

Stratégies de remédiation des sols pollués

La phytoremédiation

Jean Louis MOREL

*Laboratoire Sols et Environnement UMR 1120 INPL / INRA
GISFI*

Introduction

La pollution des sols

- **Activités agricoles**

- *pesticides, phosphore, azote*

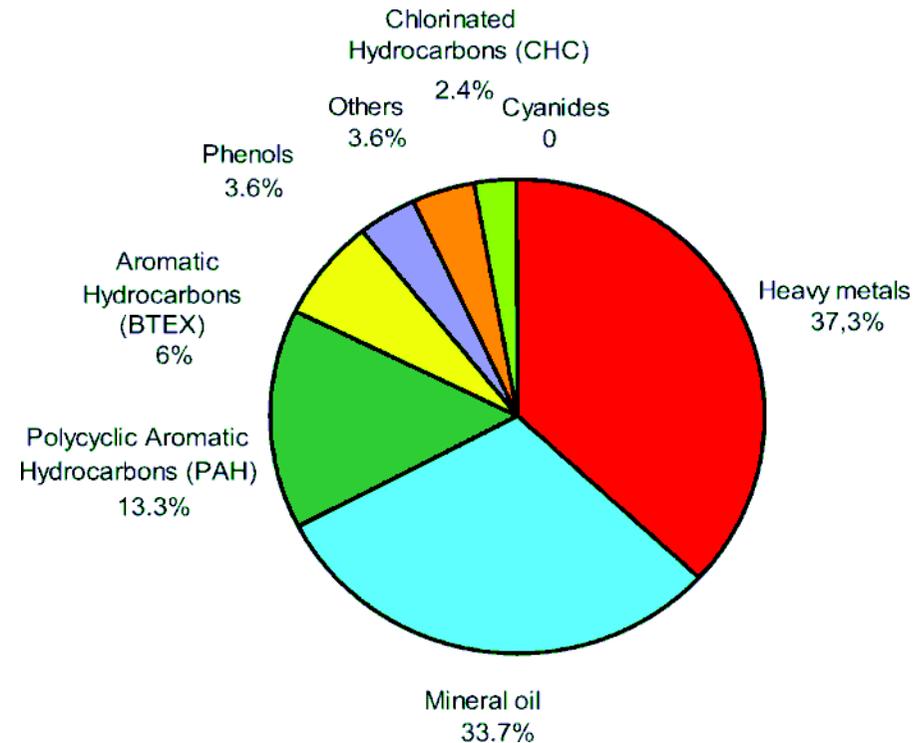
- **Activités urbaines et industrielles**

- *polluants organiques*

- Hydrocarbures pétroliers
 - supercarburant, gasoil, kérosène, white spirit
- HAP, BTEX*, PCB, Solvants halogénés

- *éléments en traces*

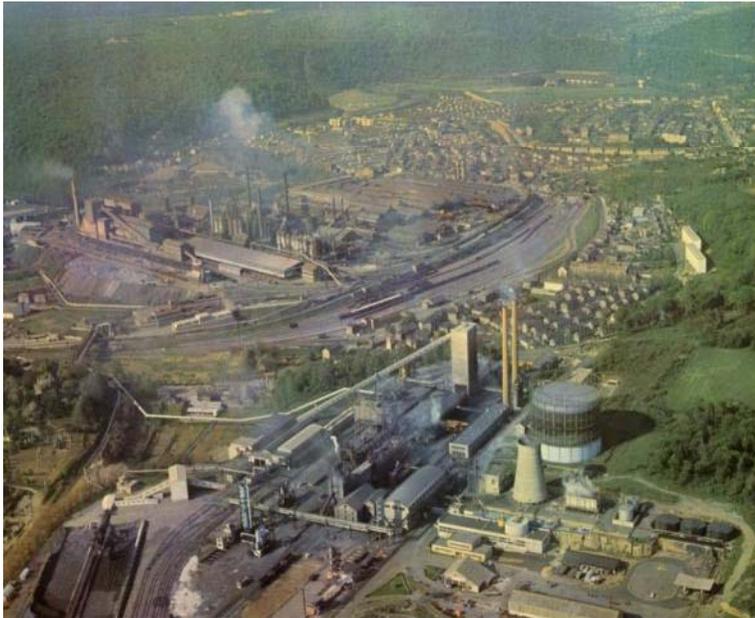
- Métaux : Cu, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Zn, Cd, Hg, Pb...
- Non métaux : B, Se, As...
- Radionucléides : Am, Cs, Nb, Ni, Np, Pu, Sr, Tc, U...



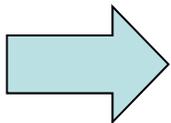
Source : Agence Européenne de l'Environnement

*benzène, toluène, éthylbenzène, xylène

Pollutions locales : sites industriels



- **Technosols**
 - *Matériaux technologiques*
 - *Hétérogènes*
 - *Compactés*
 - *Contaminés*
 - *Fonctions altérées*



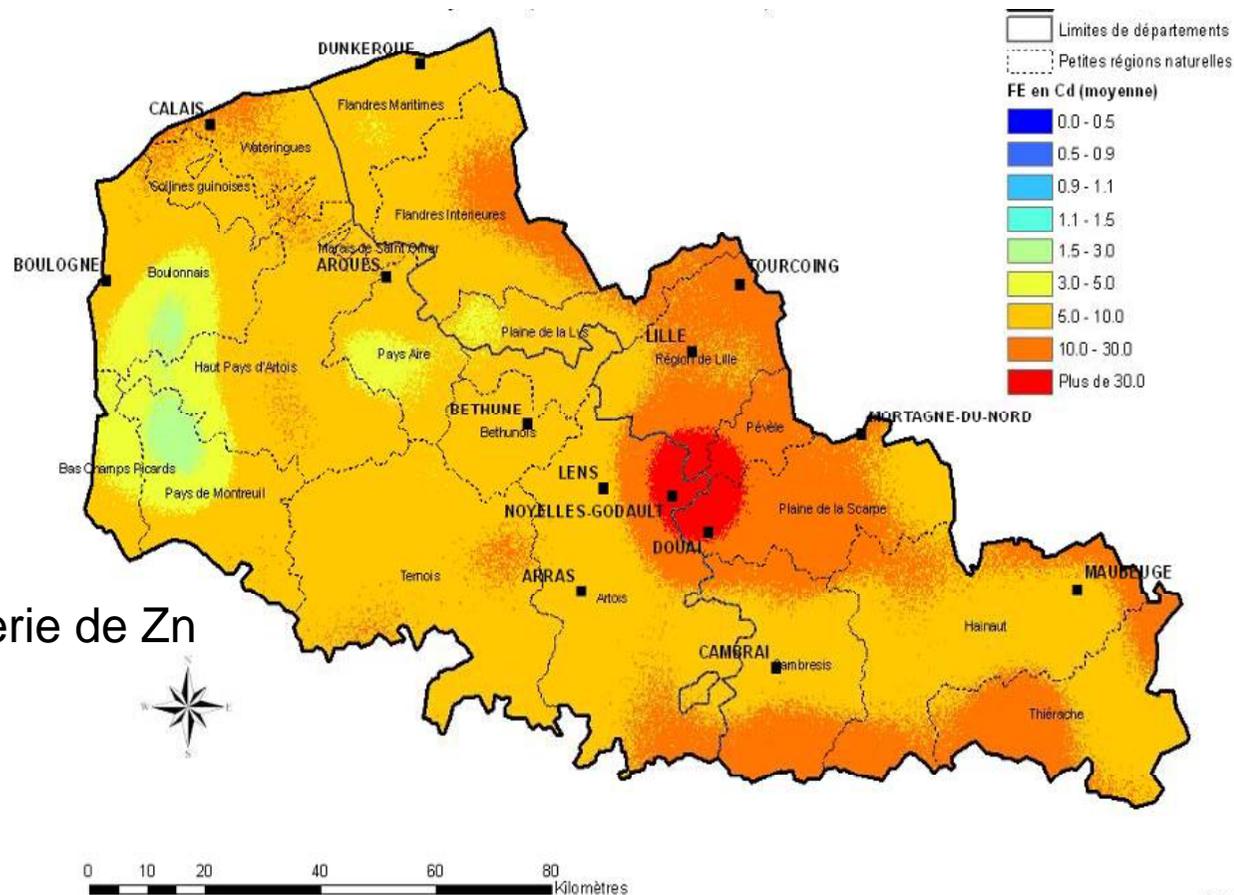
Pollutions locales en milieu urbain : métaux lourds dans les sols de jardins

105 sols de jardins		(Schwartz, 1993)				
<i>Moselle - Est</i>	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	
Moyenne	1,0	27	19	59	138	
Minimum	0,2	4	4	1	37	
Maximum	5,3	181	56	340	518	
18000 sols agricoles						
<i>Allemagne</i>	(CröBman <i>et al.</i> , 1992)					
	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	
Moyenne	0,4	15	15	36	67	

Deux fois plus de métaux dans les sols de jardins que dans les sols agricoles

Pollutions diffuses : rejets industriels atmosphériques

Facteur d'enrichissement en Cadmium par rapport au fond pédo-géochimique dans la région Nord – Pas de Calais



