

Colloque final

Pollutions diffuses de la terre à la mer

1^{er} juin 2021



Concilier les contraintes du phytomanagement avec celles de la gestion et de l'usage des sites : exemples tirés de POLLUSOLS

Thierry LEBEAU (LPG UMR 6112 CNRS, Université de Nantes)



Principe de gestion des sites et sols pollués



SOURCE

En priorité, élimination de la source (excavation, traitement in situ / ex situ)

TRANSFERT

En 2nd lieu, désactivation des voies de transferts (confinement, barrières réactives, mesures constructives)

CIBLES

En dernière option, modification / restriction des usages



Quelles contraintes de gestion ?

Coût

- gestion *in situ* moins onéreuse (10-30 €/tonne *in situ* vs. 45-135 €/tonne *ex situ*)

Temporalité souvent courte

- lorsque risque immédiat (mise en sécurité des sites)
→ ne s'applique pas aux pollutions diffuses (pas de risque à court terme)
- lorsque réaménagement d'un site sous pression foncière



En 2010, sur 4,8 millions de tonnes de terre polluées gérées

57 % excavées

43 % *in situ*

(ADEME, 2012)



40% terre traitée
(dont 79,7% par voie biologique)



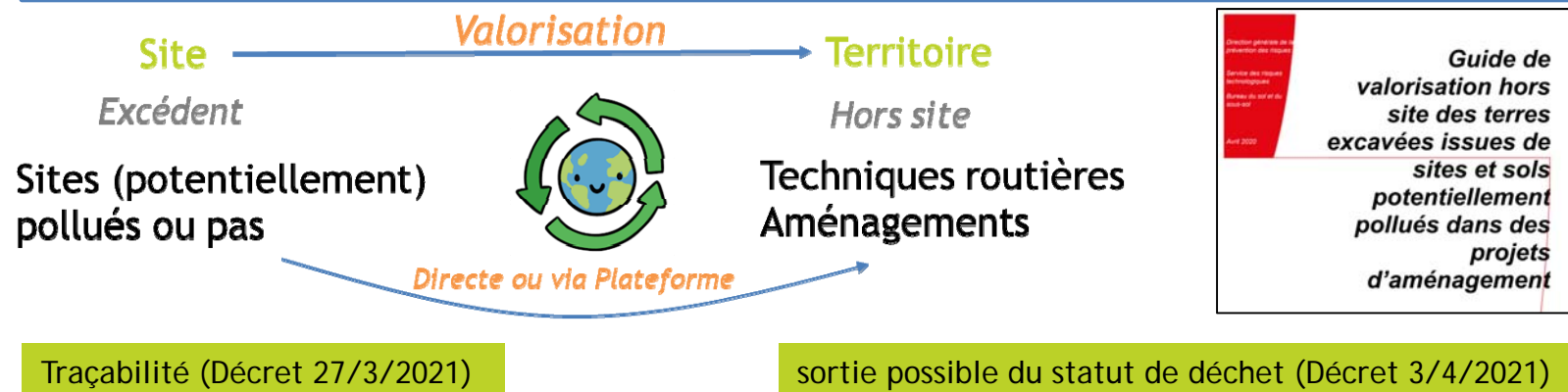
Gestion des pollutions diffuses

Méthodes employées en SSP inadaptées aux pollutions diffuses
(coûts, volumes de terre à traiter, énergie, réactifs chimiques)

*Volume de terre contaminée par l'essence au plomb (super carburant) ?
50 m de part et d'autres des routes métropolitaines (1 million de km),
contamination sur 10 cm : 10^{10} m^3 (=10 milliards m^3 !!!)*

Pour gérer des pollutions diffuses

- Privilégier les méthodes *in situ*
- Comme alternative, gérer localement les terres excavées
 - réduit l'impact C (transport)
 - réduit le gaspillage de la ressource (1 cm par pédogénèse = 100-400 ans)





Comment rendre le
phytomanagement compatible avec
les contraintes de gestion et d'usage
des sites ?



Avantages et limites du phytomanagement

Avantages

Phytoremédiation

- Des capacités démontrées en gestion de la pollution (dont dépollution)
- Préserve les propriétés des sols
- Sobre en énergie
- Faible coût
- Méthode socialement bien acceptée

