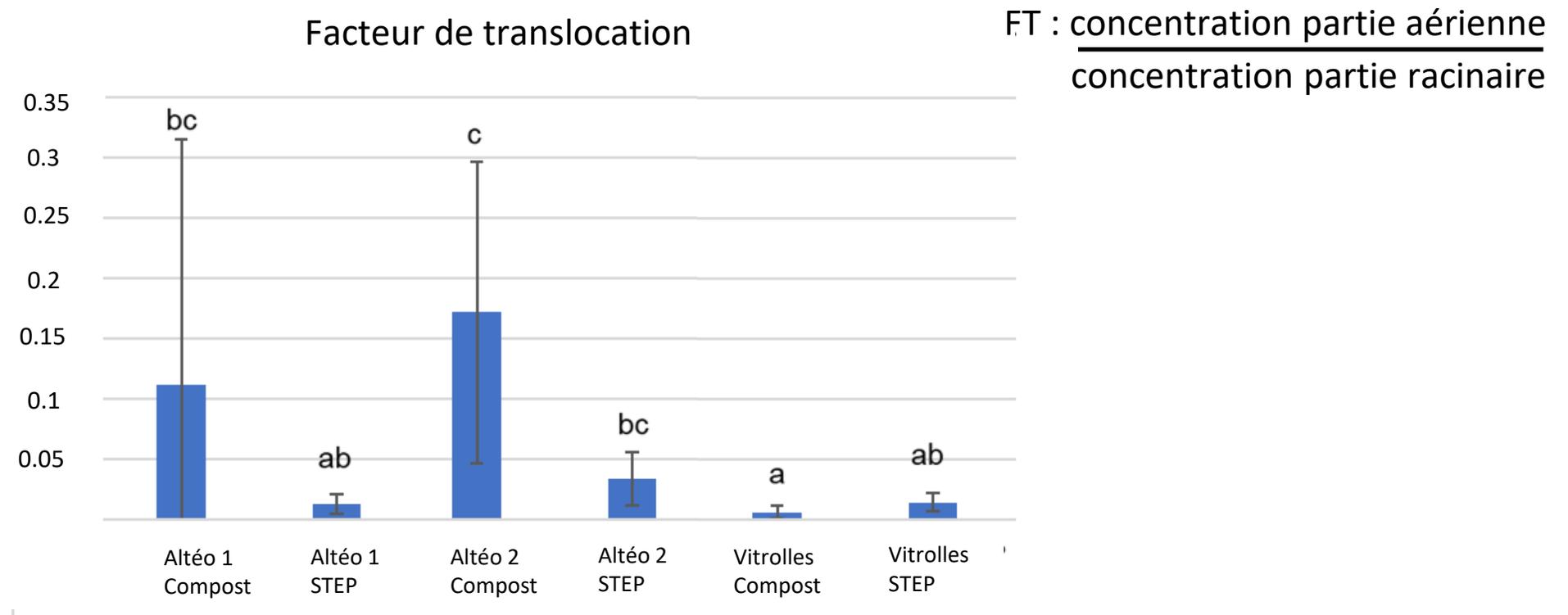
Résultats : accumulation des TR

- Faible accumulation des TR dans les plantes < 60 mg/kg (somme des TR)
- Translocation faible : concentrations racinaires > concentrations parties aériennes



Résultats : accumulation des TR

- Faible accumulation des TR dans les plantes < 60 mg/kg
- Translocation faible : concentrations racinaires > concentrations parties aériennes



Résultats : accumulation des TR

- Comment expliquer la faible concentration en TR ?

Sur un sol minier, Liu et al. (2021) observent 800 mg/kg de TR dans les feuilles de *P. Americana* sur un sol minier à 550 mg/kg TR.