Metaleurop : fonderie de Zn

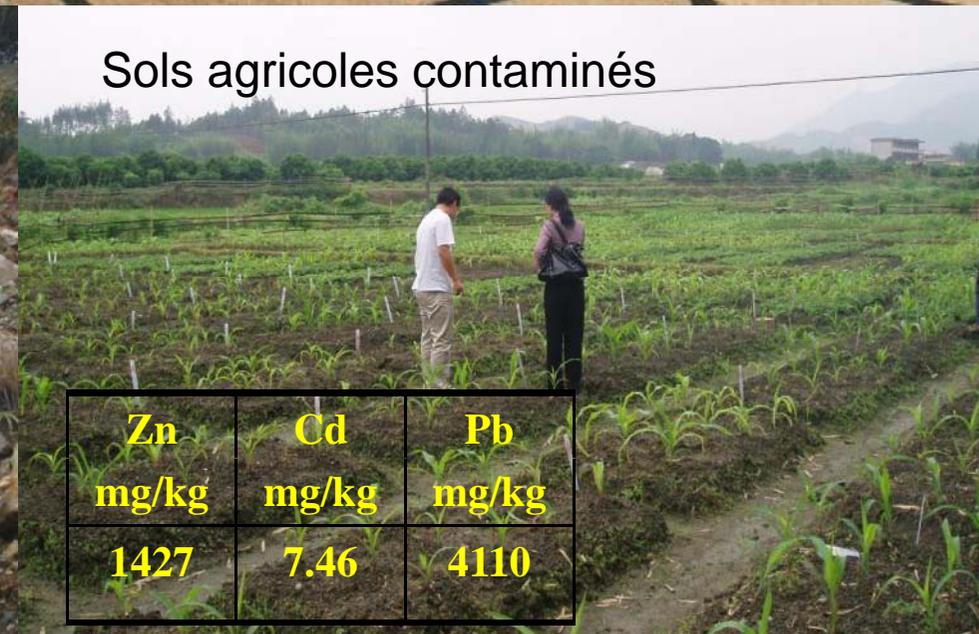
Sources : Villanneau, 2007
Sterckeman et al., 2006

Pollutions diffuses : effluents de sites miniers (Zn, Pb; Chine)

Site minier



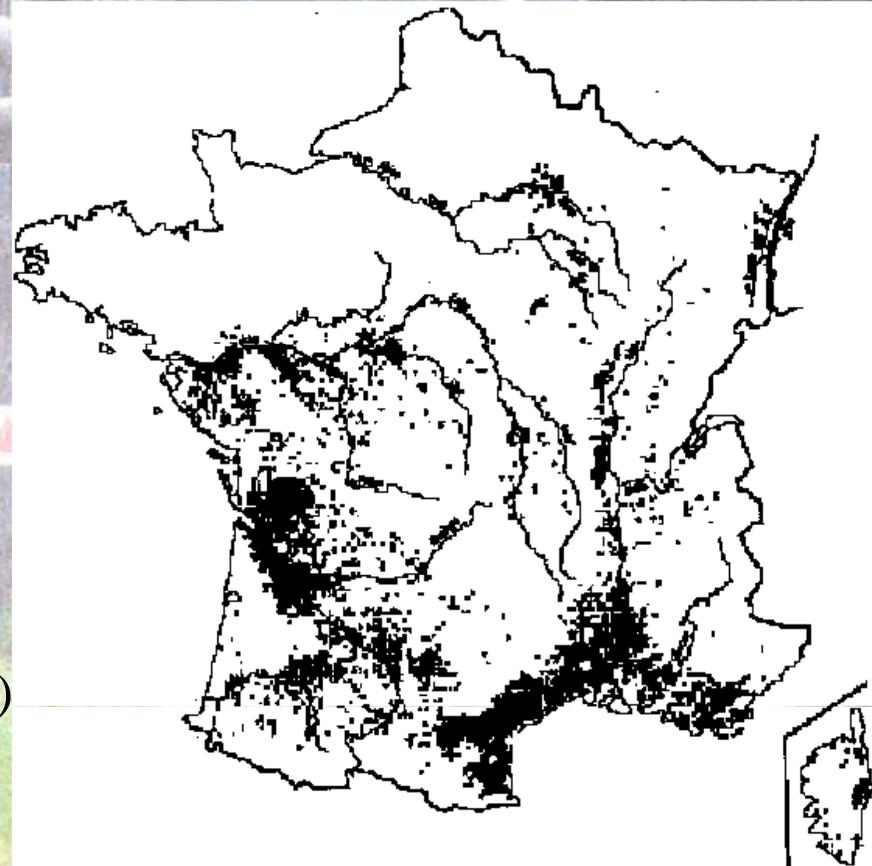
Sols agricoles contaminés



Zn	Cd	Pb
mg/kg	mg/kg	mg/kg
1427	7.46	4110

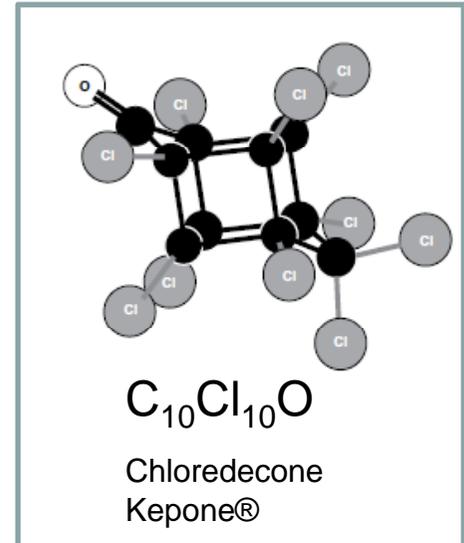
Pollutions diffuses : contamination des sols viticoles par le cuivre

- 850 000 ha
- bouillie bordelaise ($\text{CuSO}_4 + \text{Ca(OH)}_2$)
- 6 traitements en moyenne
- jusqu'à $500 \text{ mg Cu kg}^{-1}$
(valeur limite 100)



Localisation de la culture de la vigne

Pollutions diffuses : la chlordécone aux Antilles



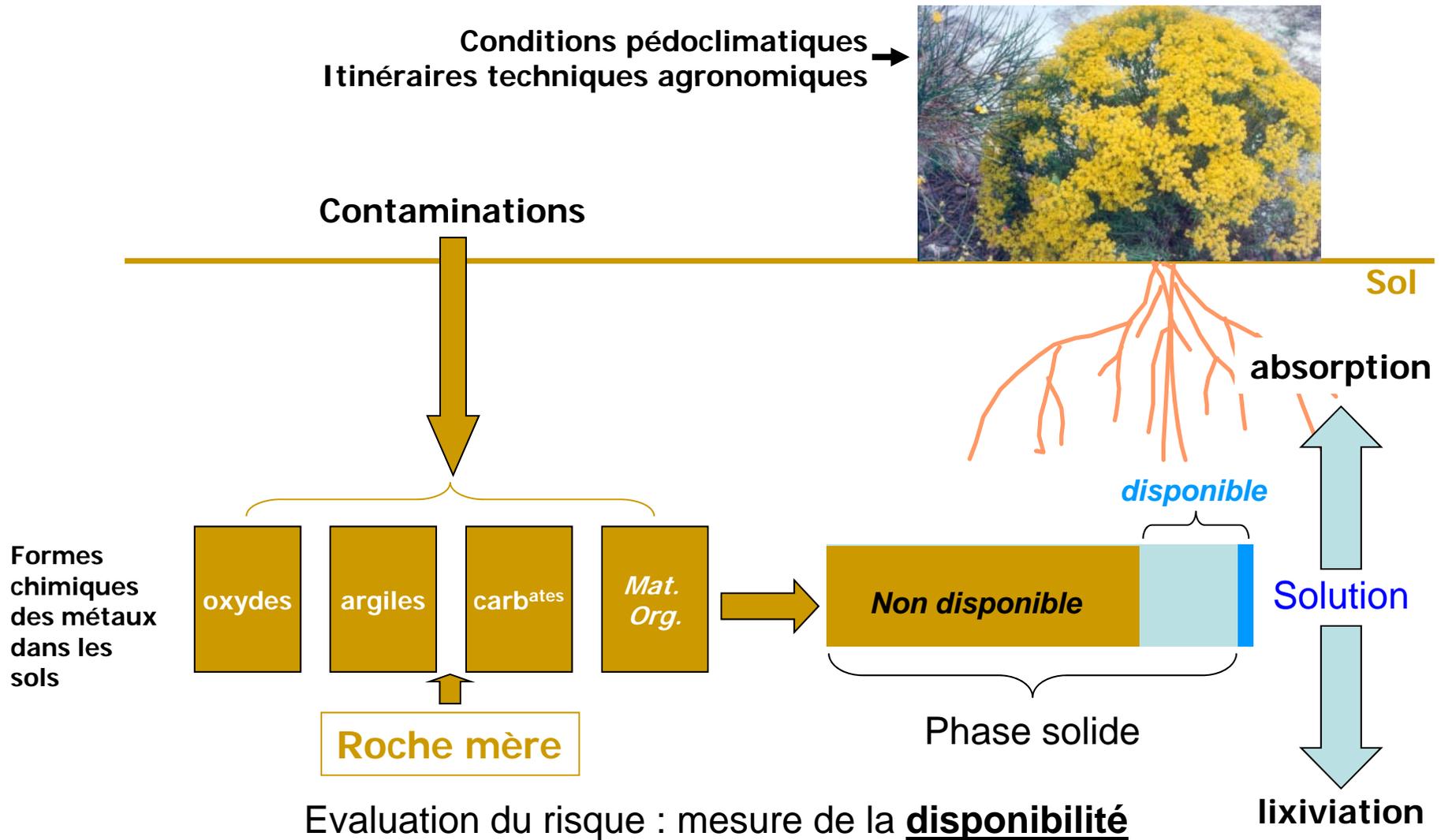
Insecticide : contre le
charançon du bananier
(*Cosmopolites sordidus*)

