Traitement biologique des sols radiocontaminés:

# La phytoremédiation ou la remédiation par les plantes

Pierre CHAGVARDIEFF, PhD
Direction des Sciences du Vivant
CEA/Marcoule

# Phytoremédiation

- La phytoremédiation (grec *phyto*: plante, latin *remedium*: corriger un méfait) est l'utilisation de plantes vertes et de leur microbiote associé, d'amendement du sol et de techniques agricoles pour éliminer, contenir, ou rendre moins toxiques les contaminants environnementaux (Cunningham,1995)

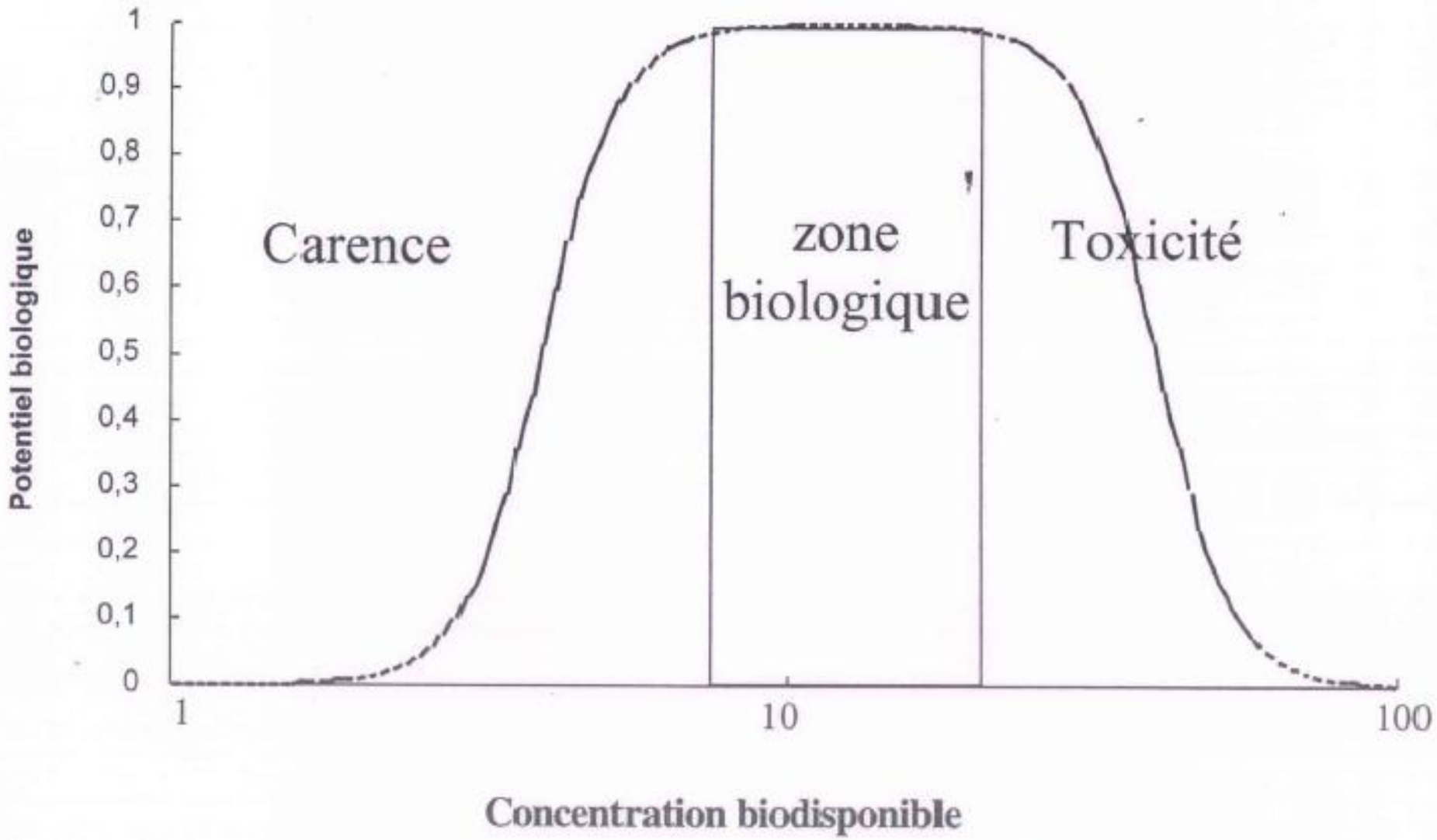
- Problème technologique : Mise au point de méthodes de dépollution efficaces et économiquement viables

- Problématique scientifique : Comportement des végétaux confrontés à des composés toxiques

# Bio-dépollution: procédé biotechnologique utilisant des êtres vivants (bactéries,champignons, végétaux,…) pour combattre une pollution.

- Pollution: « substances présentes dans l ’environnement, en partie à cause des activités humaines, et qui ont des effets délétères sur les organismes vivants » (Moriarty, 1983)

- mais aussi: « la pollution est essentiellement un jugement de valeur sur ce que chacun souhaite trouver dans l ’environnement ; ce jugement est -ou n’est pas- étayé par des données scientifiques et implique presque toujours un choix » (Bang, 1980)


Potentiel biologique
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
Carence
zone
biologique
Toxicité
1
10
100
Concentration biodisponible

| | |
|---|---|
| Co | Vitamine B12 |
| Cu | Cytochromes et hémocyanine |
| Fe | Cytochromes et hémoglobine |
| Mg | Chlorophylle |
| Mn | Cofacteur de l'arginase |
| Mo | Cofacteur de la xanthine oxydase |
| Ni | Cofacteur de l'uréase |
| Se | Cofacteur de la glutathion peroxydase |
| V | Cofacteur de la nitrate réductase |
| Zn | Cofacteur de l'ADN polymérase |

**Exemples de métaux essentiels**

# Formes des métaux dans le sol

- ions libres
- complexes métalliques solubles
- ions échangeables
- métaux liés à des organiques
- composés précipités ou insolubles (oxydes,carbonates, hydroxydes..)

