



Projet BioExtract :

Le Biomimétisme au service de l'Extraction des Terres rares issues de sources secondaires.

2021-2024

Porteur : Blanche Collin (CEREGE)

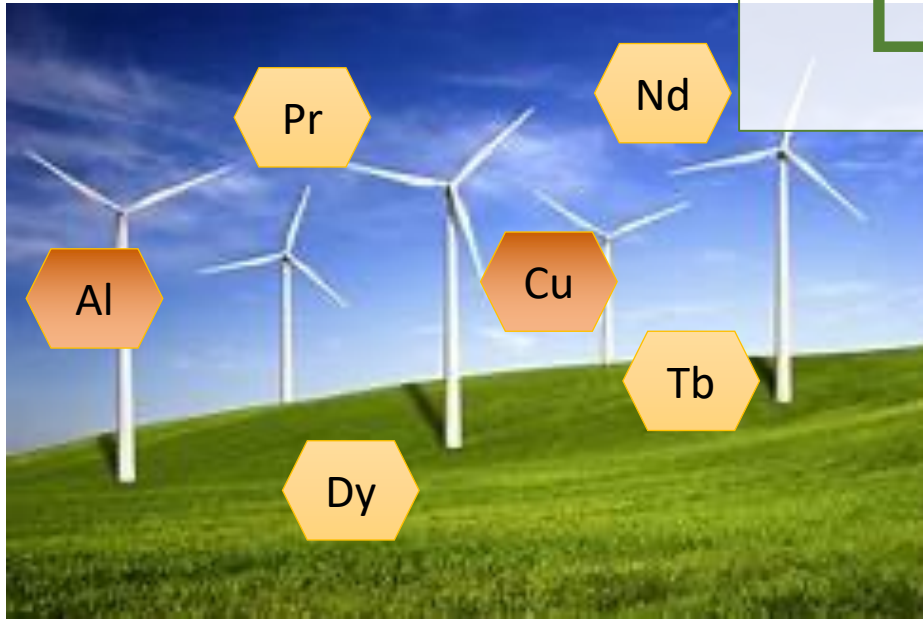




Transition énergétique & numérique



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

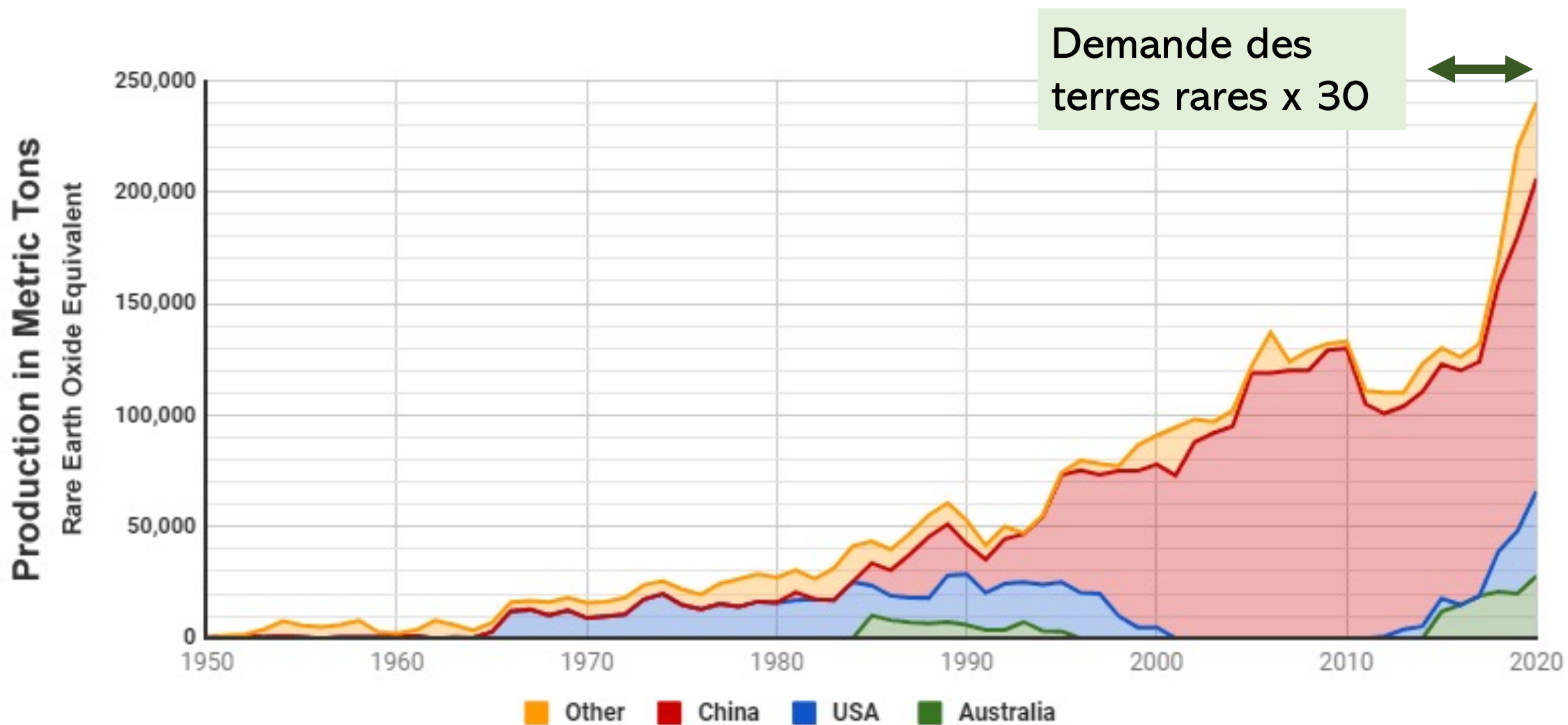
Écran ACL
Europium
Yttrium
Cérium

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

Period	Group 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H 1.008																	2 He 4.003	
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16	9 F 19	10 Ne 20.18	
3	11 Na 22.99	12 Mg 24.31											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95	
4	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.47	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.9	36 Kr 83.8	
5	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3	
6	55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	57 La 138.9	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.9	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197	80 Hg 200.5	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)	
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)	104 Rf (257)	105 Db (260)	106 Sg (263)	107 Bh (262)	108 Hs (265)	109 Mt (266)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (288)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus 0	118 Uuo 0	
Terres rares légères			6	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm (147)	62 Sm 150.4	63 Eu 152	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173	71 Lu 175	Terres rares lourdes	
			7	90 Th 232	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (249)	99 Es (254)	100 Fm (253)	101 Md (256)	102 No (254)	103 Lr (257)		