Utilisé entre 71 et 93

16 000 ha

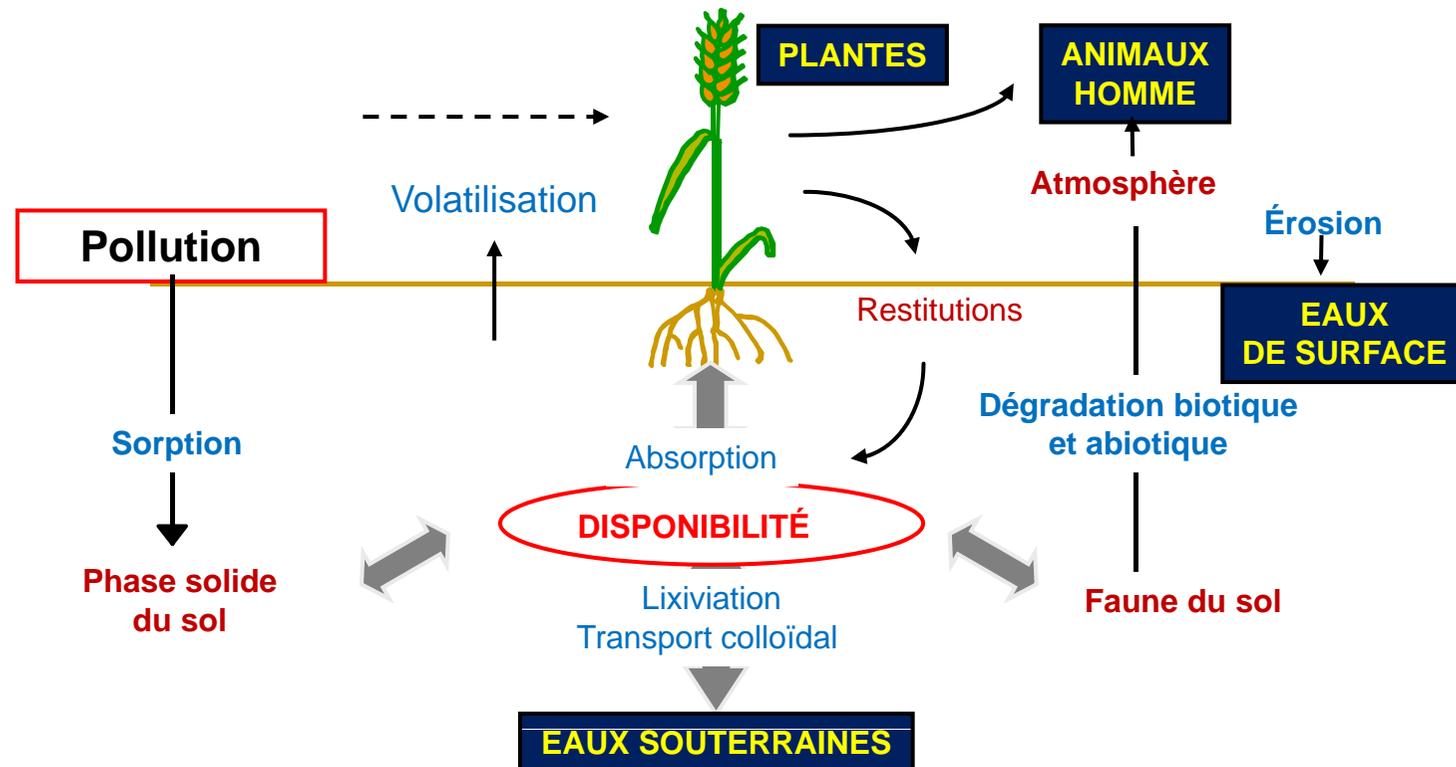
Toxique,
persistant,
transféré dans les
chaînes alimentaires

Devenir d'un polluant dans les sols : exemple des métaux lourds



Pourquoi remédier les sols pollués ?

- Pour réduire les risques de transfert vers les cibles sensibles : Homme et écosystèmes
- Pour restaurer la ressource en sols



Stratégies de remédiation des sols pollués

Stratégies de remédiation des sol pollués

Surfaces faibles, fortes pollutions,
forte pression foncière = coût¹ élevé

Surfaces étendues,
faible pression foncière = coût faible

Traitements *ex situ**
on site ou off site

Excavation

Traitements *in situ*

- désorption thermique
- oxydation
- dégradation biologique
- confinement sans traitement

- Procédés chimiques
 - Oxydation
 - Réduction
 - Lixiviation
- Procédés biologiques
 - Atténuation naturelle
 - **Phytoremédiation**

Centre
de stockage

- 
- immobilisation
 - destruction
 - extraction

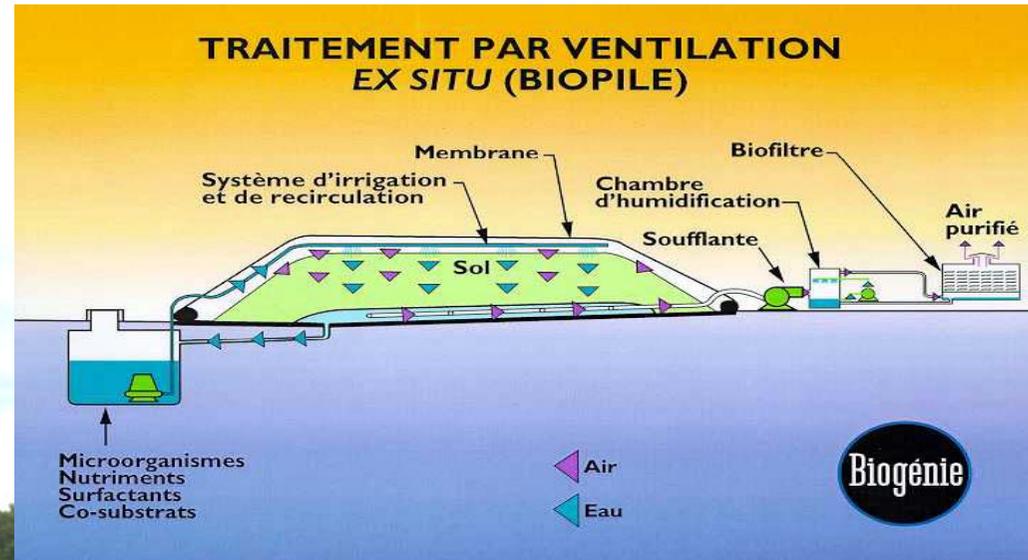
Construction de sols

Réutilisation des sols

¹ énergie, ressources naturelles, impacts

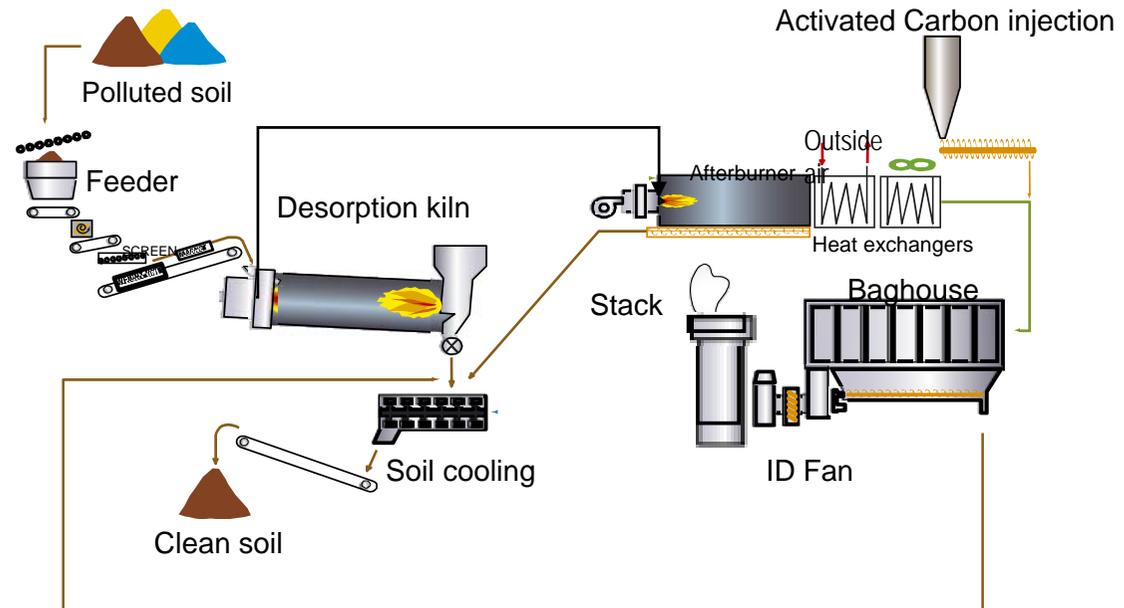
ex situ – *on site* : Biopile

Stimulation du métabolisme microbien par apport d'eau, d'air, de calories, d'éléments nutritifs (C, N et P), voire d'un inoculum adapté



ex situ – on ou off site : désorption thermique

- Elimination des polluants organiques (e.g. HAP)
- 500°C
- Coût élevé (énergie)
- Faibles volumes