- toxicité dans les sols = f ( biodisponibilité)

# Biodisponibilité

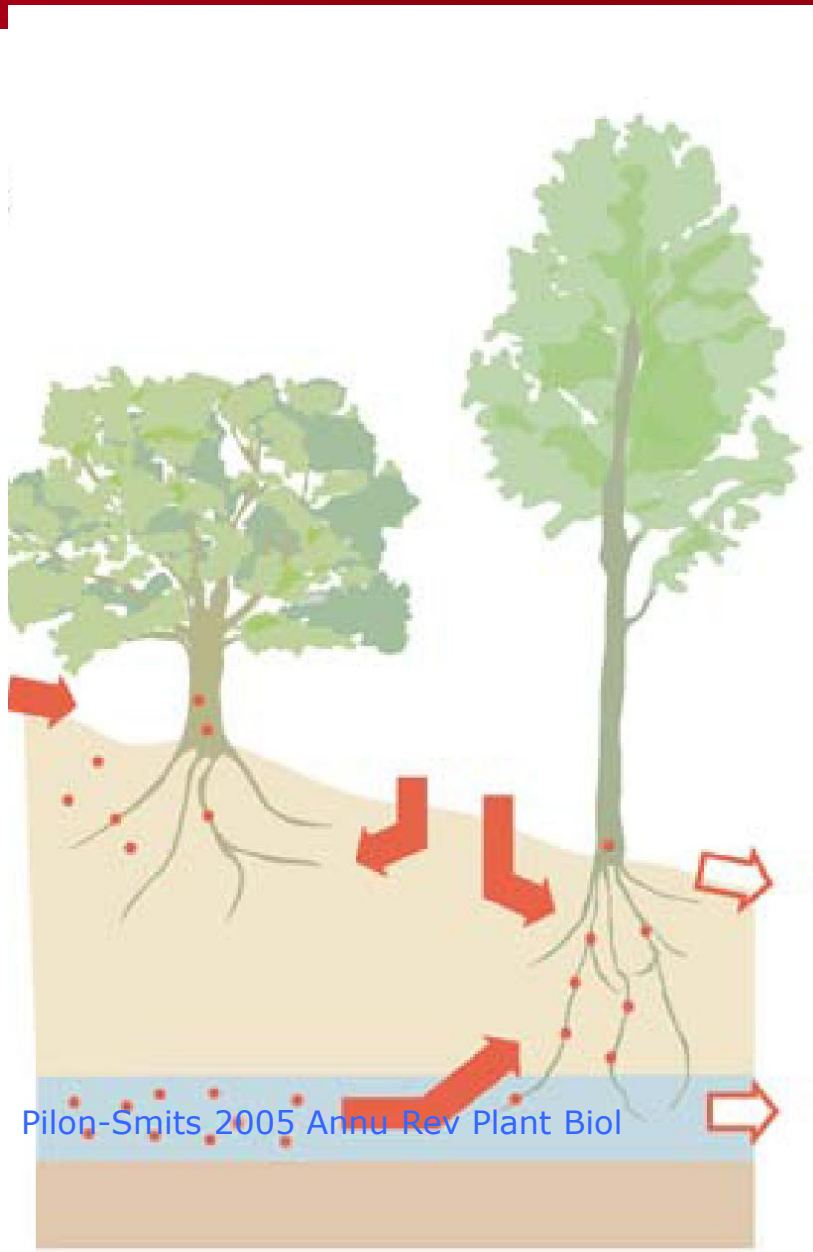
- aptitude au passage d'un compartiment du sol à un organisme vivant
- influencée par:
  - métal (nature, concentration)
  - facteurs physiques: nature, granulométrie, humidité du sol
  - facteurs chimiques: pH,CEC, Eh, MO,argile,...
  - Facteurs biologiques:
  - mycorhizes
  - micro-organismes, dont rhizosphère
  - plantes

# Phytoremédiation

- objectif: stabilisation de la situation
  - phytostabilisation
  - revégétalisation
- objectif: décontamination des sols
  - phytoextraction, phytomining
  - phytovolatilisation
  - rhizofiltration

# Phytostabilisation

- Prévention :
  - Infiltrations
  - Flux horizontaux
  - Érosion
- Conversion en formes moins biodisponibles
  - Précipitation
  - Adsorption racinaire