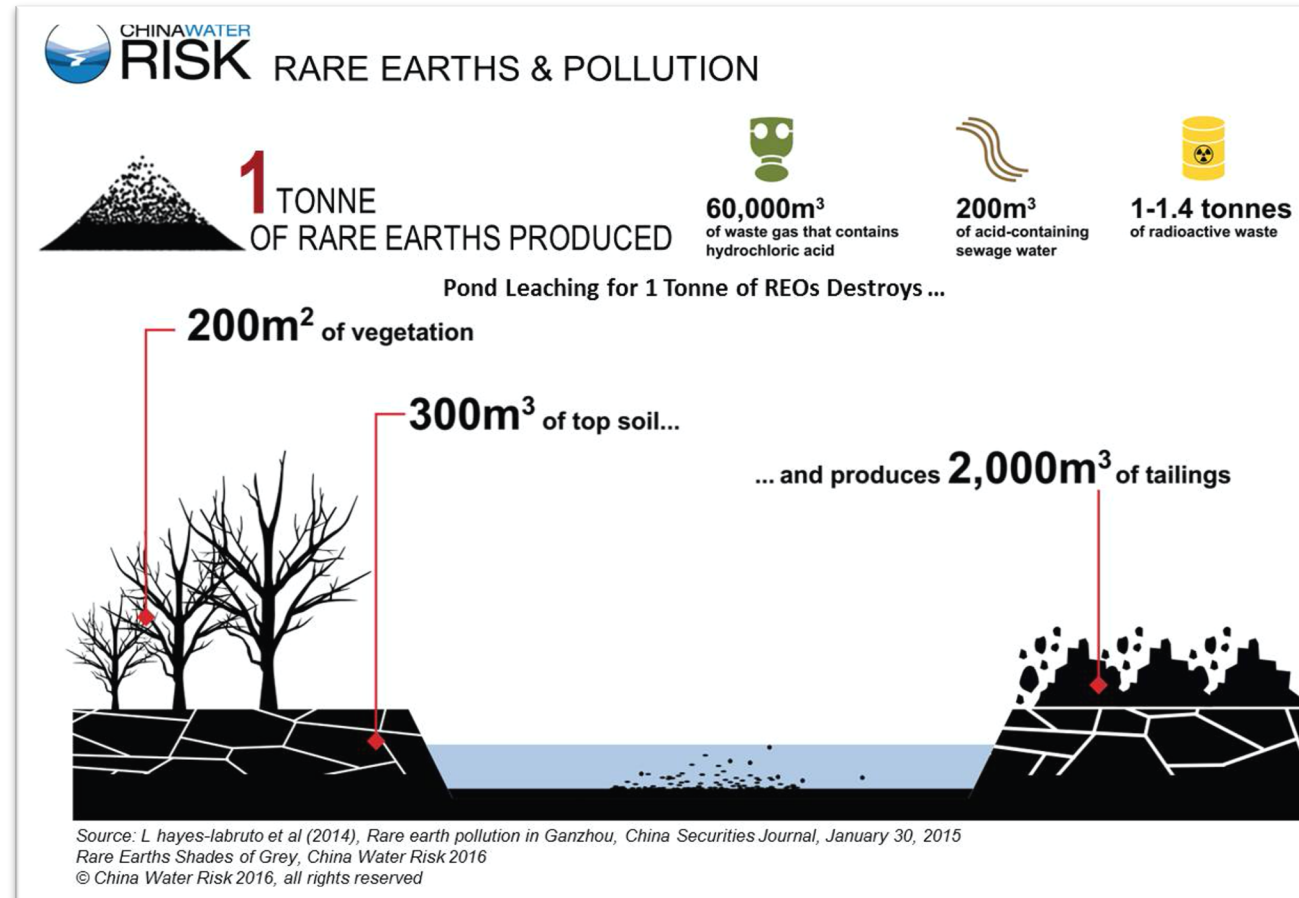


Rayons atomiques et comportements géochimiques similaires

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, sélectives et peu polluantes