Plusieurs paramètres peuvent influencer le transfert des métaux :

- le pH : Un pH élevé étant corrélé à une plus faible accumulation de TR (Liu et al, 2021, Khan, 2017)

- la spéciation des TR dans le substrat : la forme chimique des métaux dans le sol influence sa phytodisponibilité

Résultats : Spéciation des TR dans les RB

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	39	21
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Sc
138.9	140.1	140.9	144.2	(147)	150.4	152	157.3	158.9	162.5	164.9	167.3	168.9	173	175	88.91	44.96

Terres rares légères

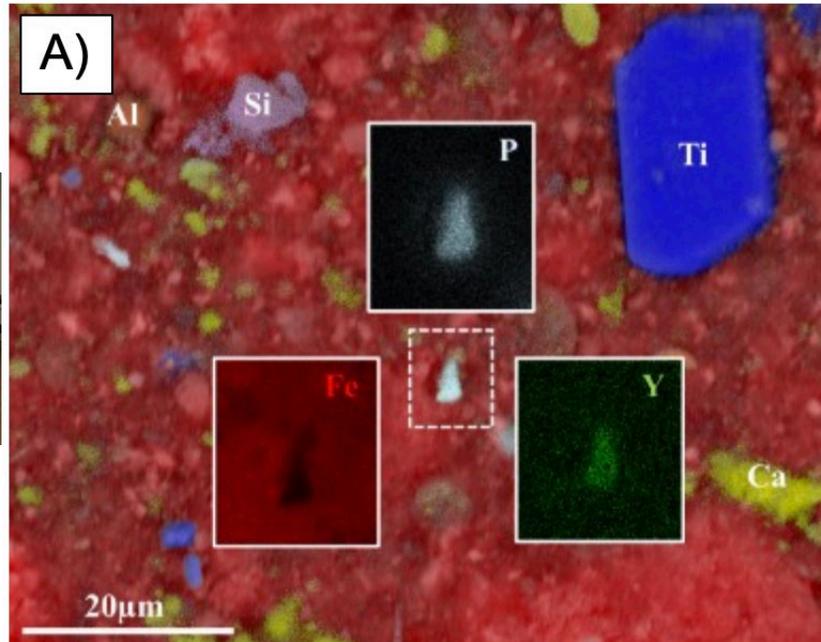
Terres rares lourdes

Résultats : Spéciation des TR dans les RBM

Distribution spatiale des TR

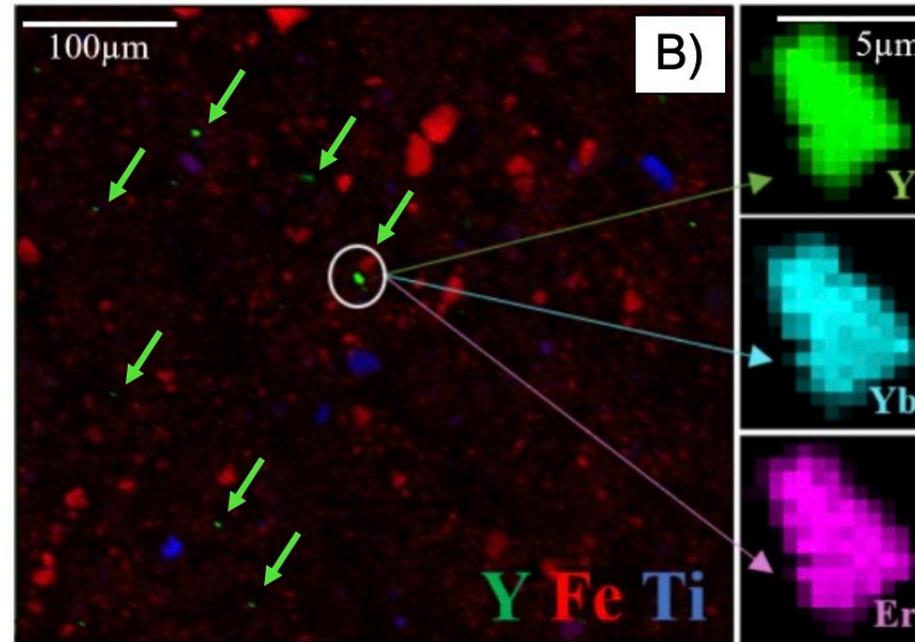
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	39	21
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Sc
138.9	140.1	140.9	144.2	(147)	150.4	152	157.3	158.9	162.5	164.9	167.3	168.9	173	175	88.91	44.96

Terres rares lourdes



Scanning Electron Microscopy coupled EDX, University of Saint-Jérôme, Marseille (Centre Pluridisciplinaire de Microscopie Electronique et de Microanalyse), 2019

➤ Colocalisation Y and P



Nano-XRF mapping, Synchrotron SOLEIL (Nanoscopium beamline), Paris Saclay (France), 2021