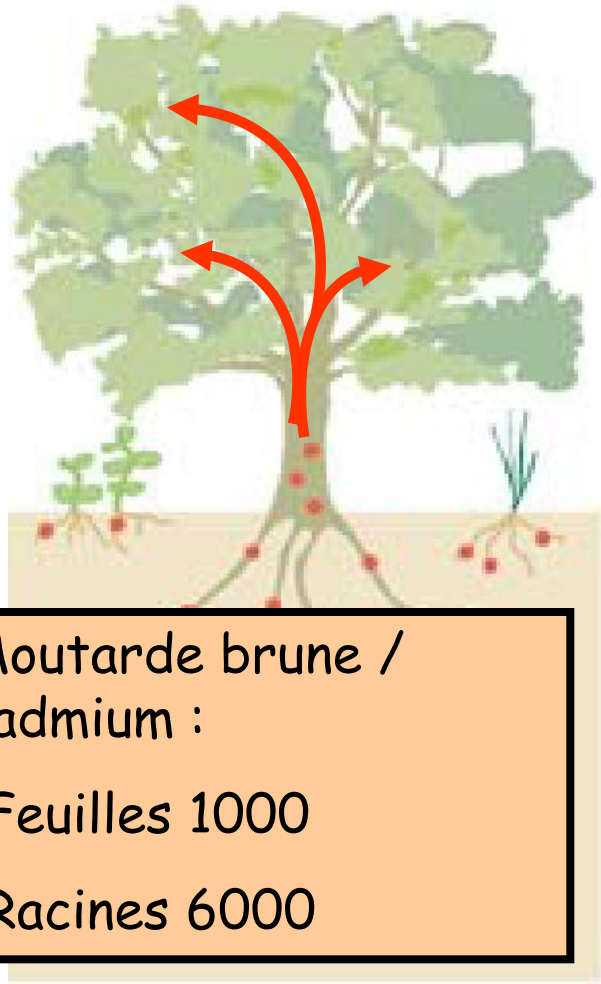

$Pb^{2+}$ et $Cr^{3+}$

# Phytoextraction

- Transfert des polluants vers les parties aériennes:
  - Niveau de bioaccumulation ?
  - Niveau de translocation ?
- Récolte
- Confinement ou recyclage

↓

Phytomining



Moutarde brune / cadmium :

•Feuilles 1000

•Racines 6000

Pilon-Smits 2005 Annu Rev Plant Biol

# Facteurs physiologiques généralement responsables de l'hyperaccumulation

- Séquestration chimique
  - Glutathion, phytochélatines, histidine
- Séquestration subcellulaire
  - Compartimentation vacuolaire
- Compartimentation tissulaire
  - Translocation racines / feuilles
  - Accumulation dans les trichomes
- Tolérance au stress oxydatif
- « Insensibilité biochimique » aux métaux lourds
  - Cysteinyl-tRNA synthétase d'*Astragalus bisulcatus*

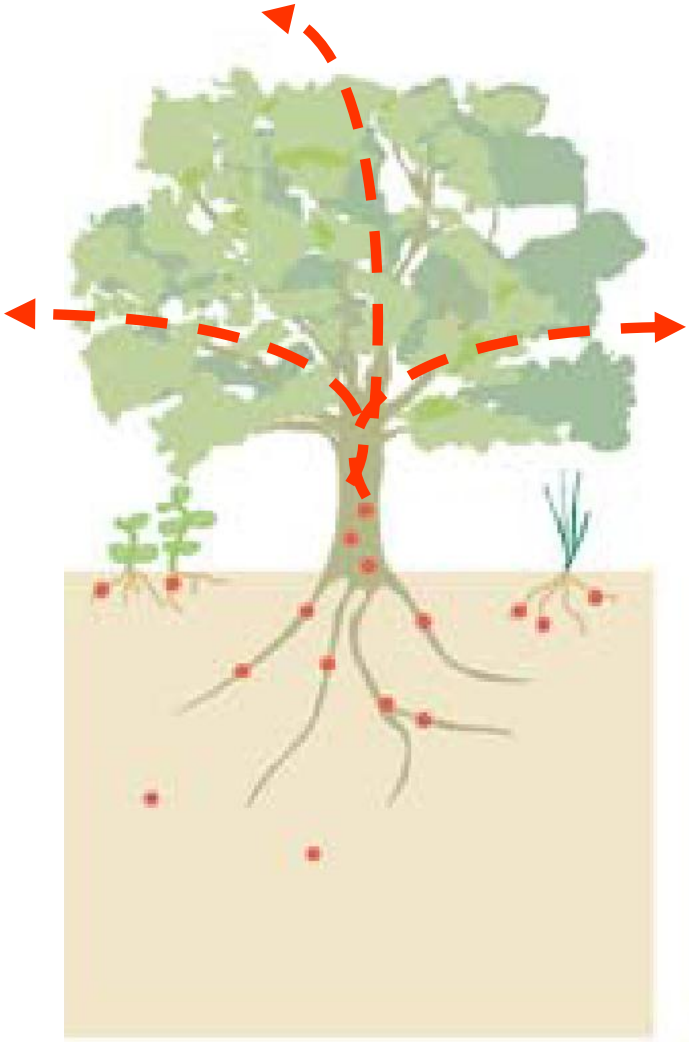
# Phytovolatilisation

- Transfert des polluants vers les parties aériennes
- Volatilisation et dilution dans l'atmosphère

Composés volatils :