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

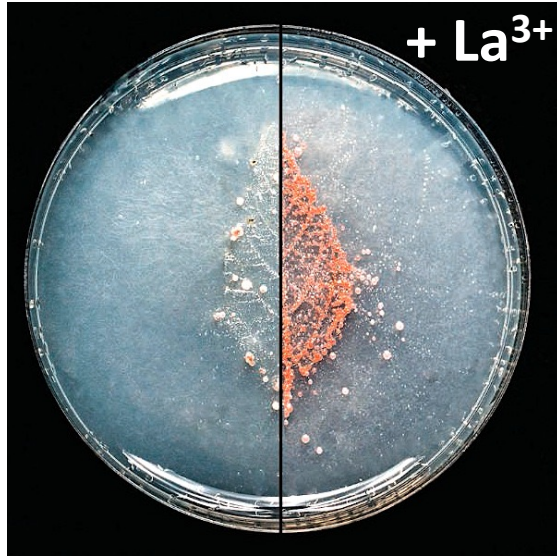
Pseudomonas Putida



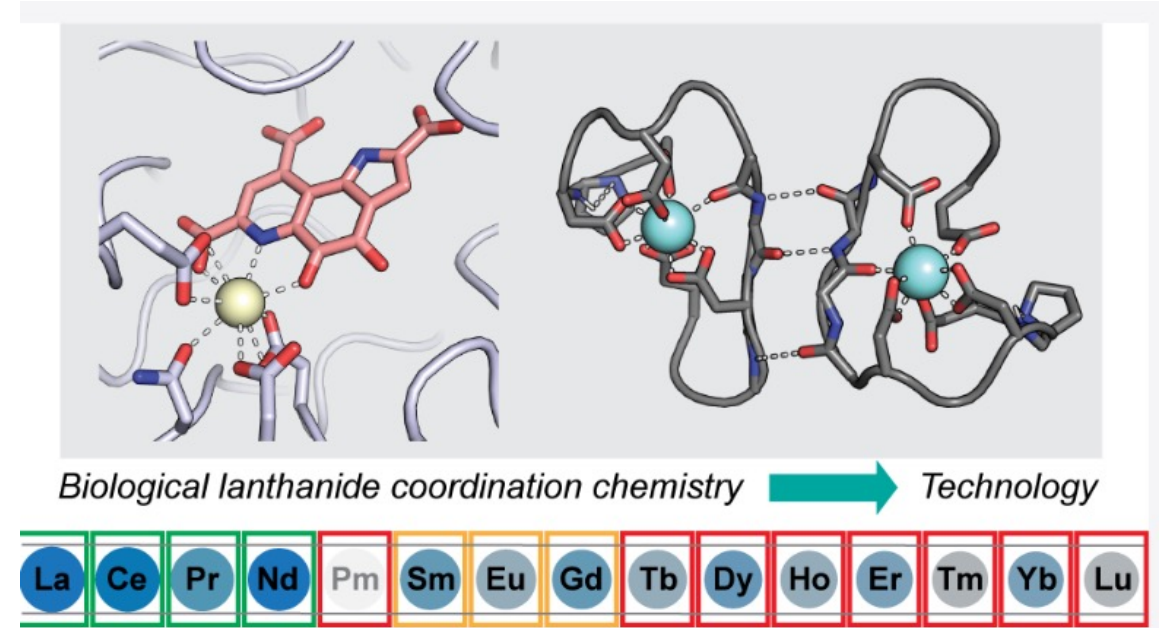
Phytolacca americana

Dicranopteris linearis

2014 : Découverte de l'utilisation des terres rares par les bactéries méthylophiles



Méthylophiles phyllosphériques



Cotruvo et al, 2018; Deblonde et al (2020) inorg. Chem.

2017 : Les bactéries rhizosphériques *Pseudomonas putida* KT2440 ont besoin de TR pour leur croissance

2018 : Découverte d'une protéine : la lanmoduline
- Forte affinité & forte sélectivité pour les TR



intéressant pour des procédés d'extraction des TR

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

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

BIAM-IPM (Catherine Berthomieu), LIEC (Patrick Billard), CEREGE (Blanche Collin)

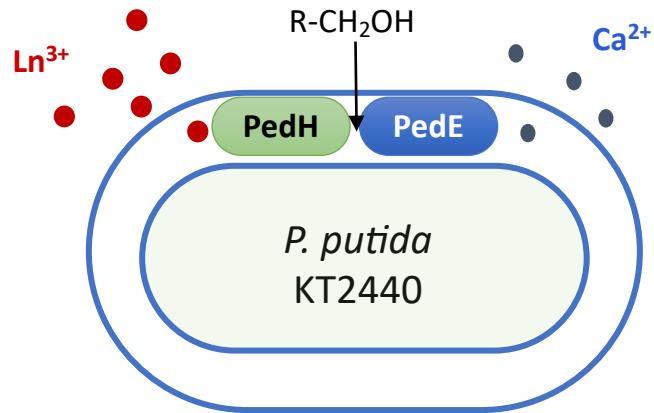


Postdoctorat Laura Picard (18 mois 2022-2024)

