

Pollution diffuse des sols: quels risques et quelles gestions?

Nantes, le 18 mars 2016



3^{ème} partie:

**Quelles gestions de la pollution
pour quels usages ?**

Pratiques usuelles et alternatives pour une gestion durable de la pollution

Thierry LEBEAU, Enseignant chercheur

Faculté des Sciences et Techniques - Département des Sciences de la Vie
Laboratoire LPG-Nantes - UMR 6112 CNRS



Pratiques usuelles et alternatives pour une gestion durable de la pollution

INTRODUCTION :

Objectifs généraux de réhabilitation des sols pollués

1- Pollutions localisées vs. diffuses :

Pratiques de réhabilitation

1.1. - *Pollutions localisées*

1.2. - *Pollutions diffuses*

2- Limites & perspectives de la phytoextraction *in situ* :

Application aux contaminants inorganiques

Introduction

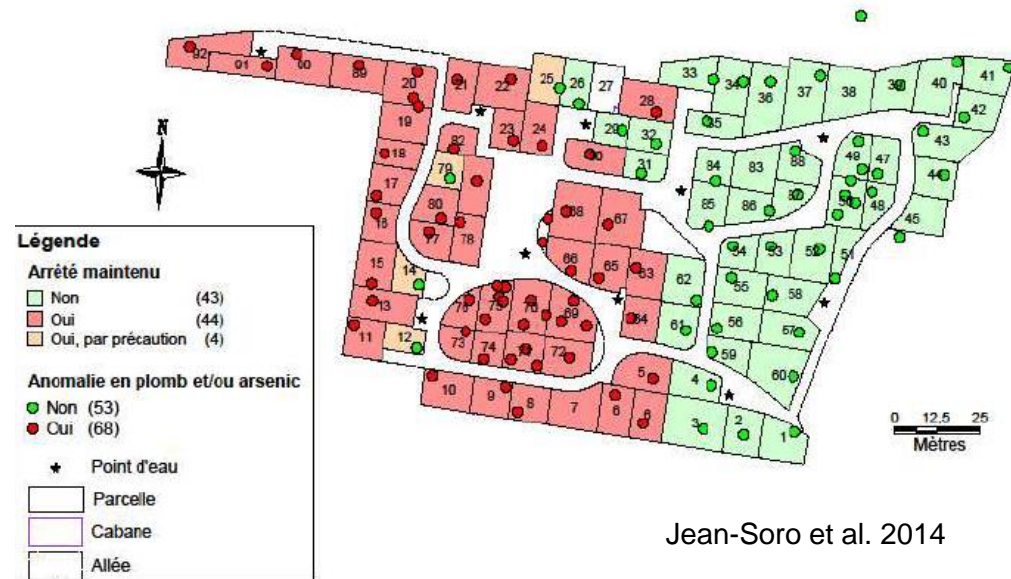
Objectifs généraux de réhabilitation des sols pollués

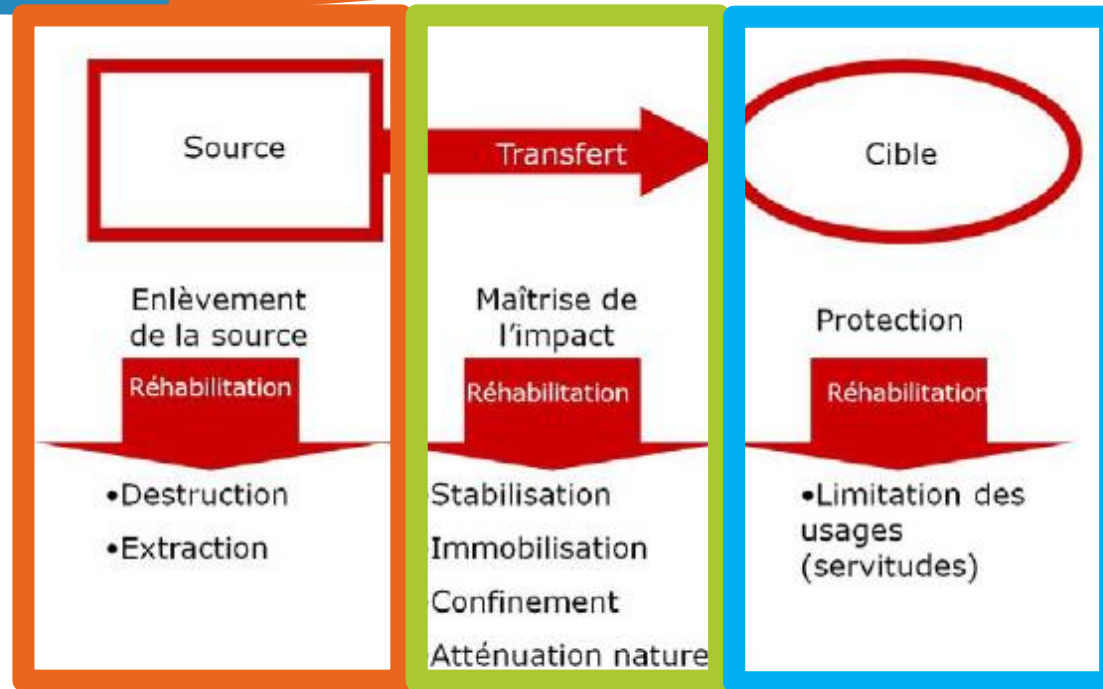
En l'absence de réglementation spécifique pour les sols, sur quels seuils & quels paramètres d'intervention (concentration, quantité, disponibilité) se baser ?