•Hg, dérivés du Se

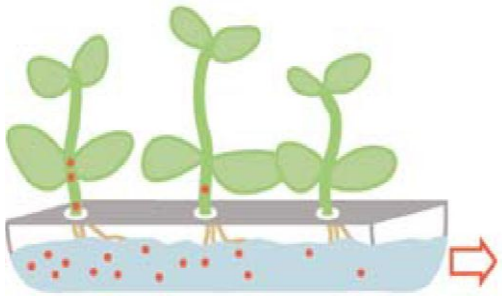
•TCE



Pilon-Smits 2005 Annu Rev Plant Biol

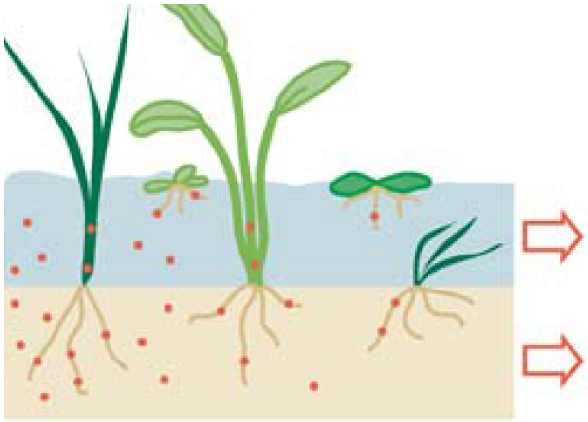
# Rhizofiltration

- Extraction des polluants en milieu aqueux



Rhizofiltration

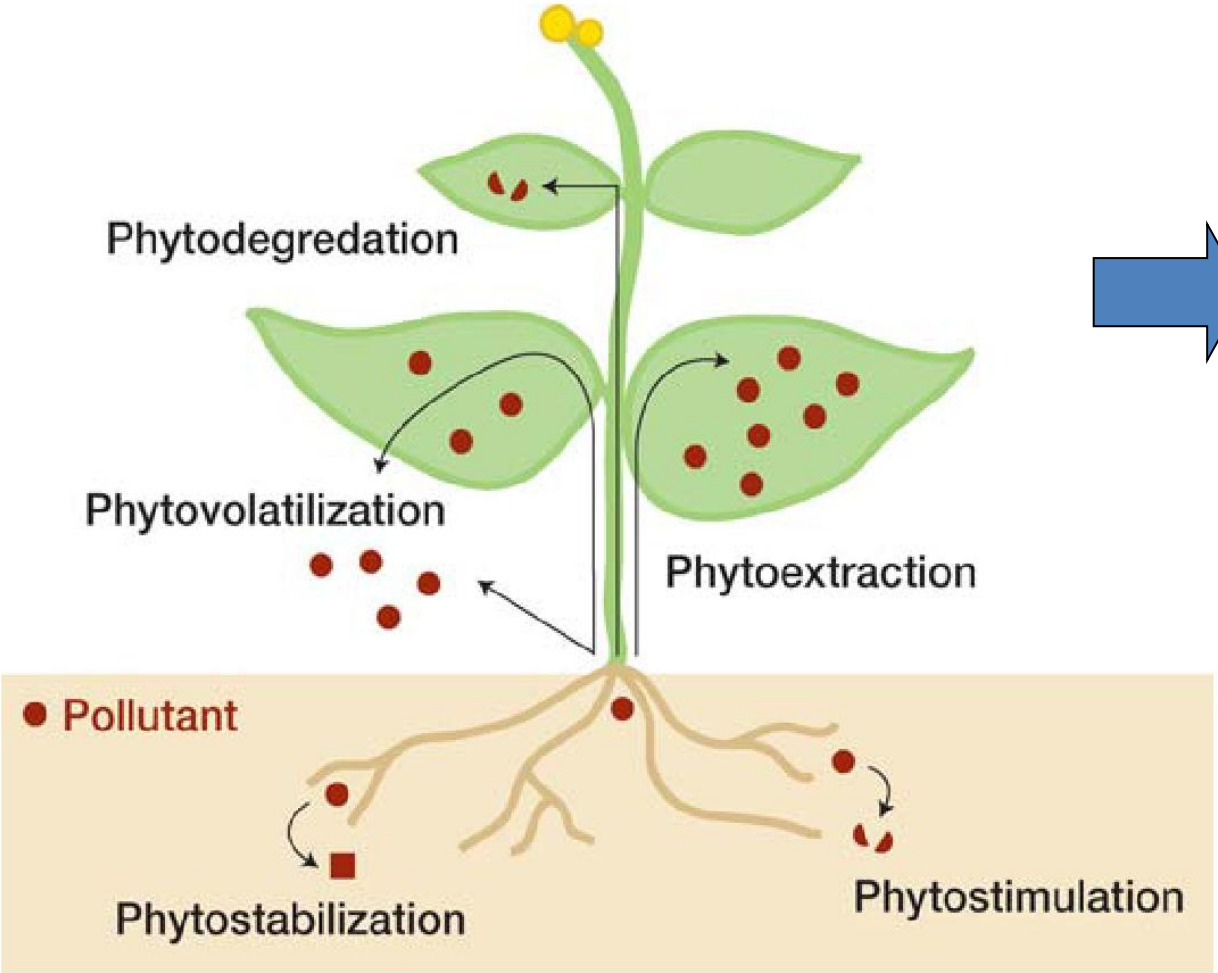
Effluents industriels



Constructed wetland

Pilon-Smits 2005 Annu Rev Plant Biol

# Des mécanismes additifs




Éventuellement en association avec de la remédiation classique



Pilon-Smits 2005 Annu Rev Plant Biol

# Les plantes candidates: caractères recherchés

- tolérance
- productivité
- système racinaire développé/transpiration
- stockage racinaire et/ou migration foliaire
- techniques culturales faciles

# Compromis biomasse / accumulation

| Sol contaminé en Zn + Cd | Biomasse X Teneur | Rendement d'extraction |
|---|---|---|
| Moutarde + EDTA | 10 t / ha 500 mg / kg | 5 kg / ha |
| Thlaspi+ EDTA | 5 t / ha 25 000 mg / kg | 125 kg / ha |

Conclusions différentes en fonction du couple espèce / pollution et des contraintes agronomiques

# De la racine vers les feuilles: cas du zinc

20 mg/kg

200 mg/kg

Plante excluante
(la plupart des espèces,
*Arabidopsis thaliana*)