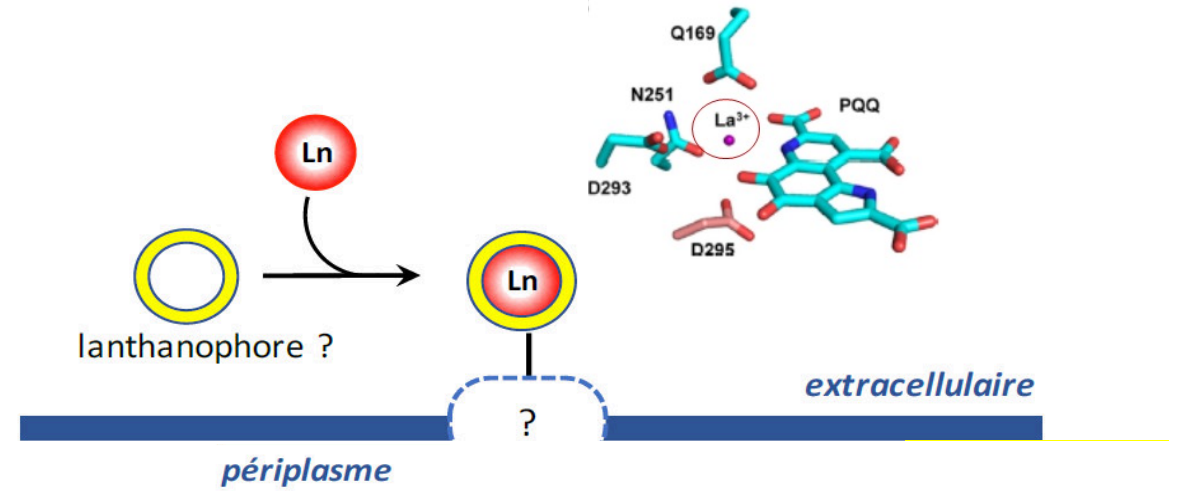
➤ Tâche 1 : Identification de métabolites et protéines interagissant avec les TR chez *Pseudomonas putida*.

Bactérie de la rhizosphère *Pseudomonas putida* KT2440

- Besoin de TR pour sa croissance



- Famille d'enzyme (alcool deshydrogenase) qui utilise les TR comme cofacteurs



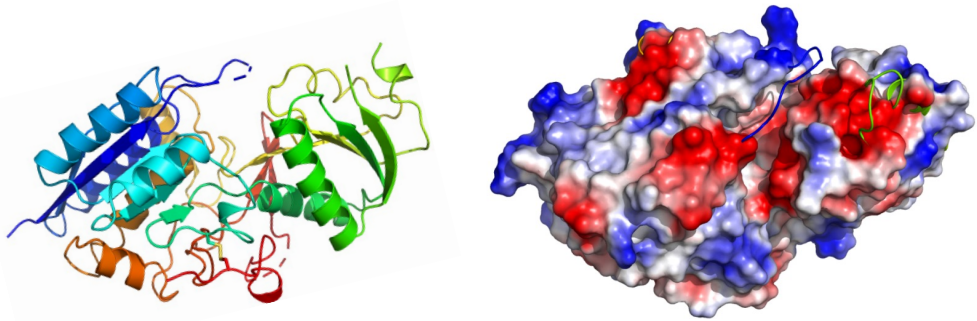
- Objectif : Identification de métabolites chélateurs de TR produits pas *P. putida* : lanthanophore

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

Approche « ciblée »

Implication des TR dans un système de transport (Ped-ABC)