- Compatibilité de l'état d'un site avec son usage actuel (risque sanitaire acceptable) et, le cas échéant, ARR post-réhabilitation
 - Coût/bénéfice acceptable (article 34-3 décret du 21 septembre 1977) :
« *atteindre le meilleur niveau de protection de l'environnement humain et naturel, à un coût raisonnable, tout en évitant de mobiliser des ressources inutilement démesurées au regard des intérêts à protéger* »
- Estimation des coûts totaux de nettoyage des sites et sols pollués :
- en Europe : 59 à 109 milliards d'€ (Le Corfec 2011)
 - en France : 470 millions d'€ (CGDD 2012) → coûts x2 en 10 ans

Plan de gestion (jardin des Eglantiers, ville de Nantes) :

- 100 parcelles au total
 (50 sorties du plan de gestion)
- 50 concernées par plan de gestion :
 - 15 parcelles réaménagées
 (3200 m²) : terrassement, apport de 50 cm de terre végétale, remplacement des cabanes, remise en état du réseau d'eau
 (200 000 € soit ≈ 62 €/m²)
 - 31 parcelles fermées
 (contamination intermédiaire)
 - 4 parcelles pour expérimentation
 (phytoremédiation)





Stratégie des mesures de gestion d'un site pollué (Nathanail et al., 2002)

En priorité, élimination de la source par excavation. Evite tout problème lié aux solutions *in situ*

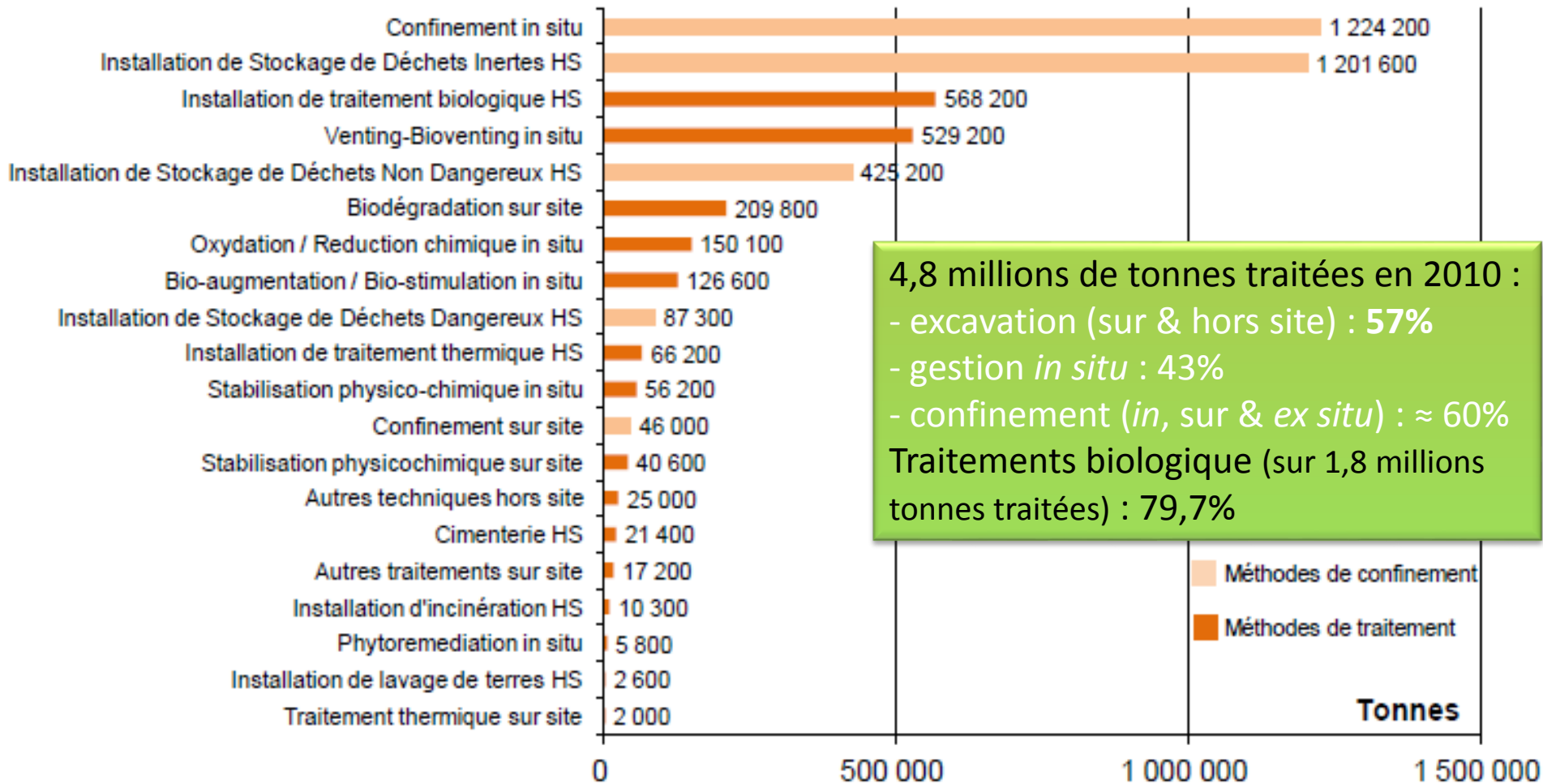
En second lieu, désactivation de la(les) voie(s) de transferts (confinement *in, sur & ex-situ*)