1000 mg/kg

20 mg/kg

Plante hyperaccumulatrices
(quelques dizaines d'espèces,
*Arabidopsis halleri*)

# Les plantes candidates: les mécanismes

- absorption racinaire: stimulée ou réduite
  - rhizosphère:débris cellulaires, mucilages, exsudats (ac.org.,histidine), microorganismes
- transport: exclusion/affinité/sélectivité
- détoxification/hyperaccumulation:
  - peptides riches en cystéine: phytochélatines
  - protéines complexantes: métallothionéines

# Decrease / Increase Cs biodisponibility in the rhizosphere

**AHA ($H^+$) family**

*AHA1* roots

*AHA2* roots

Other AHA

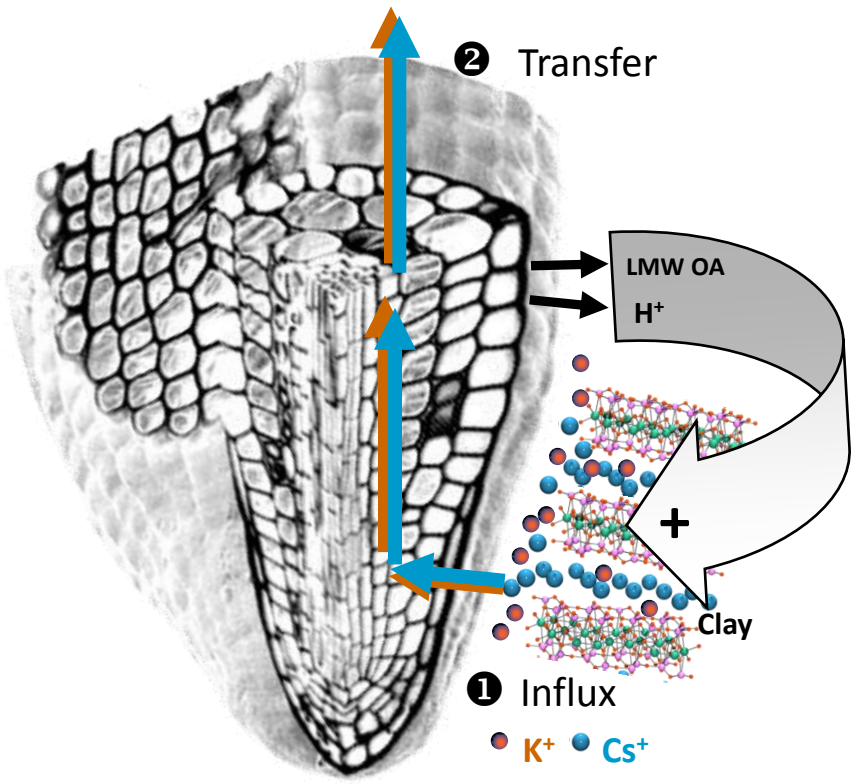
**organic Ac.**

*ALMT*

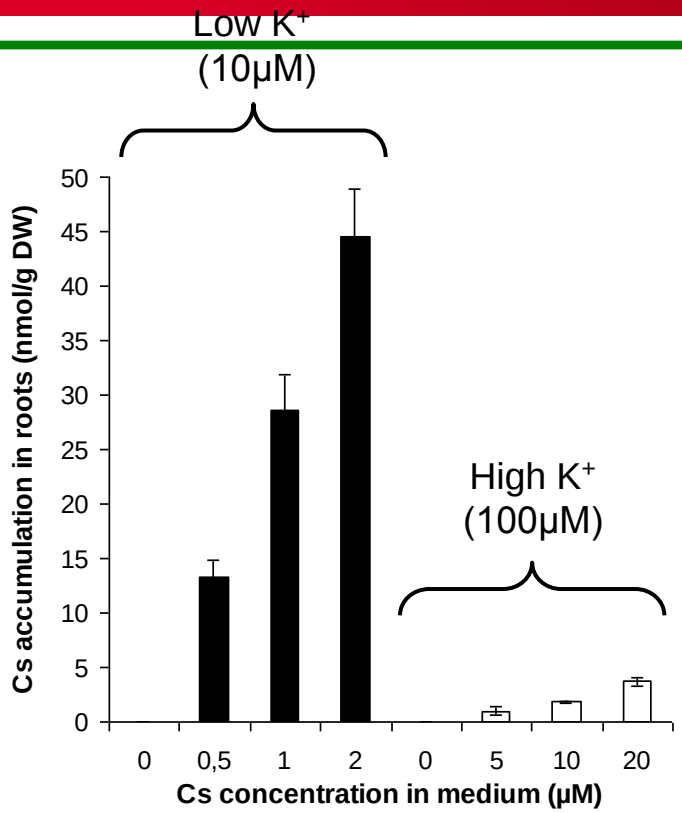
*MATE*

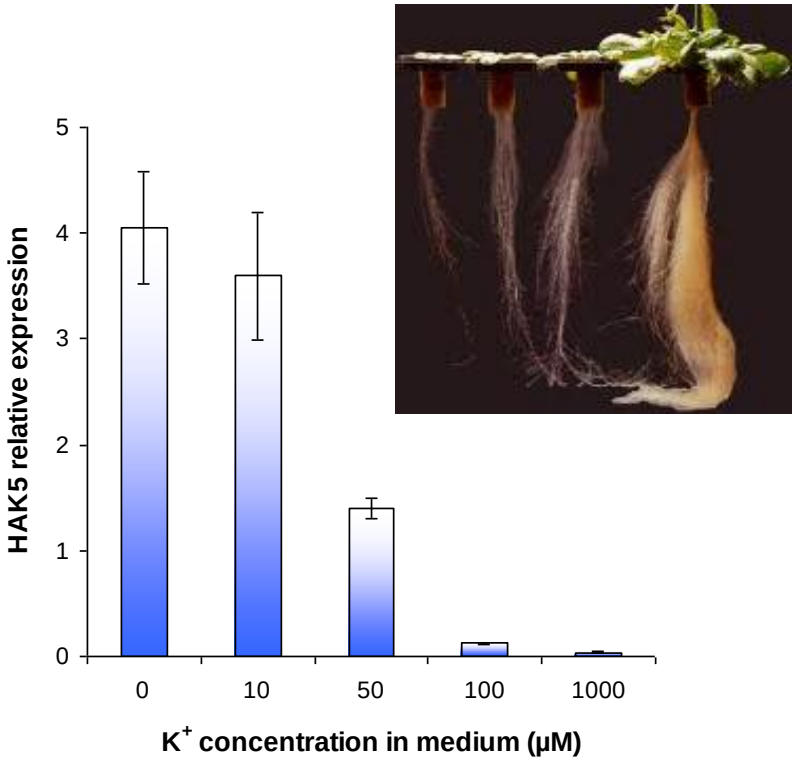
*FRD3*

...



# Cs uptake in *Arabidopsis* according to K concentration



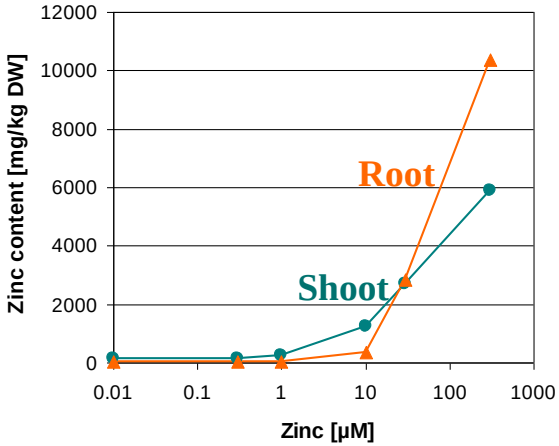




**In roots, Cs uptake increases under low $K^+$**

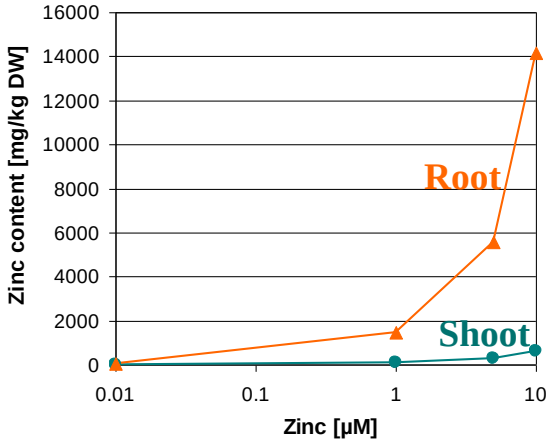