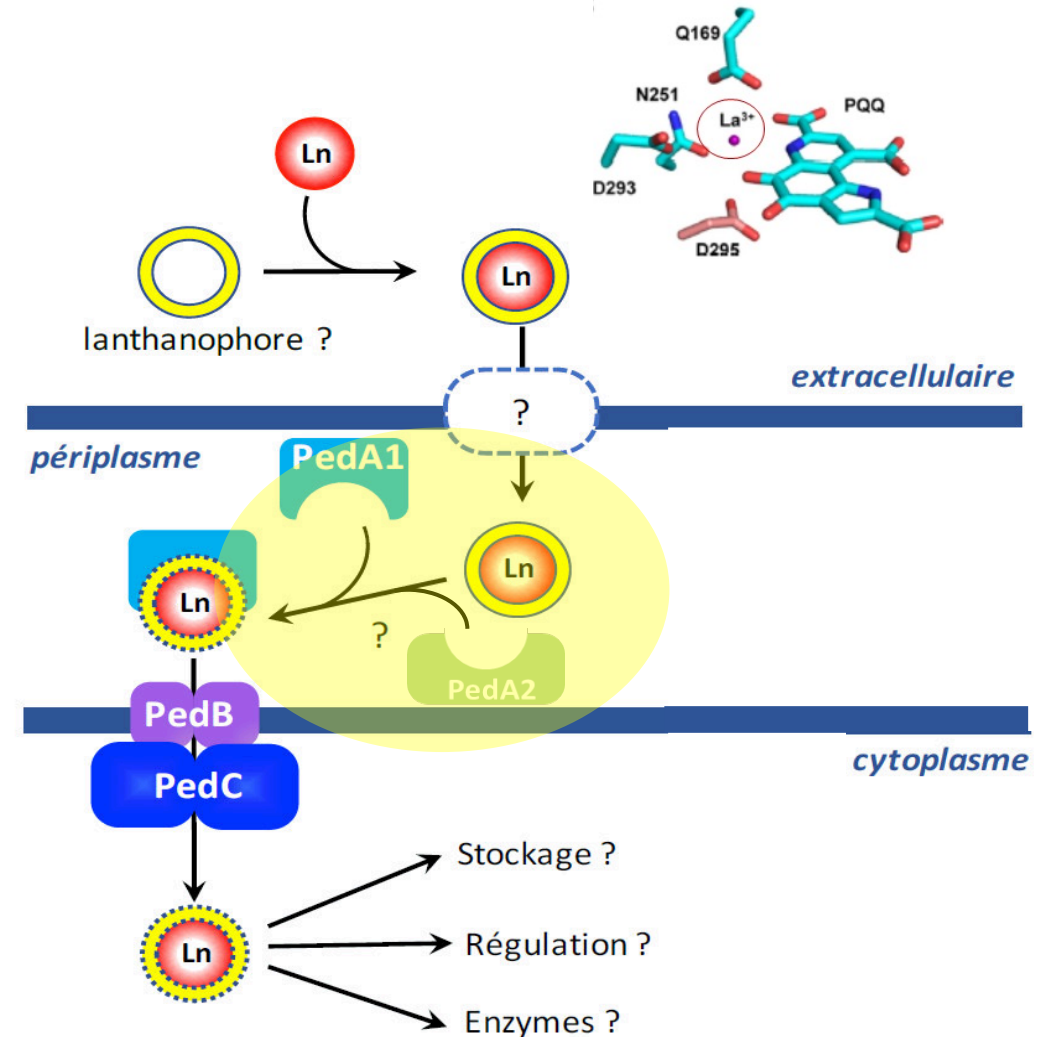
- Identifier un complexe TR – protéine pedA1?



Cristallographie et résolution de la structure de la protéine (Thèse Loïc Aleman (BIAM CEA))

Approche « non ciblée »

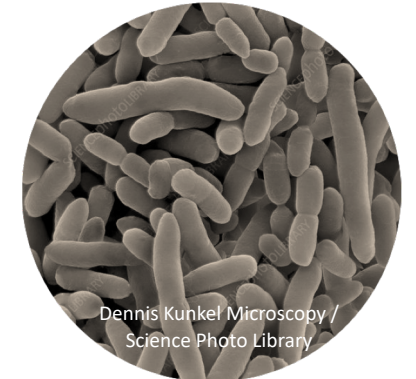
- Identifier des nouvelles protéines impliquées dans le métabolisme des TR chez *P. putida* et les caractériser



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

- 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)