En dernière option, modification des aménagements et des usages

1- Pollutions localisées vs. diffuses

Pratiques de réhabilitation

1.1. - Pollutions localisées



Evolutions 2008-2010 :

Hors site

- traitement biologique → +55%
- traitement thermique → -34%
- ISDI → -35%
- incinération → -42%
- cimenterie → -52%
- lavage de terre → -75%

Sur site

- traitement thermique → -29%
- stabilisation physico-chimique → -89% (gros chantier 2008)
- lavage de terre → -100%

In situ

- confinement → +1506% (due à un acteur particulier)
- stabilisation physico-chimique → +603% (gros chantier 2010)
- bioaugmentation/biostimulation → +90%
- oxydo/réduction chimique → +37%

« Traitabilité des sols pollués : guide méthodologique pour la sélection des techniques et l'évaluation de leurs performances » (ADEME 2011) :

- permet au maître d'ouvrage de présélectionner une(des) technique(s) de traitement (cf. guide et site selecDEPOL). Deux cas de figures :
 - application directe de la technique (si éprouvée)
 - besoin d'essais de vérification
- apporte une aide à la décision pour les prestataires de traitements, en zone non saturée ou saturée du sol (cf. annexe du guide)



Questionnement sur :

- Coût excavation/transport

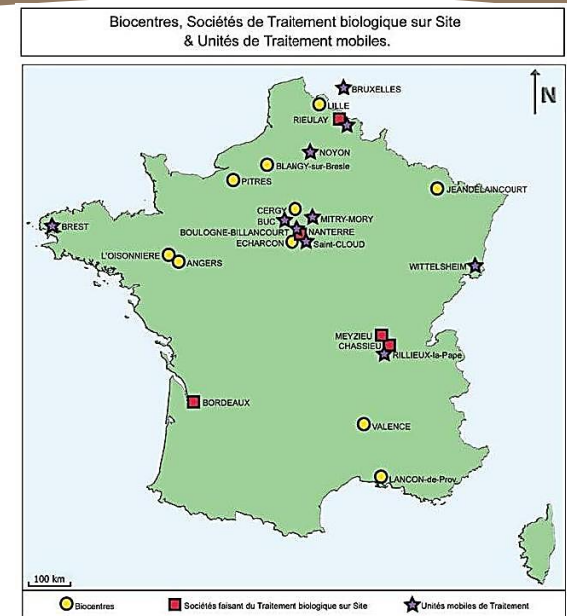
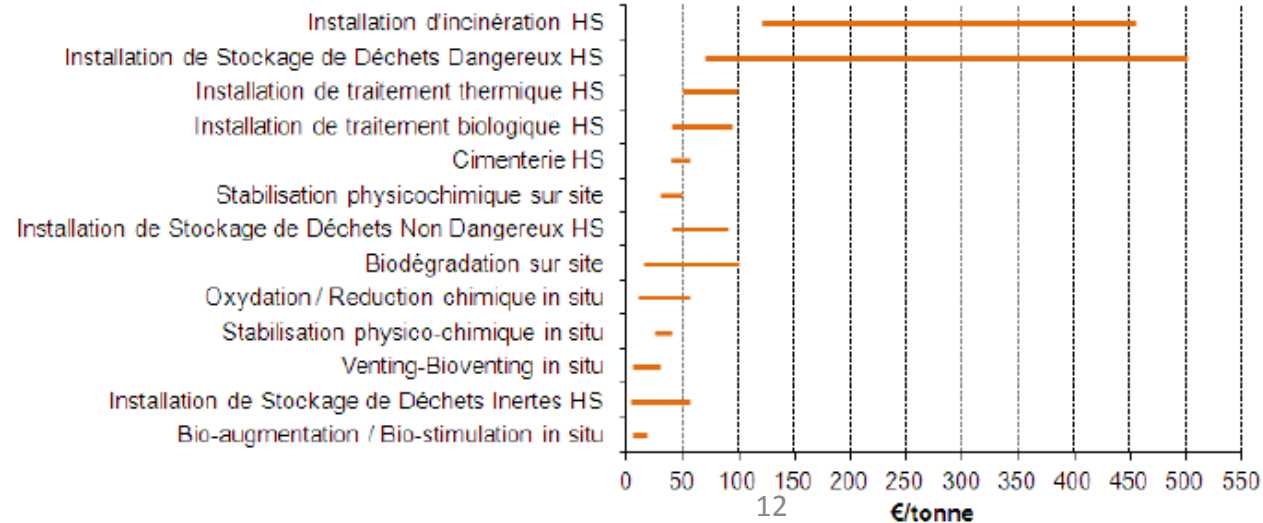
| Type de coût | Moyenne 2010 | Min-Max |
|----------------------|--------------|----------|
| Excavation (EUR/t) | 4 | 2 - 30 |
| Transport (EUR/t/km) | 0,4 | 0,1 - 10 |