***HAK5* is up-regulated in response to high Cs**

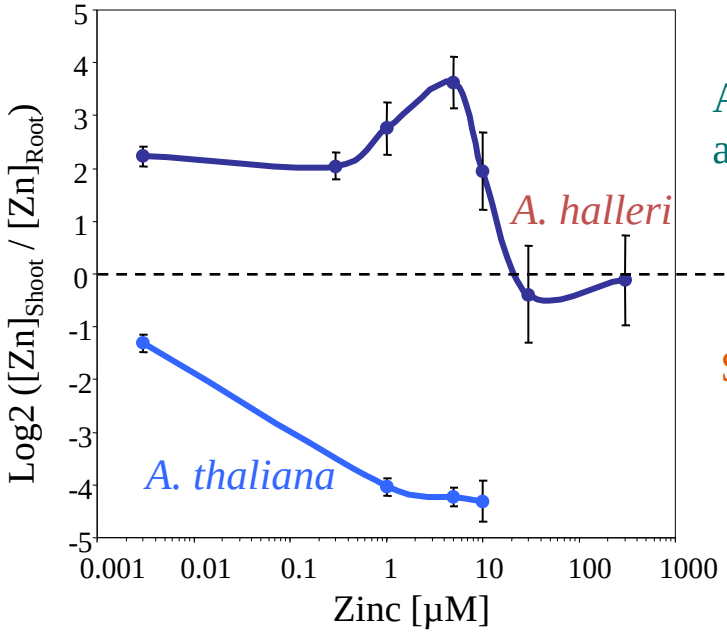
# Accumulation du Zn chez *Arabidopsis thaliana* et *halleri*

Accumulatrice tolérante



Excluante non-tolérante




Accumulation dans les parties aériennes

Séquestration dans les racines

Talke I., Hanikenne M. and Krämer U. (2006) Plant Physiol. **142**:148-67

# Phytoremédiation

- Traitement biologique des sols

Restauration de l'usage des sols:

- Différentes stratégies:

  - ne rien faire
  - restaurer un usage malgré la contamination
  - restaurer un usage en diminuant  la contamination

# Restaurer un usage malgré la contamination:

Stratégie des contre-mesures:

- Enfouissement profond
- Espèces végétales peu accumulatrices
- Utilisation d’amendement (MO, argile) et fertilisants (K)

# REX Tchernobyl

1-1 nombreuses publications sur le transfert de Cs et/ou Sr à travers l'Europe:

- Bélarus: blé printemps (x1,6)
- Ukraine: trèfle, PdT, céréales (x10 TF)
- Russie: maïs (x2)
- Suède: ray-grass (x3 microorganismes)
- Grèce: plantes aquatiques (x9)
- Bulgarie: triticale (TF 0,3-1,6) et avoine (0,1-0,35)
- Croatie: blé (1/2 vie écologique= 2,24 ans)

# REX Tchernobyl

1-2 méta-analyse des TF Cs *(Willey NJ,2010, Radiat Environ Biophys,49,613-623*):

= taxons: monocots 0,035 / dicots 0,085

= superordres:

- Liliacées 0,037
- Rosacées 0,065
- Caryophyllacées 0,125
- Astéracées 0,08

= espèces: *Amaranthus retroflexus* x117 *Allium tuberosum*

= variétés Paddy x100

# REX Tchernobyl

- Agriculture: (700000ha Russie), [Cs] végétaux cultivés
  - MO, fertilisants, amendements: / 2 à 3
  - Travail sol: /1,5
  - Systèmes racinaires patûrages: /3 à 8
  - Végétaux peu accumulateurs: /5 à 10
  - Traitements-process récoltes: /5

  Bilan: t1/2 décroissance [Cs]= 2 à 6 ans
- Forêts: (10000km2 Russie 37 kBq/m2)
  - Interdictions

# REX Tchernobyl

- 2- Bois et forêts:

  = Biomasse enterrée pour faciliter l'accès aux zones contaminées (effet d'écran sol)

- 3- Mesures de réhabilitation:

  =Impact des changements politiques (mur de Berlin, fédération de Russie,…)

# REX Tchernobyl

- Procédé phytoremédiation = radio-agronomie

- Résultats = f( sols, plantes, climat, précipitations et migration, fertilisation et amendements,…)
- Résultats labo et pots pas extrapolables

# Contexte du post-Fukushima

- Terres cultivables précieuses
- Valeur culturelle du paysage
- Devenir des populations évacuées
- Reconquête médiatique des zones peu contaminées
- Reconquête économique de la zone évacuée

# Quels volumes à traiter ou stocker? Impacts sur la fertilité et les usages?

Sols: X 2000 à 15000 Tour Montparnasse
Biomasse: 0,5 à 4 Mt/an

# Modélisation du bilan économique de la production de bioénergie à partir de biomasse radiocontaminée

Cf *Vandenhove H et al, 2002, Biomass and Bioenergy,22,421-431*

Modélisation des coûts: Bélarus, taillis saules, Cs137

- Rentabilité des cultures ligneuses:

  +++: rendement (6t/ha), récolte, prix vente biofuel (40€/t)

  - -: travail, machines.

- Rentabilité conversion énergétique:

  Chaleur +, électricité +/-; déchets: faible impact

# Et en France pour la réhabilitation post-accidentelle?

- Guide d'aide à la décision pour la gestion du milieu agricole en cas d'accident nucléaire
- Technologies de réhabilitation des sols
  - Technologies clés 2015 du MINEFI: « 35. Technologies pour la dépollution in situ des sols et des sites pollués »
- Gestion intégrée des sols, des eaux souterraines et des sédiments pollués
  - Feuille de route de l'ADEME (sauf radionucléides!)
- Recommandations de l'Académie des Sciences (Solidarité Japon, tome III, mars 2012)

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

ACTA

GUIDE D'AIDE A LA DECISION POUR LA GESTION DU MILIEU AGRICOLE EN CAS D'ACCIDENT NUCLEAIRE

avec la collaboration de :

ARVALIS - Institut du végétal
CTIFL – Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes
ENTAV – ITV France - Institut de la Vigne et du Vin
IFIP - Institut du Porc
Institut de l'Elevage
ITAVI - Institut Technique de l'Aviculture

avec le financement de :
la Direction Générale de l'Alimentation (DGAL)
l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PÊCHE

asn AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

- 2.3.3 Mise au point de techniques physicochimiques de décontamination, choix de cultures appropriées […] soit pour leur aptitude à concentrer ou ignorer le césium
- 4. Développer des moyens industriels de décontamination et de réhabilitation des sols s'appuyant sur des technologies validées sur des sites de démonstration
- 5. Constituer et entretenir des stocks de ressources génétiques végétales, spécifiquement sélectionnées pour leur capacité à concentrer des radionucléides