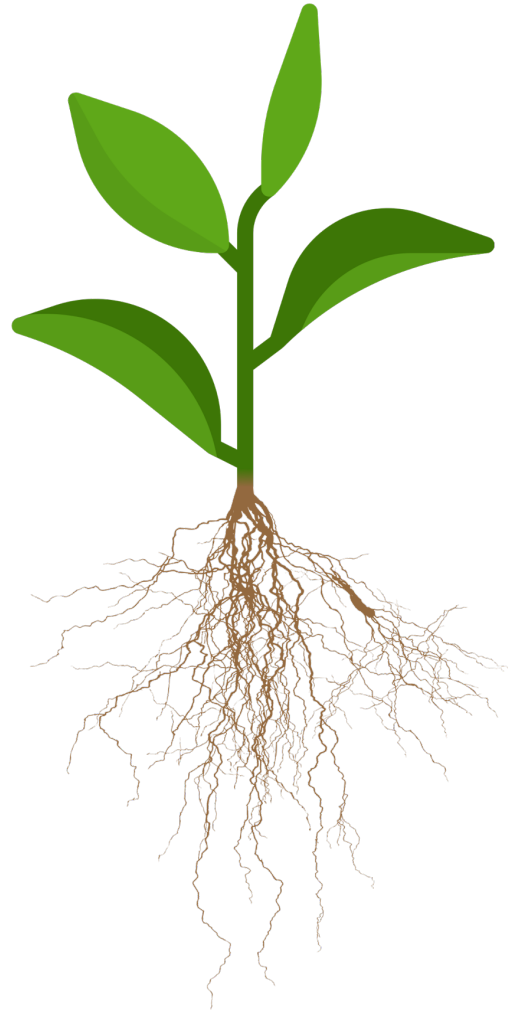


Dennis Kunkel Microscopy /
Science Photo Library



Thèse Youssef Lamwati (2021-2024)