- Répercussions sur le coût des traitements

Hors site : 45-135 €/tonne

Sur site : 30-40 €/tonne

In situ : 10-30 €/tonne



Questionnement sur :

- Coût excavation/transport

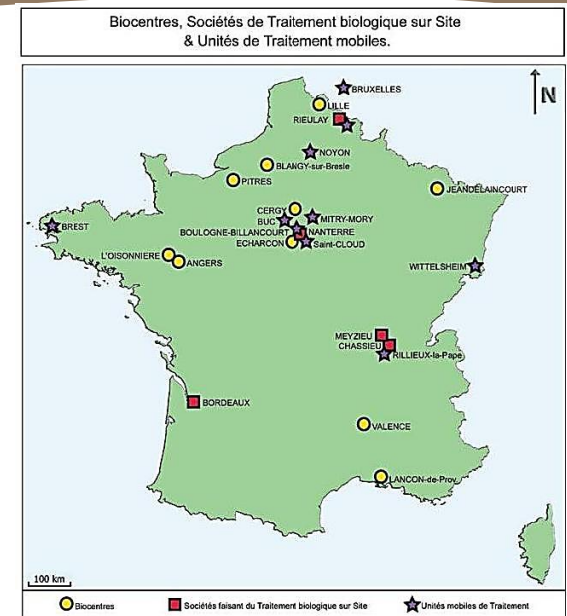
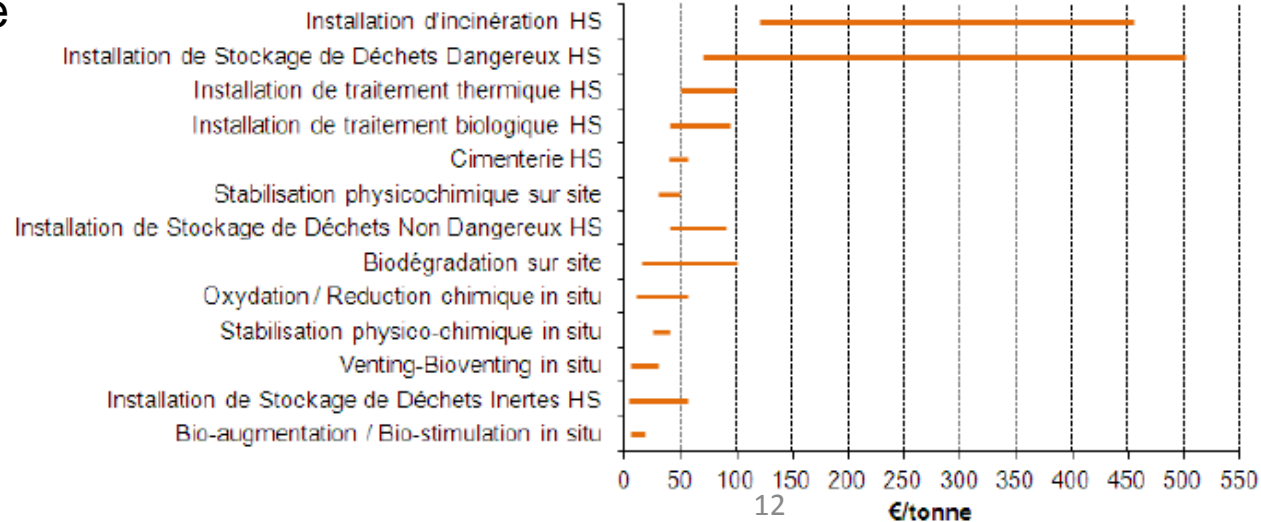
| Type de coût | Moyenne 2010 | Min-Max |
|----------------------|--------------|----------|
| Excavation (EUR/t) | 4 | 2 - 30 |
| Transport (EUR/t/km) | 0,4 | 0,1 - 10 |

- Répercussions sur le coût des traitements

Hors site : 45-135 €/tonne

Sur site : 30-40 €/tonne

In situ : 10-30 €/tonne



Statut des « extrants » (terres polluées) et questionnement sur les « intrants » (terres de remplacement) :

- **« Extrants » :**

Statut de déchet des terres polluées excavées
(Ordonnance n°2010-1579, 17/12/2010)

MAIS... des possibilités de réutilisation hors site des terres excavées
($\approx 0,5\%$ du tonnage de terres traitées)

Principes :

- « *permettre une réutilisation maîtrisée et raisonnée ... afin de participer à la réduction de la pression de l'homme sur l'environnement* »
- réutilisation sur un rayon d'environ 30 km
- pas de mélanges de lots distincts

- **« Intrants » (Importation de terres de remplacement) :**

- ✓ disponibilité ? Qualité ?
- ✓ coûts de transport (entre 2/3 et 3/4 du coût total)
- ✓ possibilité de remplacer par d'autres matériaux (projet SITERRE) ?