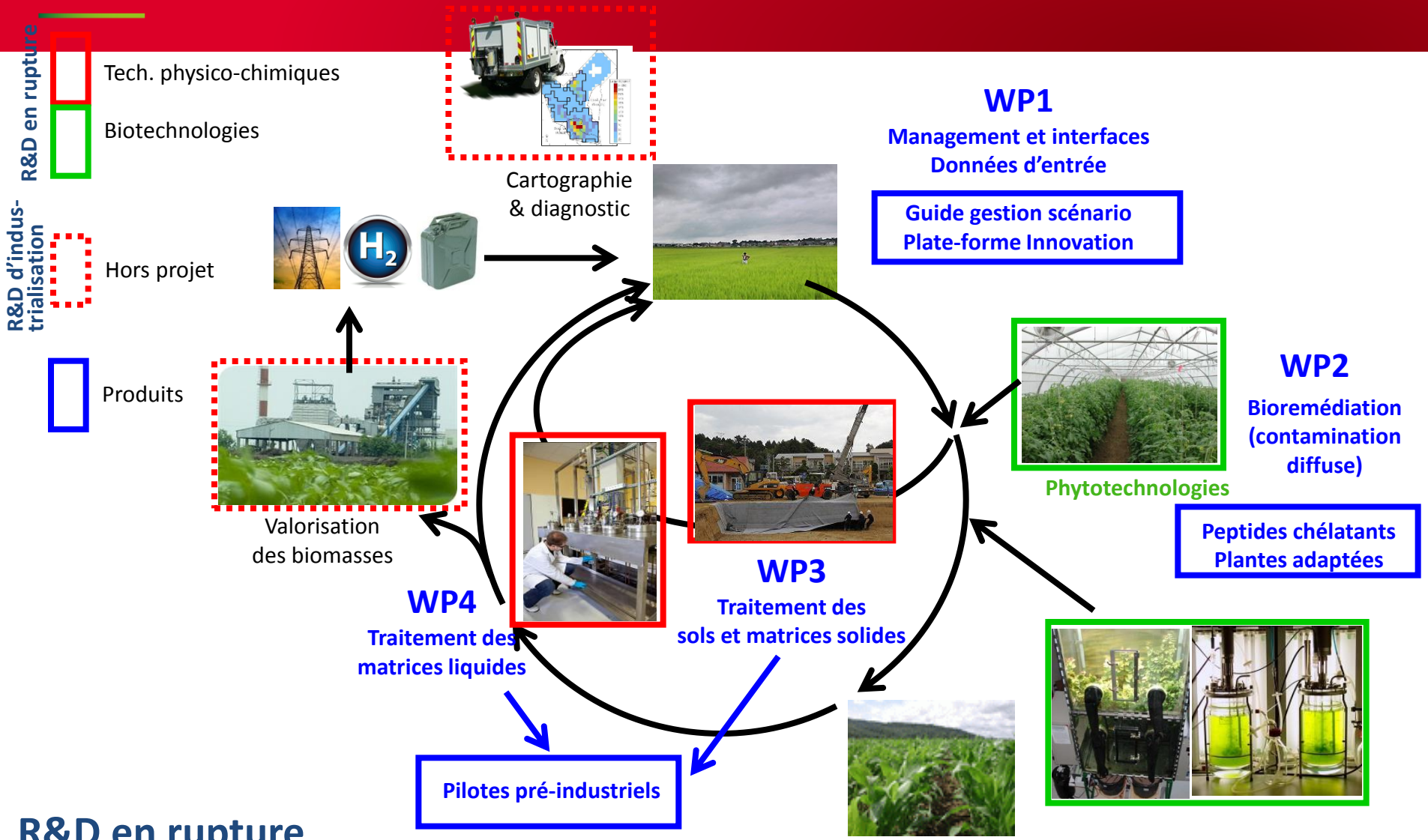
# GENÈSE DU PROJET

Appel à projets "Recherche en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection" (RSNR) opéré par l'

# Projet DEMETERRES

**DE**veloppement de **M**éthodes bio- et **E**co-**TE**chnologiques pour la **R**emédiation **R**aisonnée des **E**ffluents et des **S**ols en appui à une stratégie de réhabilitation post-accidentelle

# Principe DEMETERRES: transférer sélectivement pour concentrer




## R&D en rupture

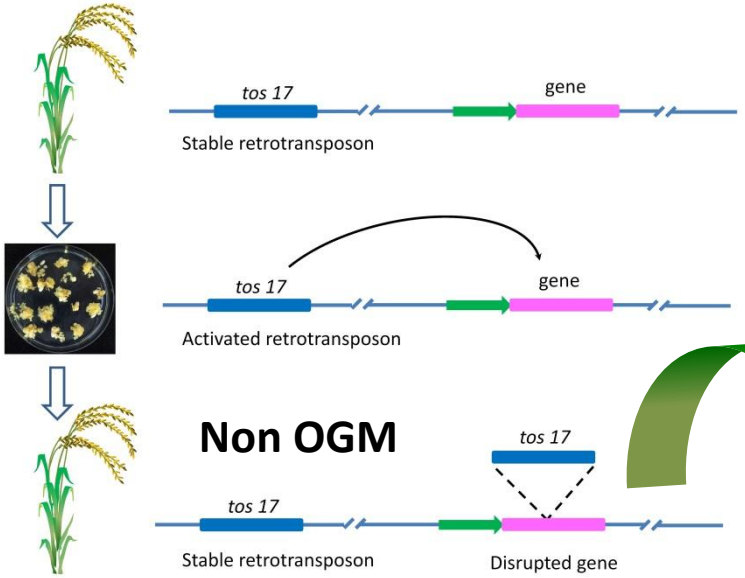
**Développement de phytotechnologies et éco-procédés dédiés aux:**

- **éléments peu explorés (radionucléides dont Cs)**
- **matrices environnementales contaminées en surfaces/volumes jamais traitées industriellement**

# Tests on contaminated soils

cirad

**Soils from Fukushima**



# Conclusion

- Problématique scientifique : Comportement des végétaux confrontés à des composés toxiques

→ Approches pluridisciplinaires (physiologie, agronomie, …) renouvelées grâce à des outils technologiques innovants:

✓ -omiques,

✓ nouvelles techniques génétiques: transgénèse de précision, cisgénèse, intragénèse, sélection inverse,…

- Problème technologique : Mise au point de méthodes de dépollution efficaces et économiquement viables

→ faisabilité démontrée, mais f(modèle économique des services écosystémiques):

✓ Impact direct économique ( gels productions vendues, balance commerciale,…)

✓ Valeur du sol restauré

✓ Valeur des déchets

✓ Acceptabilité sociétale (impacts et solutions)

# Merci pour votre écoute