16h/jour – 320t/jour

Intégrer la complexité du terrain

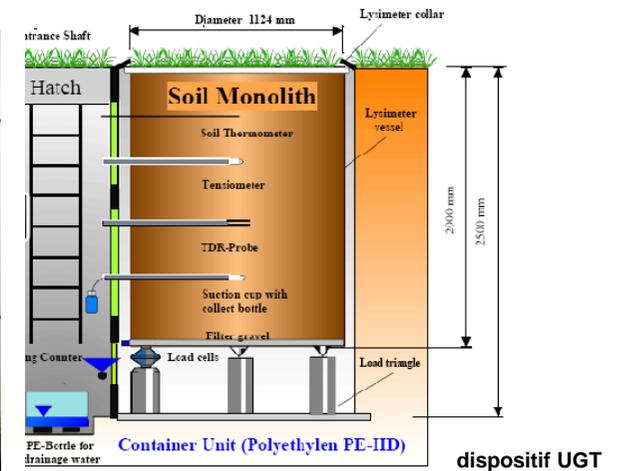


Station expérimentale pour les sites et sols dégradés *GISFI*



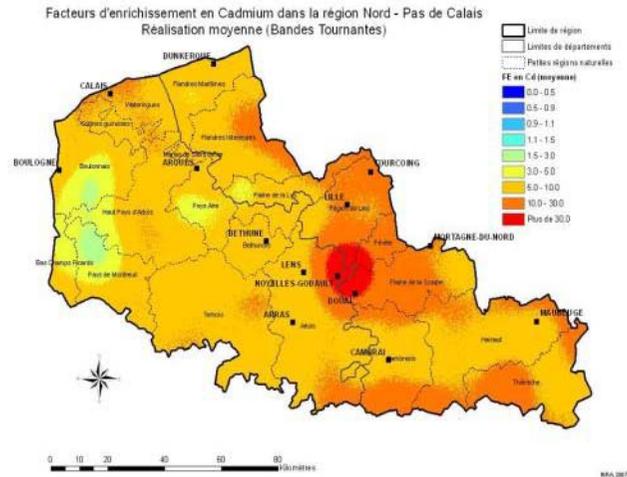
Parcelles lysimétriques : pédogenèse et traitement des Technosols (construction de sol, phytoremédiation, atténuation naturelle)

Homécourt



Colonnes lysimétriques équipées pour l'étude de la dynamique des polluants, l'évaluation des risques et le traitement des sols pollués





Traitement *in situ*

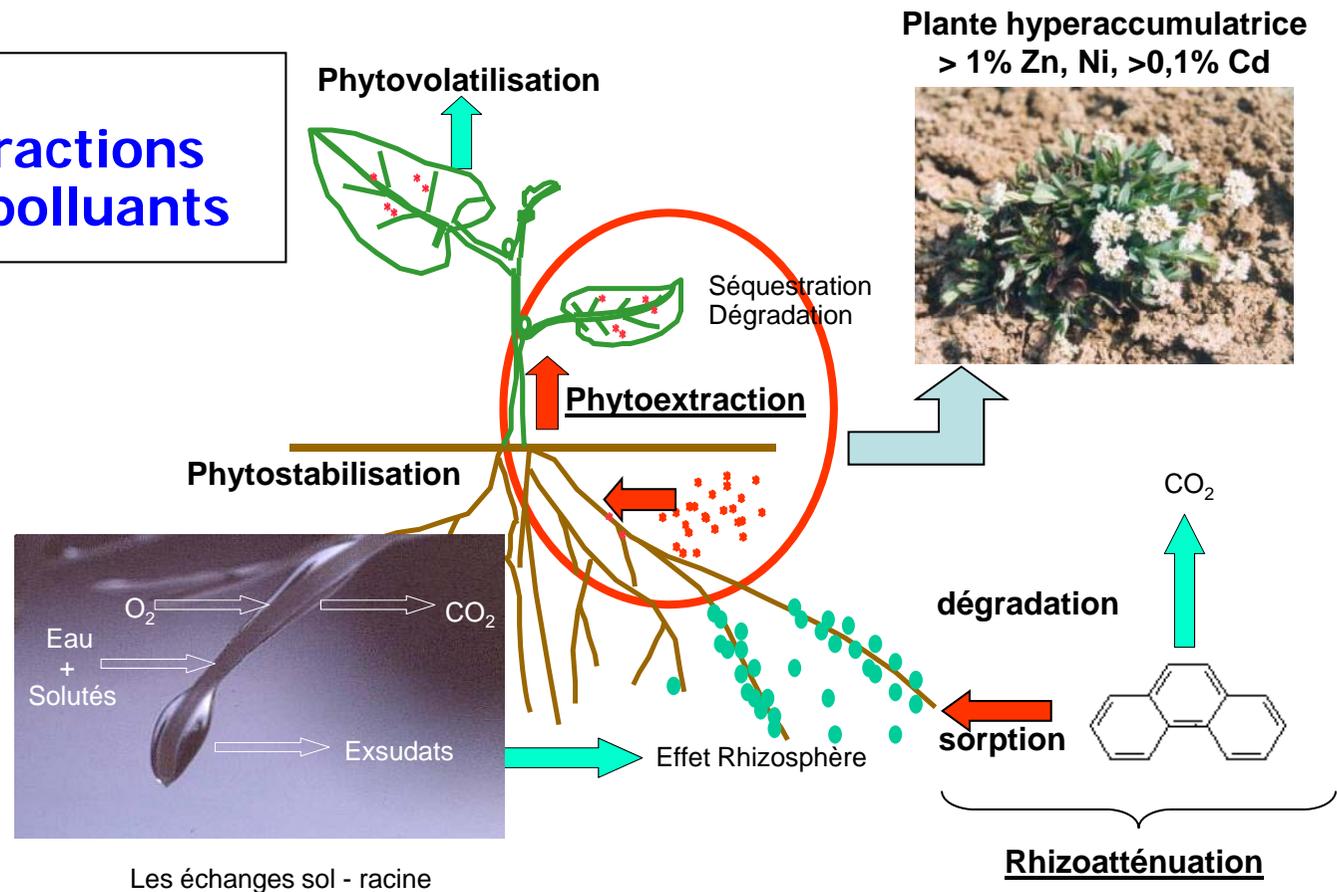
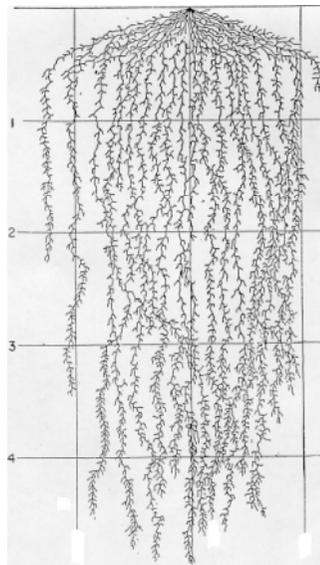
Phytoremédiation



Modes d'action des plantes sur les polluants des sols

- **Phytoremédiation : des cultures pour réduire les risques écotoxicologiques liés à la contamination des sols**

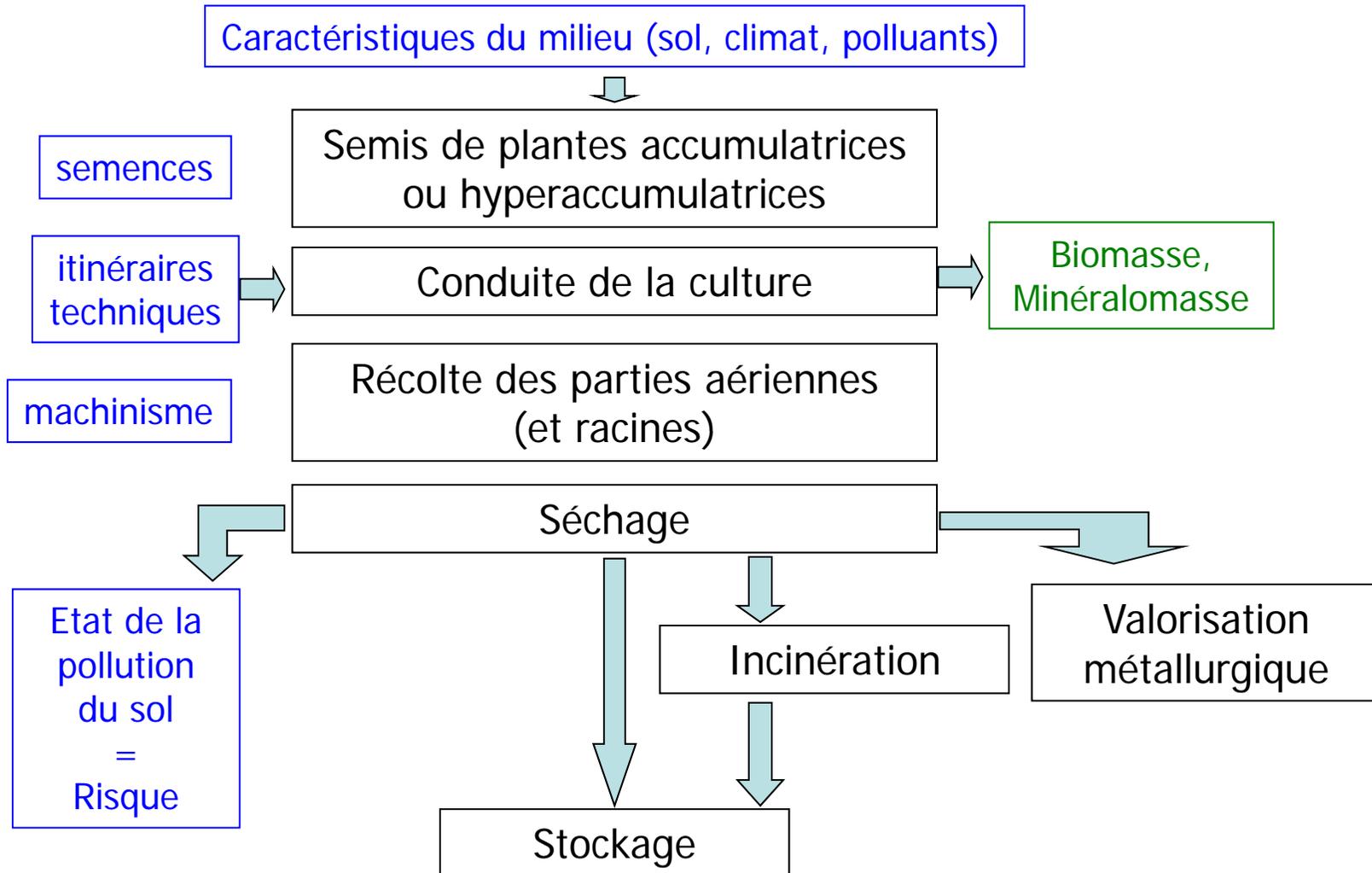
- **Fondée sur les interactions sol-racine-polluants**