➤ Colocalisation Y and TR lourdes



Résultats : Spéciation des TR dans les RBM

Spéciation de l'yttrium : proxy pour les TR lourdes

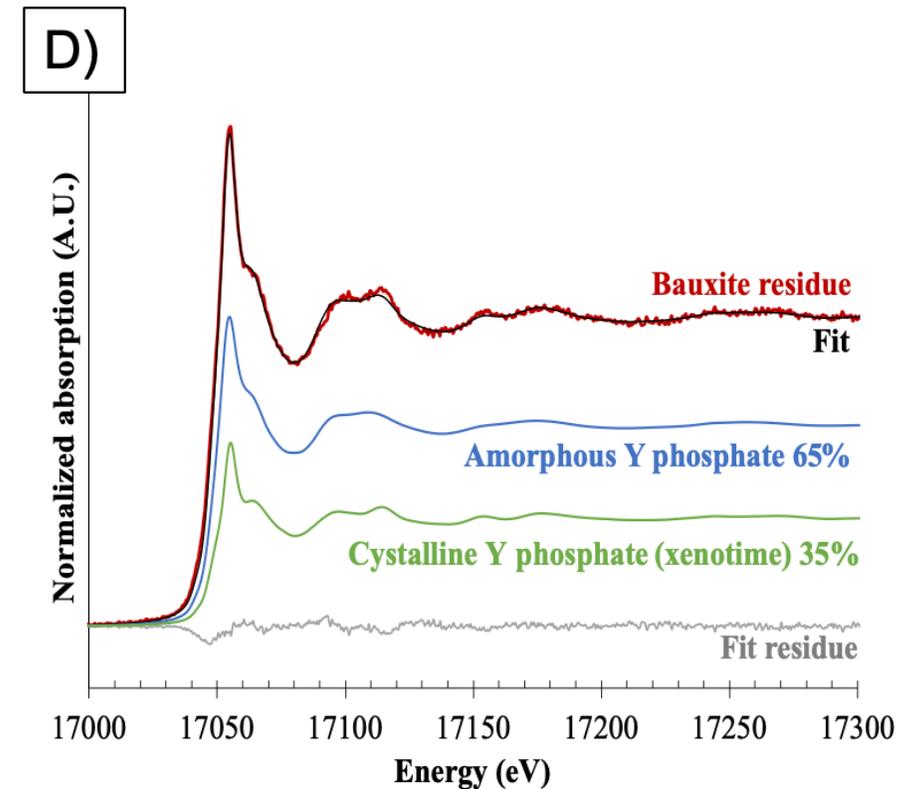
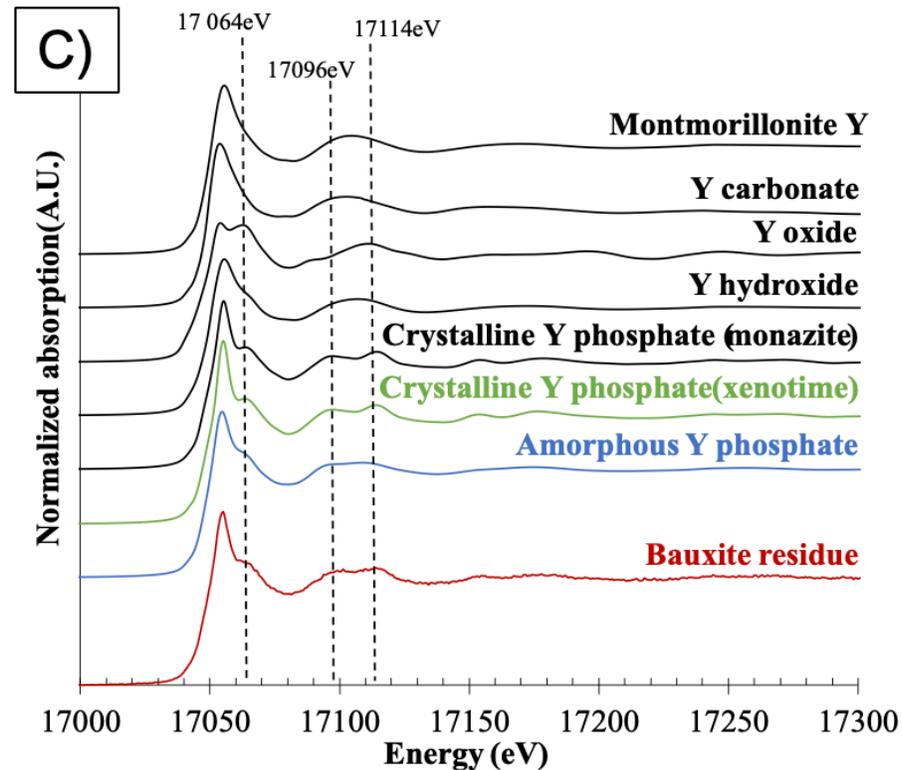
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	39	21
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Sc
138.9	140.1	140.9	144.2	(147)	150.4	152	157.3	158.9	162.5	164.9	167.3	168.9	173	175	88.91	44.96