1.2. - Pollutions diffuses

Des modalités de gestion conditionnées par des volumes gigantesques de sols :

- ex : Fukushima
 - Césium → 600 km² (> 600 000 Bq/m²)
- ex : sols viticoles suite à arrachage
 - Cuivre → 2000-3000 ha prévus (vignoble nantais)
- ex : Jardins partagés urbains
 - Plomb → 8 sites sur 26 (≈ 1000 parcelles de 100-200 m² gérés par ville de Nantes) où des sols de jardins dépassent 60 mg/kg (fond géochimique)

Réhabilitation *in situ* → seule option durable :

- en terme de coût
 - 1 ha sur 30 cm d'épaisseur ≈ 4000 tonnes de sol
 - Ex : 600 km² = 240 millions de tonnes !!!
- pour éviter une « consommation » excessive de sols

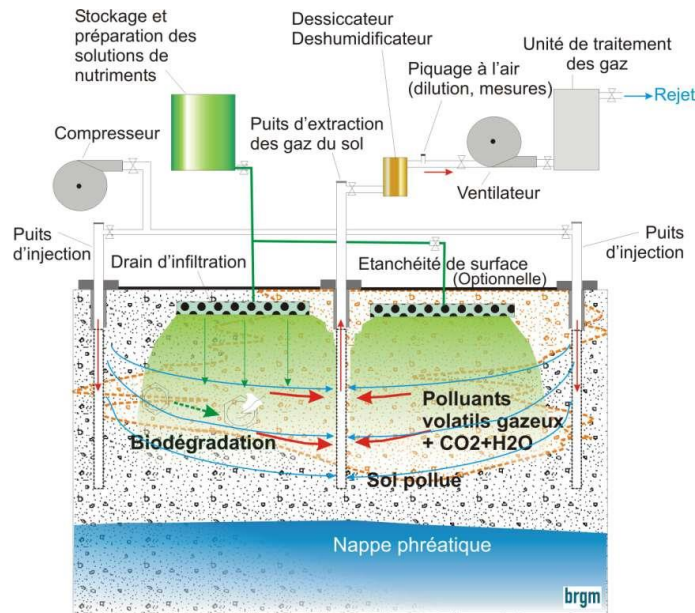


Friche viticole, Capestang (photo C. Arnal, 2013)

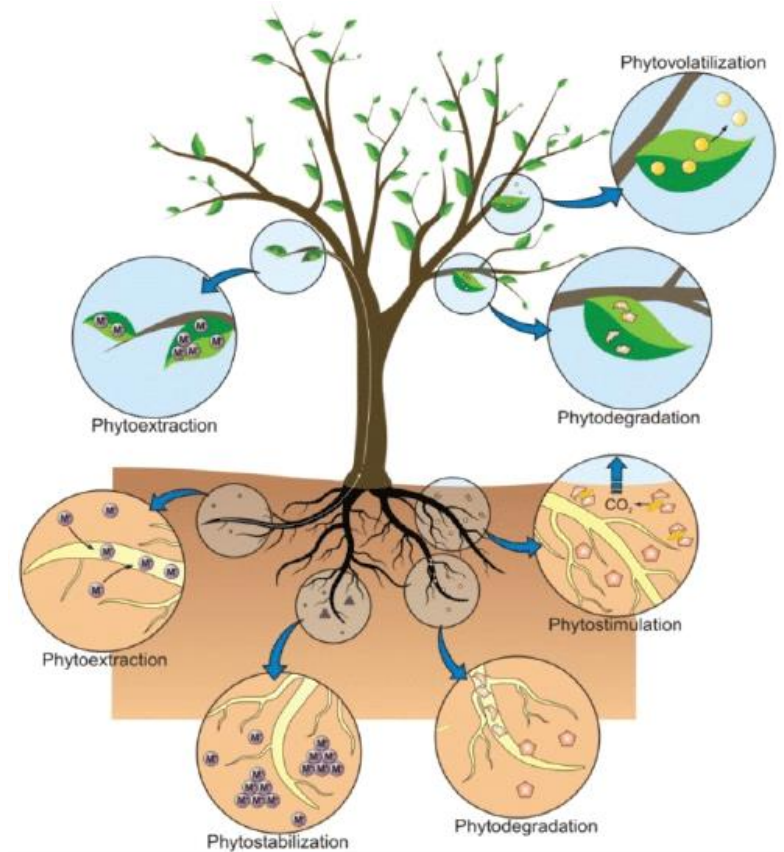


Traitements *in situ* (biologiques) généralement moins intrusifs pour les sols (structure, fertilité, vie du sol) :

- bioventing (microorganismes) pour les contaminants organiques



- phytoremédiation
 - Phyto- et/ou rhizo-dégradation (composés organiques)
 - Phytoextraction (éléments inorganiques)



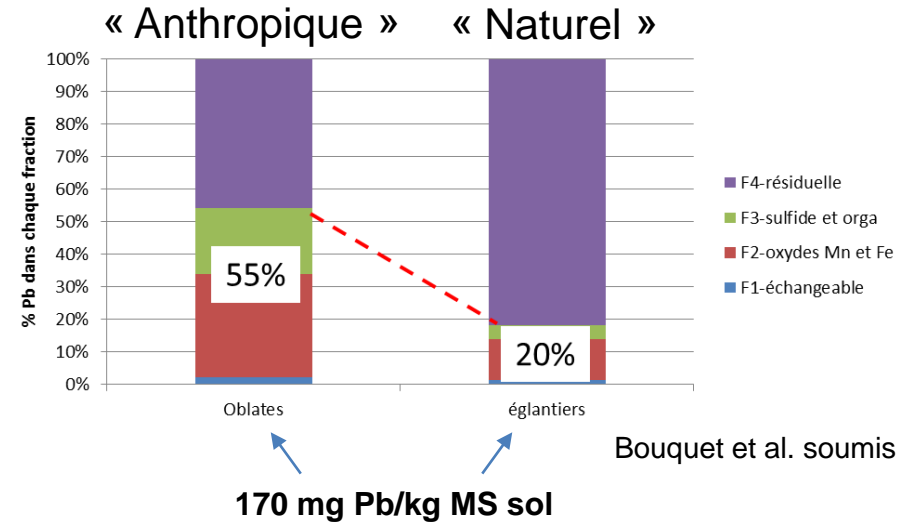
Favas et al. 2014

2- Limites & perspectives de la phytoextraction *in situ*

Application aux contaminants inorganiques

Méthode encore trop lente :