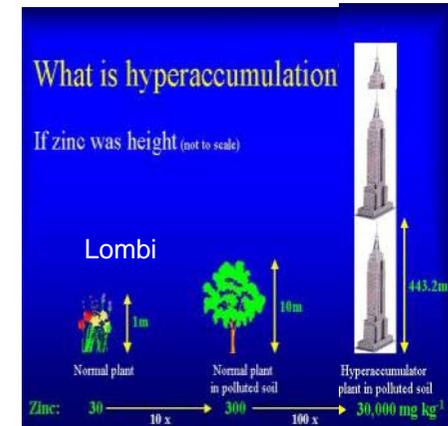
Plante hyperaccumulatrice
> 1% Zn, Ni, >0,1% Cd



Phytoextraction : étapes successives

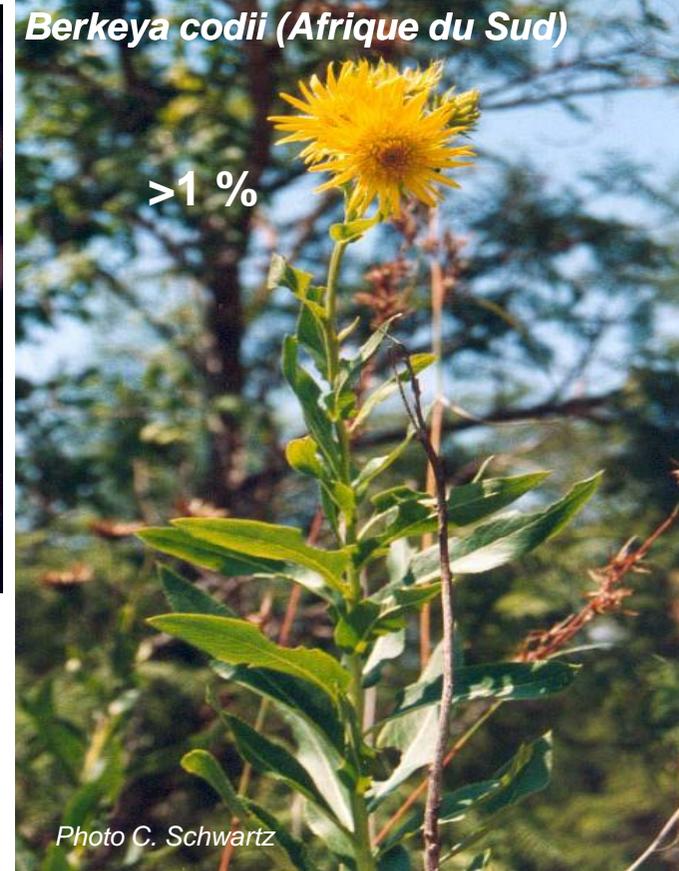


- **Utilisation de plantes pour extraire les éléments en traces des sols : 2 voies**
 - *Plantes accumulatrices à forte production de biomasse*
 - Brassica juncea (moutarde indienne)
 - ***Plantes hyperaccumultrices***
 - découvertes dans les années 30
 - Ni : *Alyssum murale*
 - As : *Pteris vitata* (fougère)
 - Cd, Zn : *Arabidospis halleri* (Arabette de Haller)
 - Cd, Zn, Ni... *Thlaspi caerulescens* (tabouret calaminaire)
 - ... plus de 400 espèces

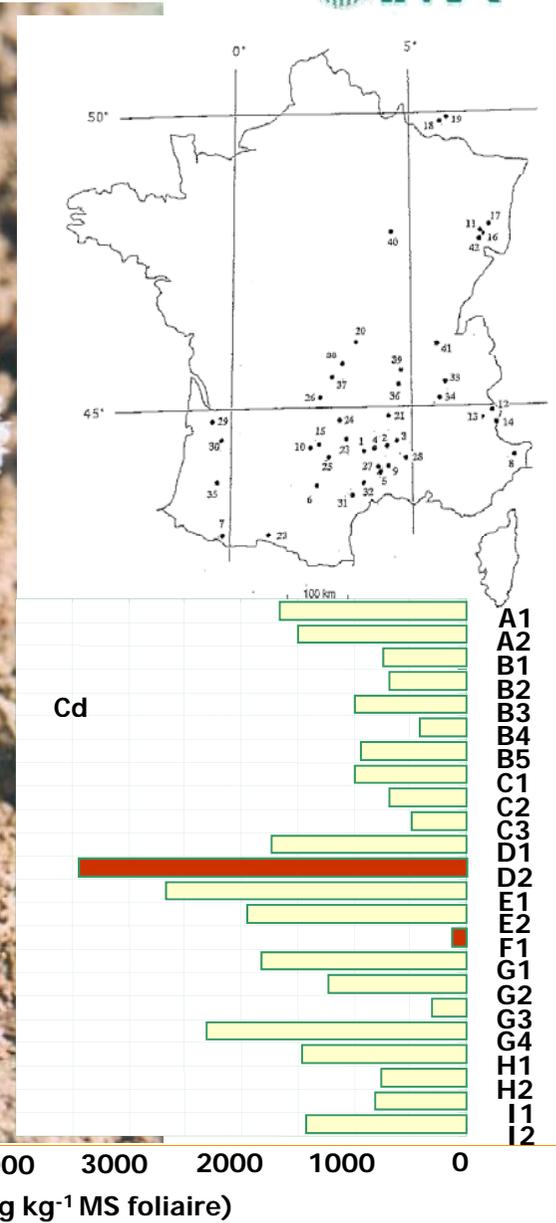


Présentent des concentrations en métaux similaires à celles de N, P et K

Hyperaccumulateurs de nickel



Thlaspi caerulescens (Europe) (> 1% Zn MS; > 0,3% Cd; Ni; Pb...)



Développement préférentiel des racines dans les zones contaminées du sol

	Cd	Pb	Zn
	(mg kg ⁻¹)		
Fonderie de Zn	16	260	1300
Sol agricole	0.1	23	40

T. caerulescens

Les feuilles contiennent plus de 1% Zn et 0.1% Cd

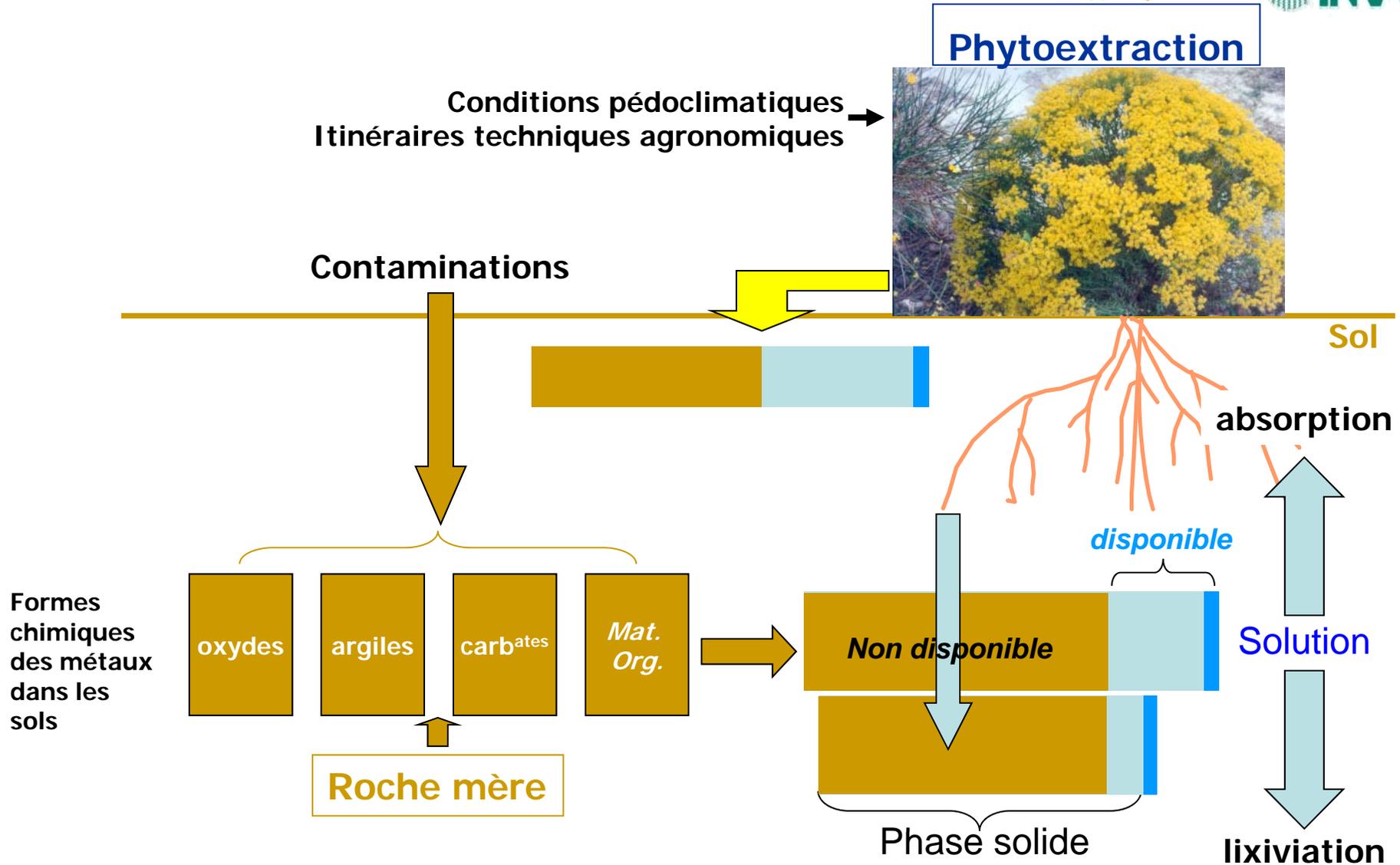
Sol de fonderie de Zn



Sol agricole

(Schwartz *et al.*, 1999)