Terres rares légères

Terres rares lourdes

Y phosphates (YPO_4)

En cours...

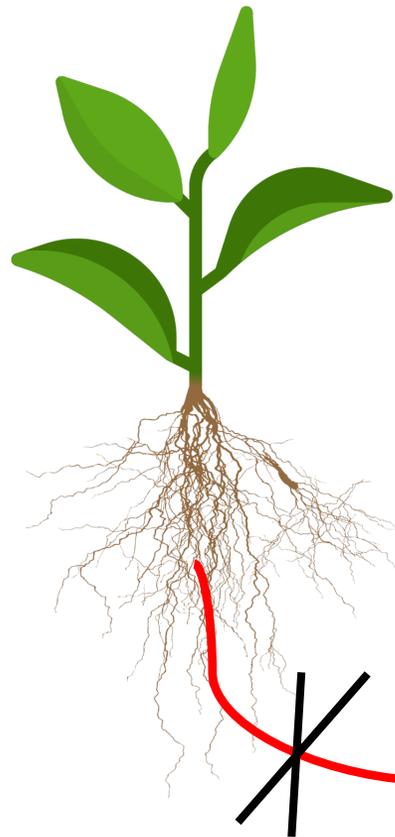


Synchrotron ESRF,
Grenoble

Résultats : accumulation des TR

- Comment expliquer la faible concentration en TR ?

TR-phosphate : phases difficilement accessible par les plantes



- L'amendement organique apporte des phosphates : module l'exsudation des acides organiques ?
- Expérience en cours pour tester cette hypothèse (Thèse Youssef Lamwati) : culture sur RBM sans apport de phosphate