Les plantes hyperaccumulatrices de TR



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



Dicranopteris linearis

3000 mg/kg TR



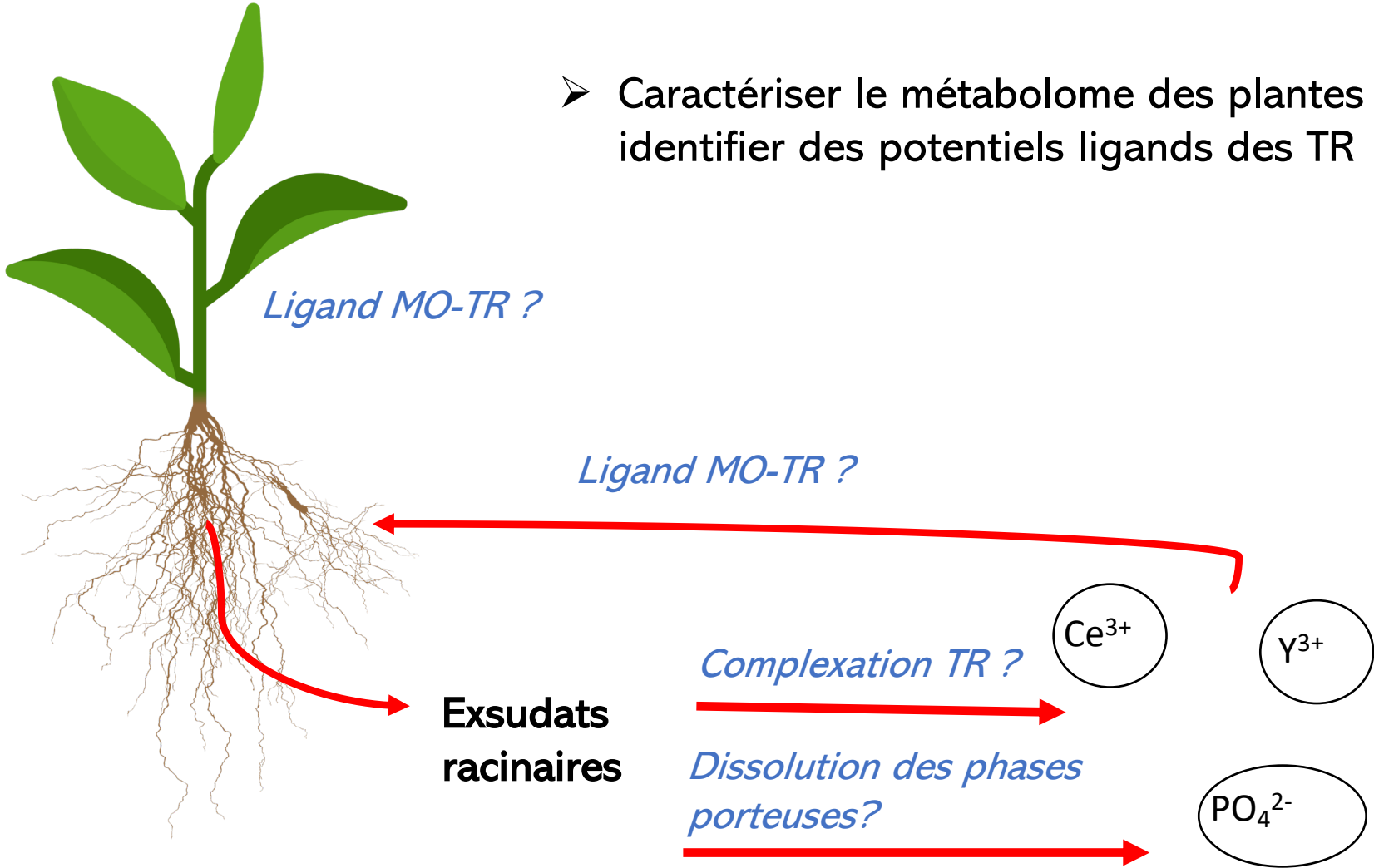
Phytolacca americana

1040 mg/kg TR

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

- Prospection de nouvelles plantes accumulatrices de TR sur sites (dépôts résidus bauxite, sols miniers au Maroc)
- Caractériser la réponse des plantes aux TR

- Caractériser le métabolome des plantes hyperaccumulatrices pour identifier des potentiels ligands des TR



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

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

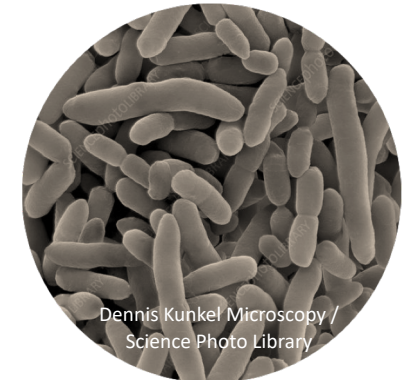
BIAM (Catherine Berthomieu), LIEC (Patrick Billard)

- 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), Université Cadi Ayad (Rachid Hakkou)



➤ Tâche 3 : Essai de lixiviation des extractants ciblés

Métabolites, protéines issus de *Pseudomonas putida* & métabolites issus de plantes



➤ Expériences d'extraction de TR dans 3 résidus utilisant les molécules identifiées en T1 et T2:



Les résidus de bauxite issus de l'extraction de l'aluminium (Gardanne, France),



Les boues de lavage issues de l'extraction des phosphates (Youssoufia, Maroc),



Stériles de mine de charbon (Jerada, Maroc).

➤ Caractérisation et étude de la spéciation des TR dans les résidus pour adapter les extractions



Institut
Méditerranéen pour
la Transition
Environnementale
Aix-Marseille Université

Merci de votre attention



Blanche Collin, Clément Levard, Catherine Keller, Bernard Angeletti, Daniel Borschneck, Perrine Chaurand, Fabrice Colin, Youssef Lamwati



Stéven Criquet



IPM : Catherine Berthomieu, Virginie Chapon, David Lemaire, Nicolas Brémond, Anne Chevalier, Loïc Aleman, Laura Picard

MEM : Pascal Arnoux

JOLIOT : Jean Armangaud



Patrick Billard



Rachid Hakkou

جامعة القاضي عياض
UNIVERSITÉ CADI AYYAD



Mouna Fahr, Abdelaziz Smouni

جامعة محمد الخامس بالرباط
Université Mohammed V de Rabat



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE RABAT
المدرسة الوطنية العليا للمعادن بالرباط
ⵜⴰⵎⴰⵏⵜ ⵜⴰⵎⴰⵏⵉⵜ ⵜⴰⵎⴰⵏⵉⵜ ⵜⴰⵎⴰⵏⵉⵜ | ⵎⴰⵔⵓⵏⵉ ⵏ ⵔⴰⵎⴰⵏⵉⵜ

Mariam El Adnani

MINES-RABAT