Influence des hyperaccumulateurs sur le cycle des métaux



Application : co-culture (Guandong, Chine)



Sols contaminés par des eaux de mine de Pb/Zn et Cd



(Wu et al., 2008)

Association de maïs et de *Sedum alfredii* (hyperaccumulateur de Zn et Cd)

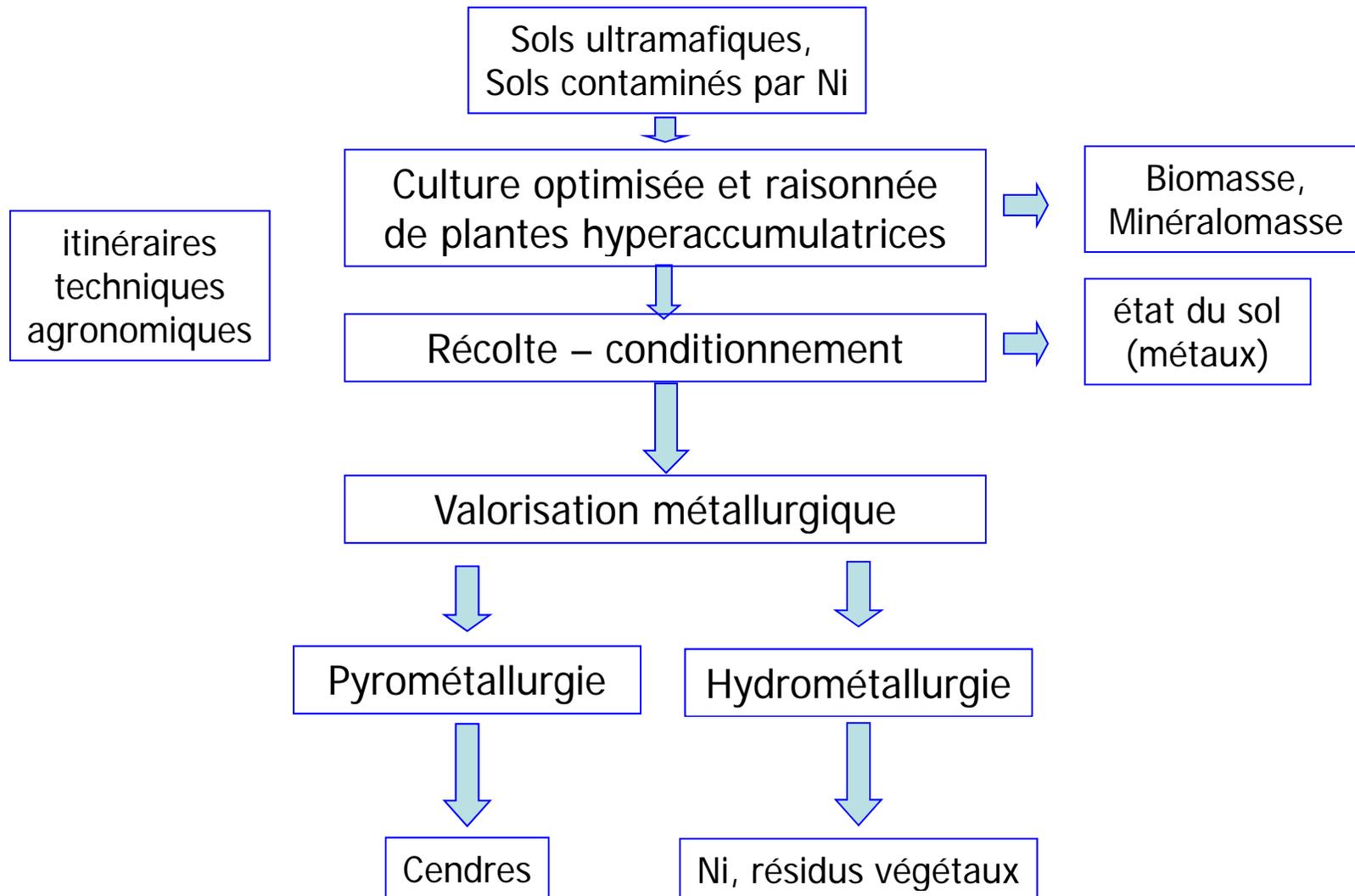
Modalité	Mais seul	Mais en co-culture
Concentration du Cd dans le maïs (mg kg ⁻¹)	0.32	0.20

Réduction du transfert du Cd dans le maïs co-cultivé avec l'hyperaccumulateur *Sedum alfredii*

Valorisation des sols pollués

Phytomining

Principe du phytomining (Ni)



Zones ultramafiques : Fe, Ni, Mg, Co



Régions méditerranéennes (e.g. Balkans)
($> 2\ 000\ \text{mg kg}^{-1}\ \text{Ni}$)

➤ *Rappel : valeur limite pour l'épandage
de boues : $50\ \text{mg Ni kg}^{-1}$*



Toxicité du à Ni sur maïs
– Nouvelle Calédonie
> 1% Ni dans les sols

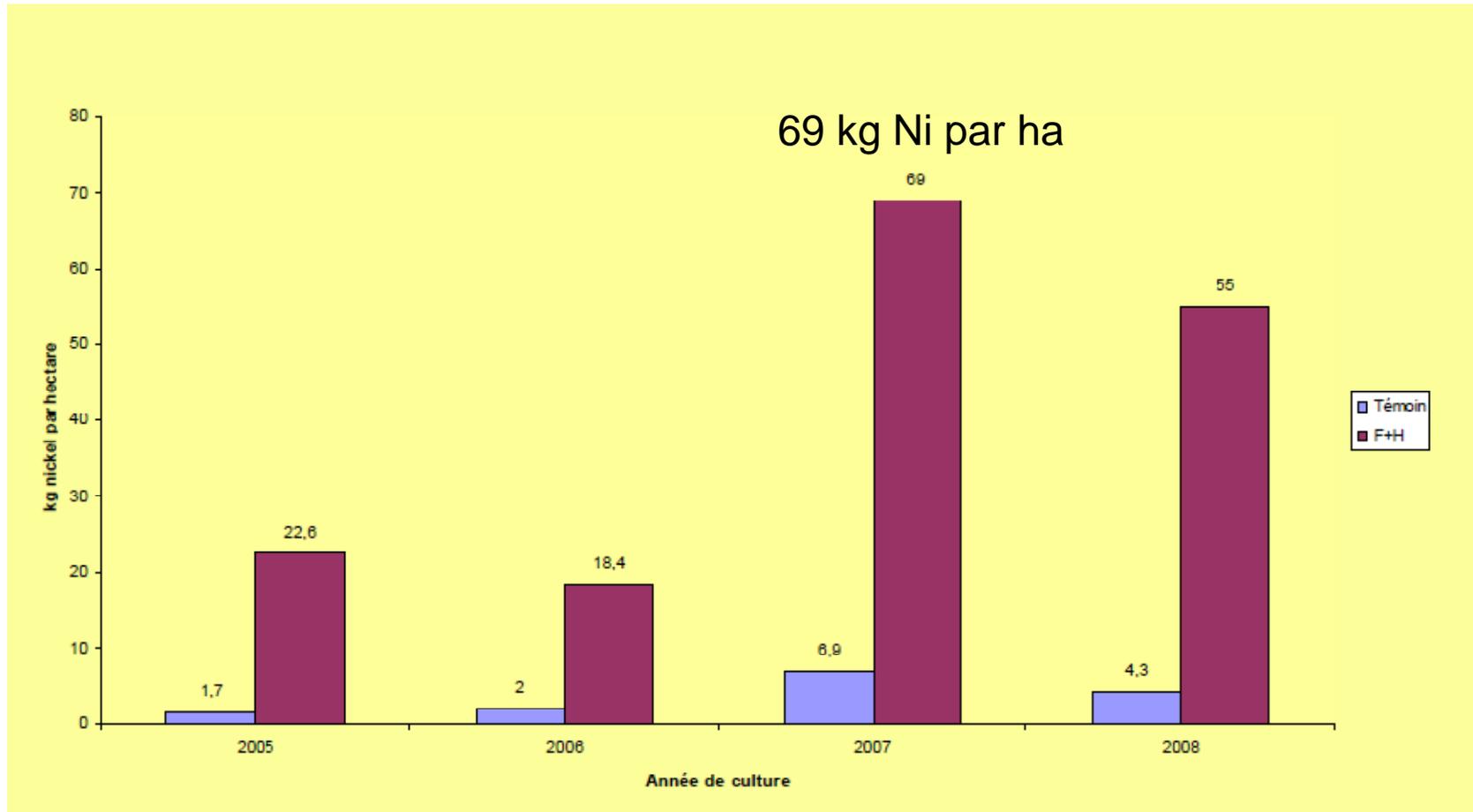
Dispositif expérimental de Pojska, Albania



Itinéraires techniques : fertilisation NPK (120 kg ha^{-1}), contrôle des adventices (monocotylédones), suivi des stades phénologiques, définition de la date de récolte, Mesure de la biomasse et de la concentration du Ni dans les parties aériennes