Acides
organiques

~~Dissolution des
phosphates ?~~

Y^{3+}

PO_4^{2-}

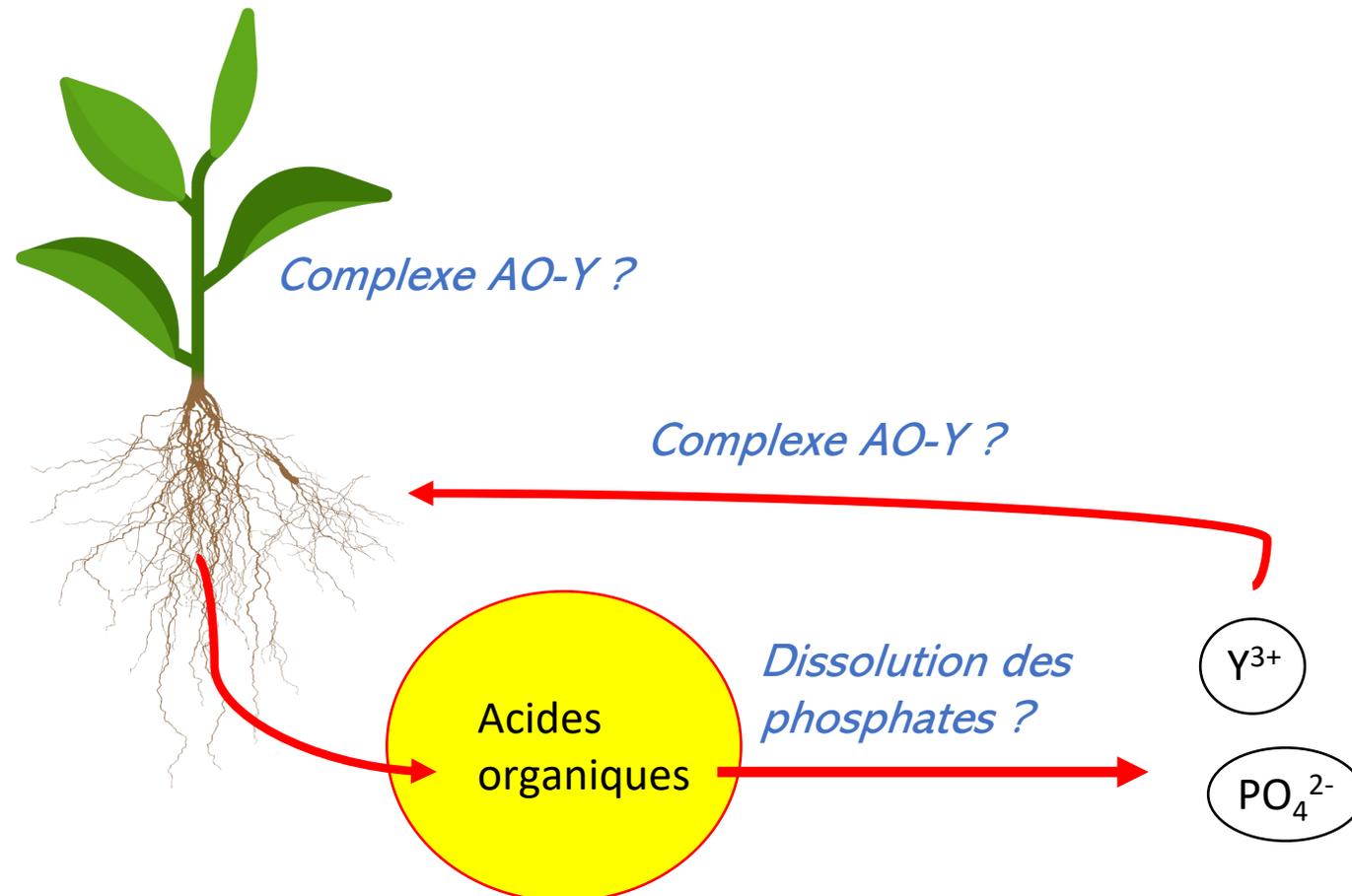
Conclusions

- ✓ *Phytolacca americana* se développe sur des RBM amendés en matière organique : traitement STEP plus favorable
- ✓ Pas d'accumulation des TR dans la plante pour les substrats testés
- ✓ Spéciation des TR dans les RB : identifiée pour les TR lourdes qui sont majoritairement sous forme de REE-phosphate
- ✓ Rôle clef de l'exsudation racinaire dans la phytodisponibilité des TR ?

Projet ITEM Bioextract : Le BIOMimétisme au service de l'EXTRACtion des Terres rares issues de sources secondaires.

Est-ce que les plantes produisent des ligands susceptibles de complexer les TR ?

→ Caractérisation des métabolites produits par les plantes hyperaccumulatrices de TR



Projet ITEM Bioextract : Le BIOMimétisme au service de l'EXTRACTION des Terres rares issues de sources secondaires. (2021-2024)

- Tâche 1 : Identification de métabolites et protéines interagissant avec les TR chez *Pseudomonas putida*.

BIAM (Catherine Berthomieu), LIEC (Patrick Billard)

- Tâche 2 : Identification des métabolites influencés par les TR chez des plantes accumulatrices de TR

IMBE (Steven Criquet), CEREGE (Blanche Collin), UM5 Maroc (Mouna Fahr)

- Tâche 3 : Essai de lixiviation des extractants ciblés

CEREGE (Clément Levard)