- applicable uniquement aux pollutions diffuses inorganiques
- durée du traitement dépendante de l'objectif
→ métaux « totaux » ou « disponible » ?



Phytoextraction *in situ* de résidus de fonderie de Cd/Zn
(Budel Dorplein/NL) avec *Agrostis Capillaris* (*Poaceae*)

| Parameter | Zn | Cd | Cu | Pb |
|---|--------|------|--------|-------|
| Metal concentration of the sintel (mg kg^{-1}) | 15,000 | 7.0 | 2000 | 300 |
| Metal concentration in the above-ground biomass (mg kg^{-1}) | 1185 | 1.2 | 42 | 7 |
| Final soil concentration (mg kg^{-1}) | 200 | 1.0 | 50 | 50 |
| Metal amount of 1 ha (kg) | 54,000 | 25.2 | 7200 | 3060 |
| Final amount of 1 ha (kg) | 720 | 3.6 | 180 | 180 |
| X: expected phytoextraction from the soil (kg ha^{-1}) | 53,280 | 21.6 | 7020 | 3060 |
| Y: expected annual metal removal by 4t biomass (kg ha^{-1}) | 4.74 | 4.8 | 0.168 | 0.388 |
| Period (years) for phytoextraction (X/Y) | 11,241 | 4500 | 41,786 | 7887 |

Ernst, 2005

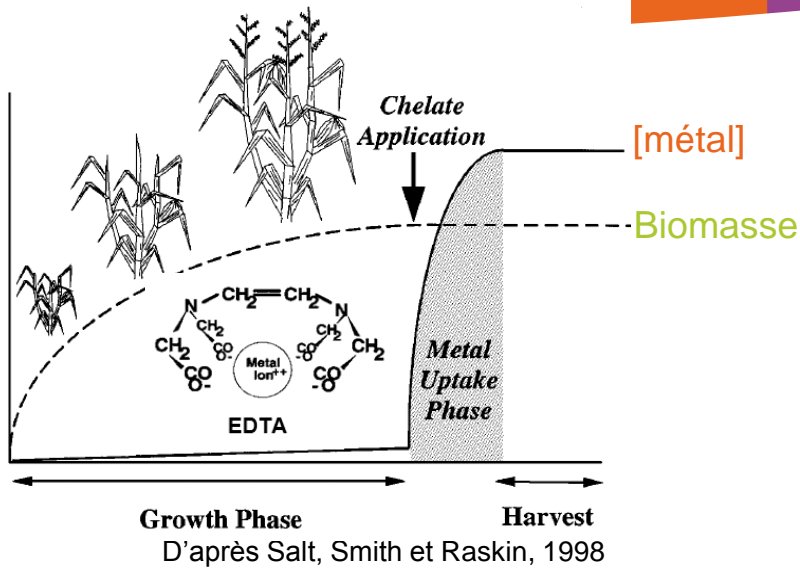
→ 0,0056% en 3 mois de culture

% phytoextraction Cd « disponible » en 3 mois de culture (Gérard et al. 2000)

| | |
|--|------|
| Conc. initiale dans le sol (mg kg^{-1}) | 8.9 |
| <i>Lolium perenne</i> | 0.08 |
| <i>Lactuca sativa</i> | 0.33 |
| <i>T. caerulescens</i> | 22.4 |

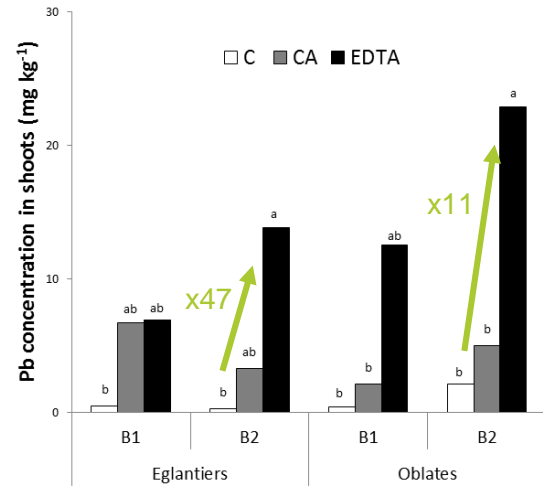
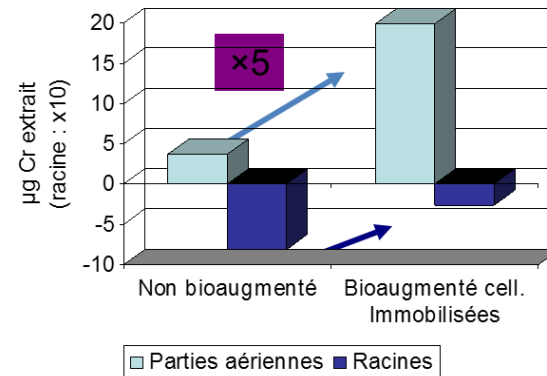
2- Limites & perspectives de la phytoextraction in situ