Sol ultramafique (30% de la surface de l'Albanie)
0,31%Ni, smectites-Ni, serpentines, disponibilité du Ni élevée

Rendement de phytomining

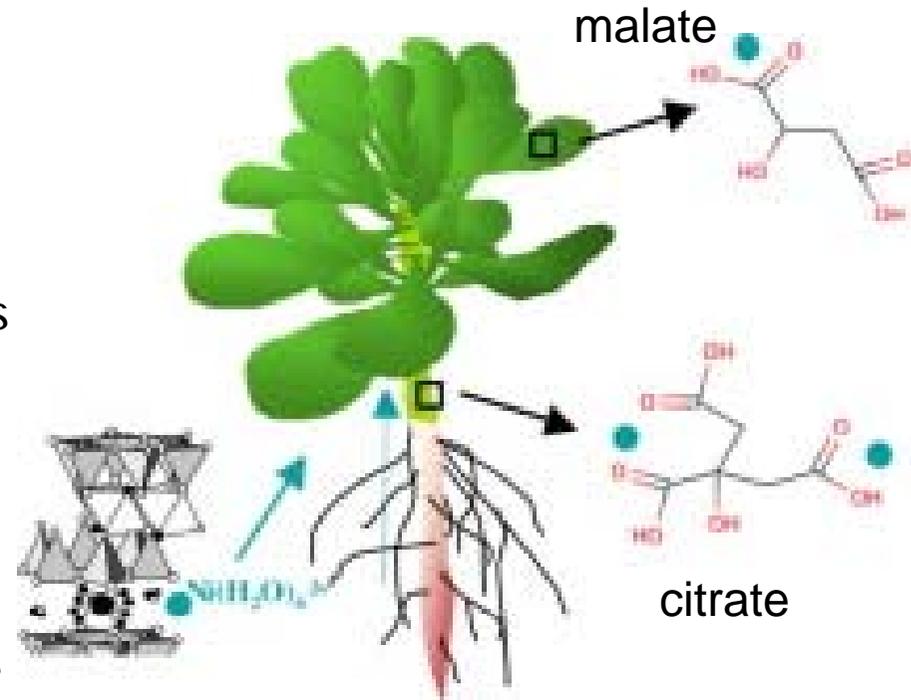


2005-2006 : sans herbicide; 2007-2008 : avec herbicide

Récolte 2009 : près de 100 kg de nickel par ha

Speciation du Ni dans les feuilles de *Leptoplax emarginata*

- Hyperaccumulateur de nickel cultivé sur un sol enrichi en Ni- smectite
- Analyse du Ni par spectroscopie d'absorption des rayons X
- Comparaison avec des solutions aqueuses de différents complexes organo-Ni(II)
- Ni²⁺ stocké sous forme de complexes **Ni(malate)**
- Des complexes **Ni(citrate)** sont présents dans les tiges
- Extraction par procédé hydrométallurgique (Barbaroux et al., 2009)



Montarges *et al.*, 2008, Phytochemistry

- **La phytoremédiation**
 - *technologie extensive pour abaisser les risques*
 - *l'énergie solaire sans altération du sol*
 - *contaminations superficielles et de grandes surfaces*
 - *coûts réduits*
- **Défis pour la phytoremédiation**
 - *Sélection, production de semences*
 - *Gestion de la biomasse (phytomining)*
 - *Acceptabilité technologique*
 - *Positionnement économique /traitements alternatifs*
- **Les défis pour la recherche en matière de sols pollués**
 - *Métaux lourds; multi-contaminations*
 - *Traitement in situ*
 - *Atténuation naturelle : monitoring du risque*
 - *Construction de sol*

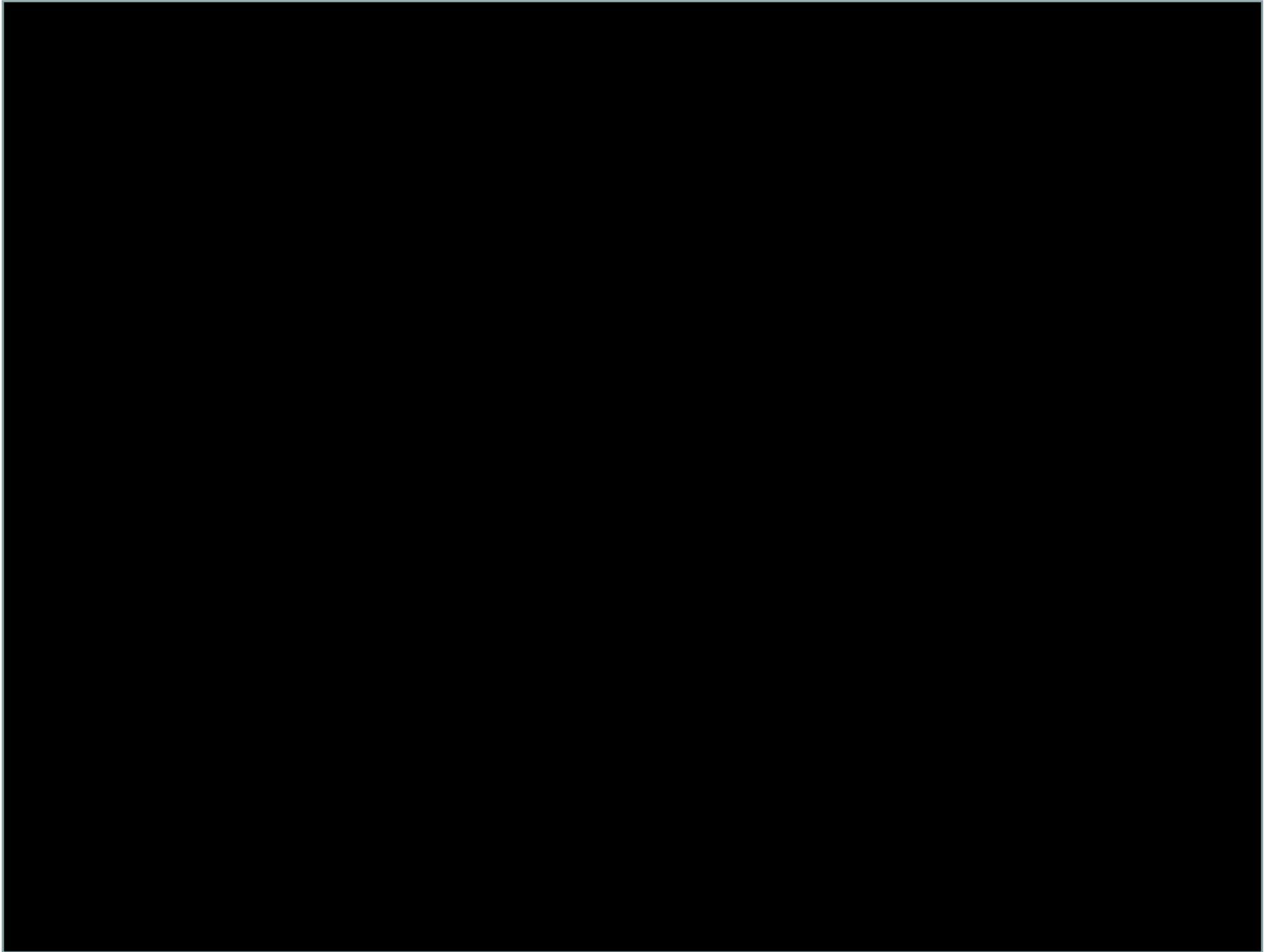
Perte de diversité et... de technologies

Alyssum corsicum



Bastia – fin des années 80

Population aujourd'hui disparue à la suite du développement urbain



Estimation théorique de la phytoextraction du cadmium

- **Sol contaminé : 25 mg Cd kg⁻¹**
 - *horizon de surface (75 kg ha⁻¹)*
- **Objectif : abaisser la concentration à 2 mg Cd kg⁻¹**
- **Culture de *Thlaspi caerulescens* :**
 - *Biomasse : 5 à 10 t ha⁻¹*
 - *Concentration du Cd ds la biomasse : 2 500 mg kg⁻¹*
 - *Phytoextraction : 12,5 à 25 kg Cd ha⁻¹*
- **Besoin de 3 à 6 cultures**
- **Technologie attractive**
- **Mais théorique car le prélèvement décroît avec la diminution de la concentration dans le sol**

Estimation économique de l'intérêt du phytomining

- **Avec des pratiques agronomiques adaptées :**
 - *Production de biomasse : 6 t par ha*
 - *Contenant 1,15% Ni*
- **Phytoextraction : 69 kg Ni par ha**
- **En admettant**
 - *Coûts de production $\$390 \text{ ha}^{-1}$*
 - *Location des terrains : $\$150 \text{ ha}^{-1}$*
 - *Valeur commerciale du Ni $\$30 \text{ kg}^{-1}$ (2008)*
 - *20% de la valeur du Ni pour couvrir les coûts de récupération*
- **Valeur annuelle d'une culture de phytomining**
 - *$69 \text{ kg Ni ha}^{-1} \times \$24 \text{ kg}^{-1} \text{ Ni} = \$ 1656 \text{ ha}^{-1}$*
- **Resultat :**
 - *$1656 - (390 + 150) = \$ 1116 \text{ ha}^{-1}$*
- **Le phytomining du Ni est un moyen d'offrir un revenu aux agriculteurs sur des zones à faible potentiel agricole**

Classification des éléments en traces en fonction du risque de transfert vers la chaîne alimentaire terrestre