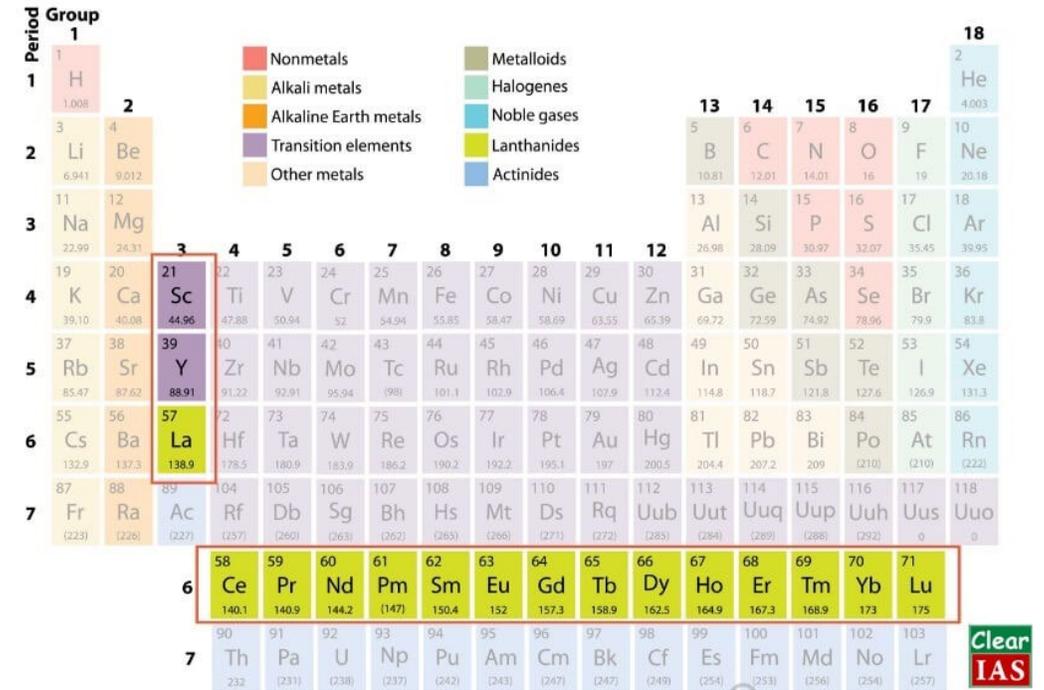
Merci de votre attention



Les terres rares ?



Présentes partout sur la croute terrestre
mais disséminées



Rayons atomiques et comportements
géochimiques similaires



55 éléments dans un smartphone

DALLE TACTILE + VITRE

In Indium	Sn Etain	Si Silicium	Al Aluminium	K Potassium
---------------------	--------------------	-----------------------	------------------------	-----------------------

ÉCRAN

Eu Europium	Tb Terbium	Y Yttrium	
Gd Gadolinium	Ce Cérium	Tm Thulium	
La Lanthane	B Bore	Ba Baryum	
S Soufre	Mg Magnésium	Mo Molybdène	Hg Mercure

BATTERIE

Li Lithium	Co Cobalt	C Carbone	F Fluor
Mn Manganèse	V Vanadium	P Phosphore	Al Aluminium

Mg Magnésium	C Carbone	Sb Antimoine	Br Brome	Ni Nickel	Zn Zinc
------------------------	---------------------	------------------------	--------------------	---------------------	-------------------

BOÎTIER

CARTE ET COMPOSANTS

Ni Nickel	Pb Plomb	Sn Etain	Bi Bismuth
Au Or	Ag Argent	W Tungstène	Pt Platine
Rh Rhodium	Be Béryllium	Cu Cuivre	P Phosphore
As Arsenic	Ga Gallium	Ge Germanium	Si Silicium
Zr Zirconium	Ru Ruthénium	Nd Néodyme	Fe Fer
B Bore	Sm Samarium	Co Cobalt	Pr Praséodyme
Cl Chlore	Dy Dysprosium	Ta Tantale	
	Nb Niobium	Pd Palladium	

Pourquoi les terres rares ?

Magnets

Nd, Pr, (Tb, Dy)

Phosphors

Eu, Y, Tb, Nd, Er, Gd



Catalysts

La, Ce, Pr, Nd

Mettalurgical alloys

La, Ce, Pr, Nd, Y

Les voitures électriques et hybrides peuvent contenir de 9 à 11 kg¹ de terres rares
 (Deux fois la quantité trouvée dans les voitures à essence)

Additif au carburant diesel
Cérium
Lanthane

Pile hybride NiMH
Lanthane
Cérium

Convertisseur catalytique
Cérium/Zirconium
Lanthane

Plus de 25 moteurs électriques partout dans le véhicule
Aimants de Nd

Phares
Néodyme

Pare-brise anti-UV
Cérium
 Vitres et miroirs
 Poudre à polir
Cérium

Écran ACL
Europium
Yttrium
Cérium

Capteurs des composants
Yttrium

Moteur et générateur électrique hybride
Néodyme
Praséodyme
Dysprosium
Terbium



Ceramics

La, Ce, Pr, Nd, Y, Eu, Gd, Lu, Dy

Other

Nuclear, defence, water treatment...

TR sont indispensables à la plupart des technologies de la transition énergétique

¹Source : « The Race for Rare Metals », The Globe and Mail, 16 juillet 2011