Réduire la durée de traitement



Ajout de bactéries au sol (bioaugmentation) :

- réduit la phytotoxicité des métaux
- stimule la croissance des plantes
- augmente la concentration de métaux extraits (et le facteur de translocation)



Bouquet et al. soumis

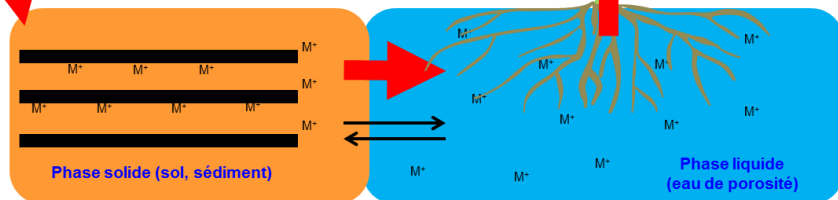
Chélatants synthétiques :

- toxicité
- coût prohibitif pour une application en conditions réelles



Quantité de métaux x2 à 5
(Braud et coll. 2009, Lebeau et coll. 2008)

M⁺ = ET ou radionucléides



Système de culture associant :

- une plante alimentaire
(non consommable en monoculture)
- ET une plante (hyper)accumulatrice

| Modalité | Maïs seul | Maïs en co-culture |
|---|-----------------------------|-------------------------|
| Concentration du Cd dans le maïs (mg kg ⁻¹) | 0.32 Non conforme | 0.20 Conforme |

D'après présentation Morel, 2010



(Wu et al., 2008)

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

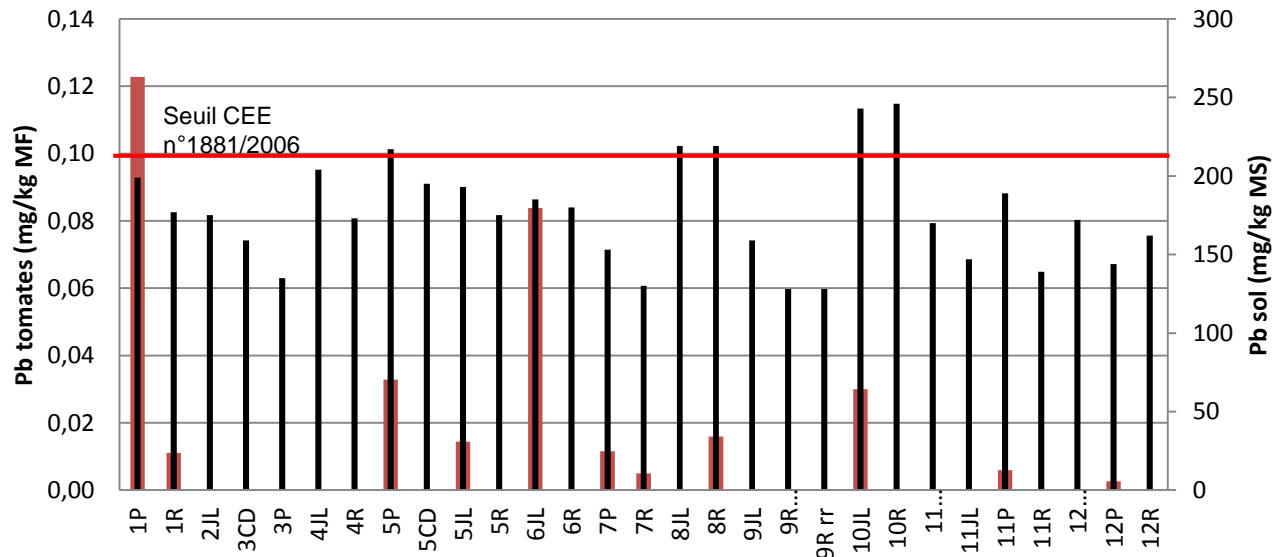
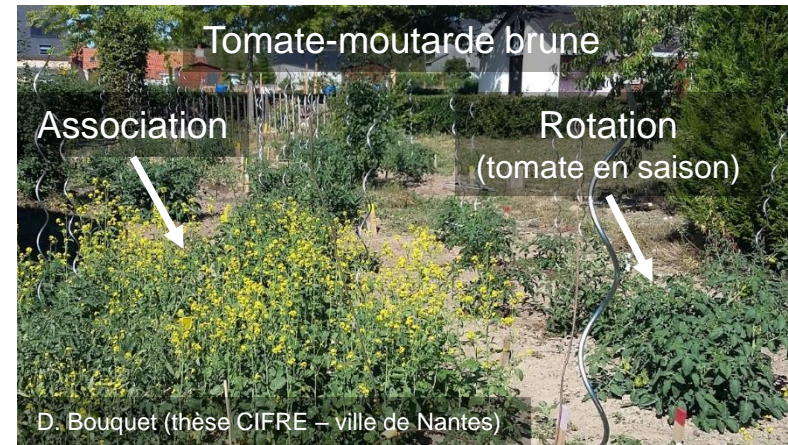
Cf. Lebeau T. (2014). Nouvelles stratégies de dépollution *in situ* de sols contaminés par des métaux par des techniques biologiques. ANSES, Bulletin de Veille Scientifique, n°25. 47-50.