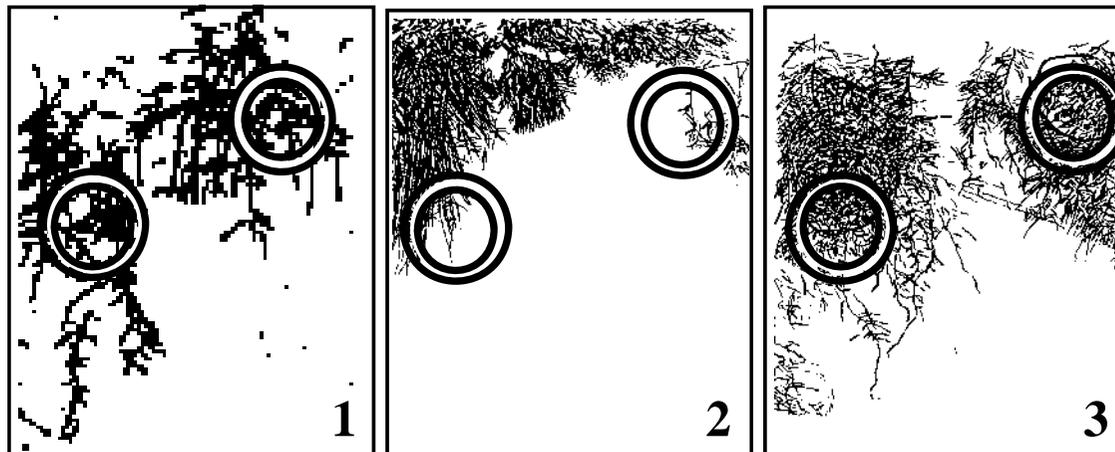
Solubilité très faible dans le sol	Transfert sol – plante limité	Phytotoxique	Risque très élevé
Ag	Hg	B	Cd
Cr	Pb	Cu	Co
Sn		Mn	Mo
Ti		Mo	Se
Y		Ni	
Zr		Tl	
		Zn	

(Chaney, 1998)

Réponse des racines de *T. caerulescens* et *Lupinus albus* à la présence de Cd ou Zn

Schwartz, 1997; Perronnet, 1997

T. caerulescens



Lupin blanc



Hot spots 	Billes de Cd	Sol agricole	Sol de fonderie de Zn
Remplissage	Sol agricole	Sol de fonderie de Zn	Sol agricole

% du compartiment disponible du Cd extrait en 3 mois de culture (Gérard *et al.*, 2000)

Conc. initiale dans le sol (mg kg ⁻¹)	8.9	15.1	25.4
<i>Lolium perenne</i>	0.08	0.10	0.10
<i>Lactuca sativa</i>	0.33	0.38	0.55
<i>T. caerulescens</i>	22.4	11.7	14.1

1 culture abaisse le risque de plus de 20% (Gérard *et al.*, 2000)

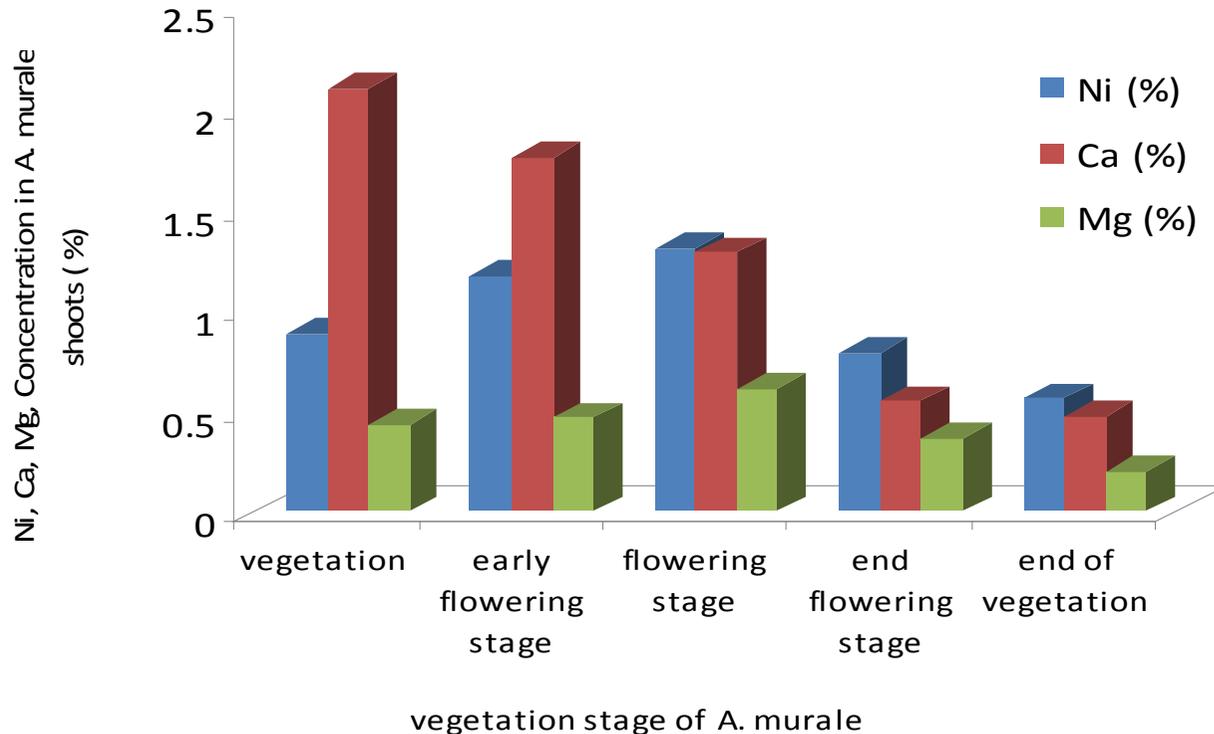
*Le Cd assimilable par les plantes est présent dans le compartiment isotopiquement échangeable (¹⁰⁹Cd)
Mesure par la méthode des cinétiques d'échange isotopique (Echevarria *et al.*, 1998)*



Alyssum murale
sur sol ultramafique (Albanie)
(1-3%Ni)

Photo A. Bani

Concentration du Ni dans la plante en fonction du stade phénologique

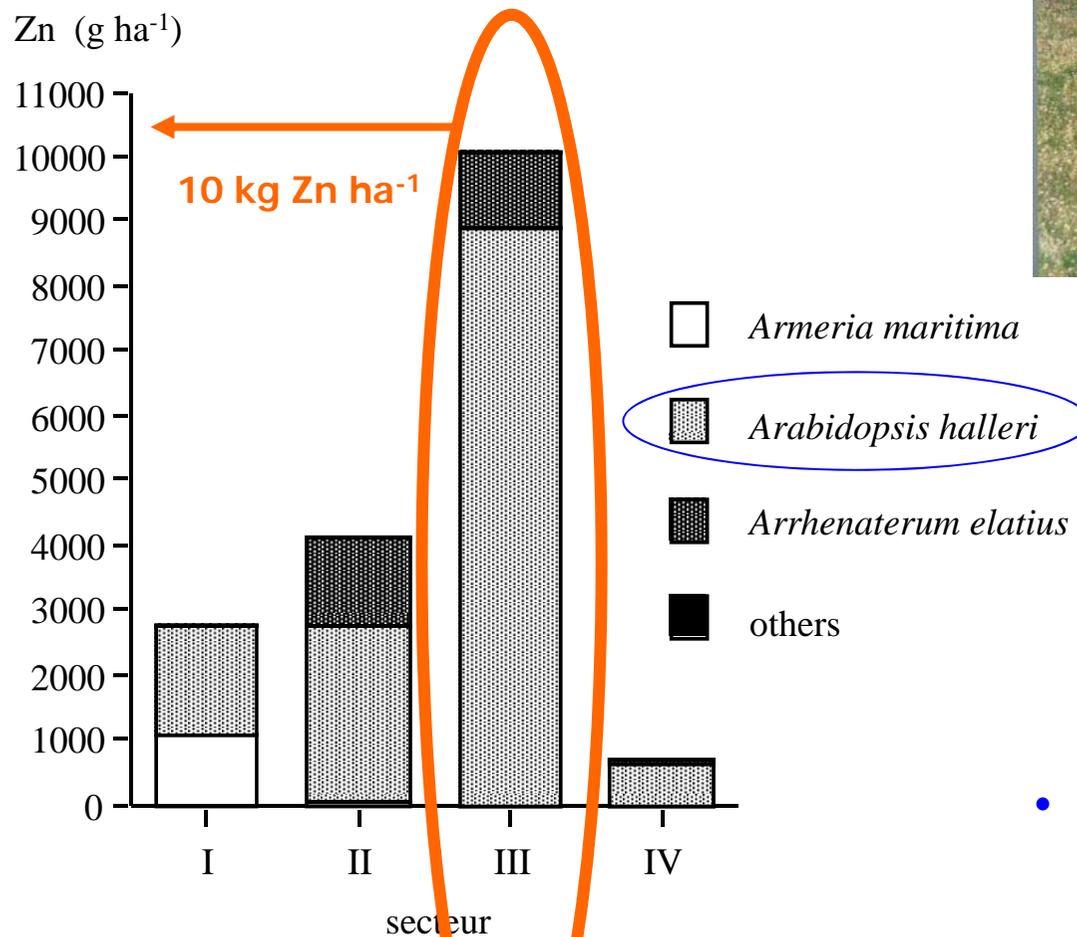


Bani *et al.*, 2007

- La concentration du Ni dans les parties aériennes d'*A. murale* est fonction de la date de récolte
- Stade optimal : floraison

Phytoextraction "Naturelle" du zinc

Site d'ancienne fonderie de zinc



Soil :	8 530	6 600	3 880	3 230 mg Zn kg ⁻¹
--------	-------	-------	-------	------------------------------



- **Bilan (ha)**
 - Zn dans le sol : 7760 kg
 - Extraction : 0,13%
- **Dépollution : irréaliste!**