Cf. Lebeau T. (2015). Dépollution des sols par phytoremédiation : réduire la durée de traitement tout en maintenant l'activité agricole. ANSES, Bulletin de Veille Scientifique, n°26. 55-58.

Système de culture avec :

- un légume « excluant »
- (ET) une plante (hyper)accumulatrice (en association ou en rotation)

Cf. base BAPPET (Base de données sur les teneurs en Eléments Traces métalliques de Plantes Potagères)



→ Teneur en Pb dans fruits < 0,1 mg/kg MF (seuil CE)

Dépolluer et valoriser la biomasse végétale :

- **Énergie** (si chaudières adaptées)
- **biocatalyseurs** (cf. travaux C. Grison, FRE 3673 CNRS)
- **Biofortification** (végétaux enrichis)

- **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 ha⁻¹
- Location des terrains : \$150 ha⁻¹
- Valeur commerciale du Ni \$30 kg⁻¹ (2008)
- 20% de la valeur du Ni pour couvrir les coûts de récupération

- **Valeur annuelle d'une culture de phytomining**

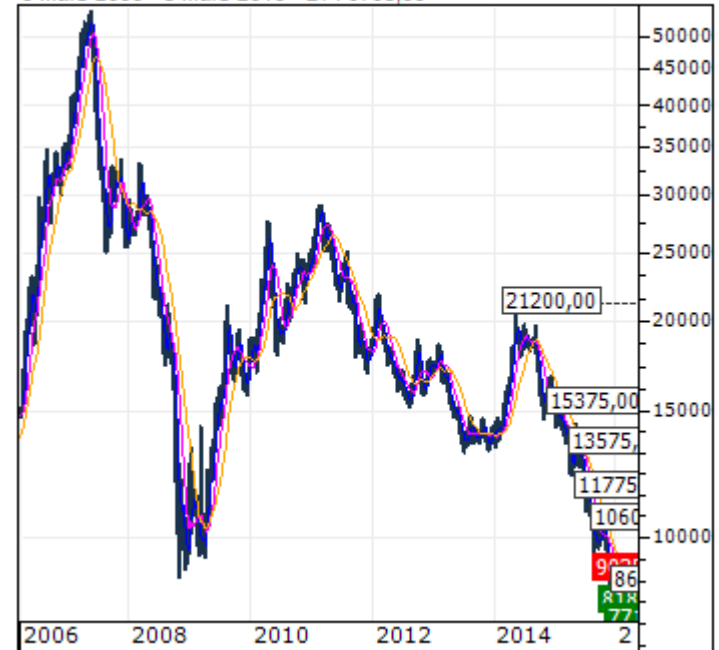
- 69 kg Ni ha⁻¹ x \$24 kg⁻¹ Ni = \$ 1656 ha⁻¹

- **Resultat :**

- $1656 - (390 + 150) = \$ 1116 \text{ ha}^{-1}$

D'après présentation Morel, 2010

6 mars 2006 - 3 mars 2016 - Dr : 8785,00



Graphiques © Surperformance.com

Marge nette 2008 ≈ 1000 €/ha

Marge nette 2016 ≈ 300 €/ha

→ Pour comparaison, marge nette du blé ≈ 100 à 300 €/ha (selon l'année)



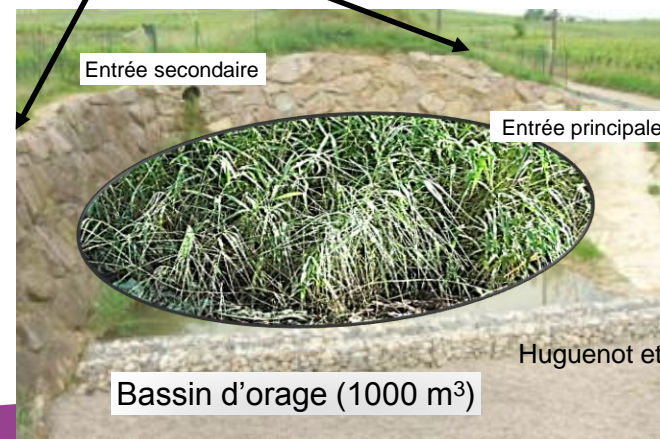
Moutarde brune dans les inter rangs de vignes, région de Carneros, Napa, Californie

Phytoextraction *in situ*
en inter rangs

Phytoextraction dans des bassins
d'orage des contaminants accumulés
dans les sédiments, issus de
l'érosion des sols



Bassin versant viticole (60ha)



Bassin d'orage (1000 m³)

Huguenot et al. 2015, ESPR

Ancienne zone industrielle d'Amsterdam (Wilschut et al. 2013)



Création de cordons de sols pollués végétalisés séparant différents modes de trafics



Parcs sur sols pollués avec phytoremédiation « naturelle »
 Zones de cheminement sans contact avec le sol pollué : évite de remplacer la terre.



Sol très pollués. Dépollution et production de biomasse à vocation énergétique



Stockage de terres sur barges (phytoextraction long terme)
 Traitement des eaux de surface dans zones humides artificielles