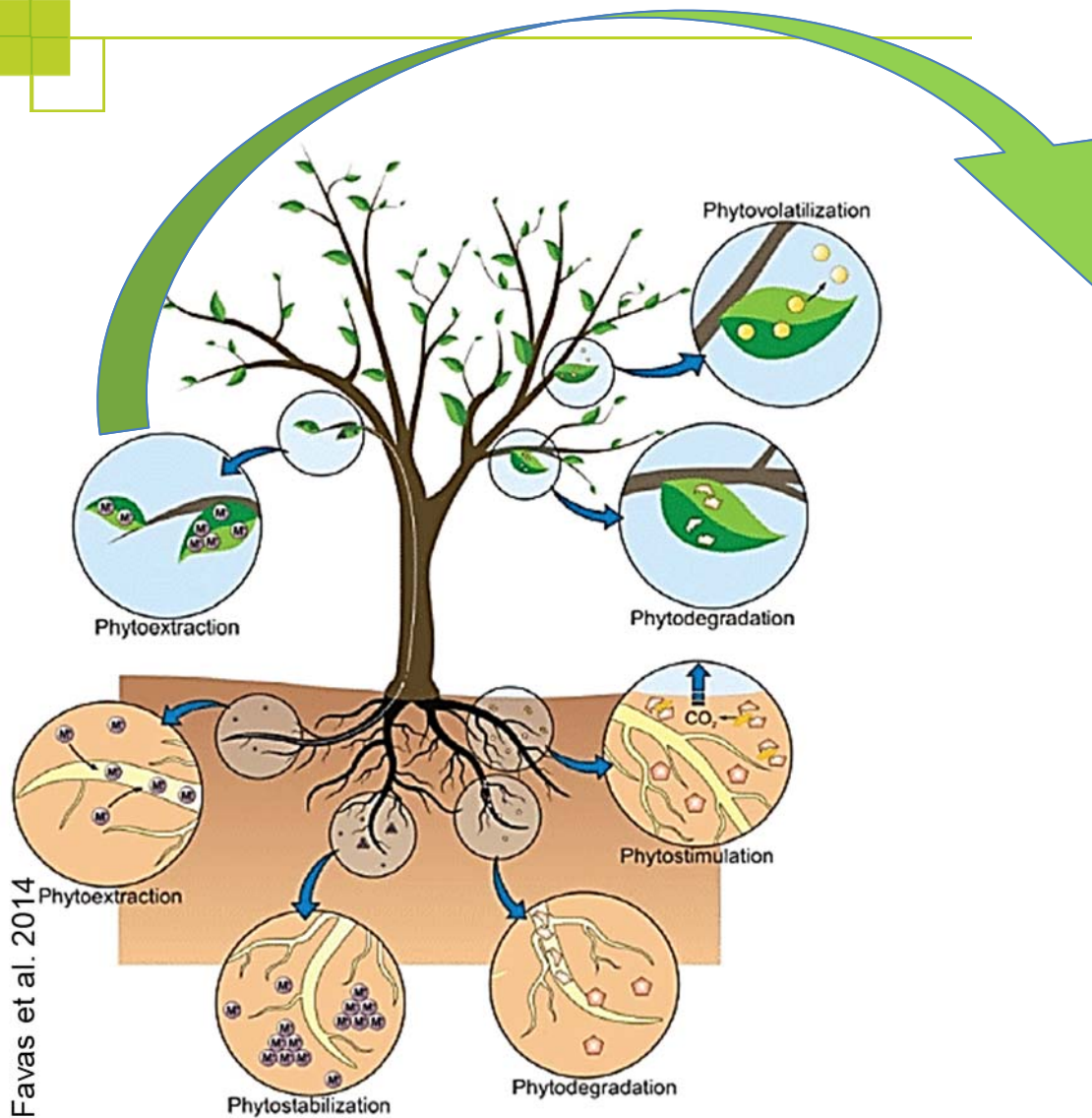
+ Autres services

- **Biomasse valorisable (bio-énergie, bio-catalyseurs)**
- **Intérêt paysager**
- **Rafrâichissement des villes**
- **Contribution à la biodiversité**

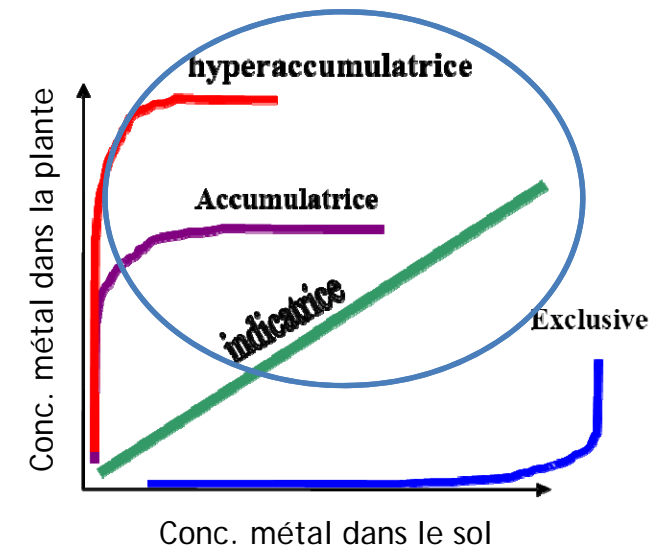
Limites

- **Lentueur → limite n°1**
- Profondeur limitée d'enracinement
- Variabilité des performances (météo/climat)
- Preuve du concept à consolider

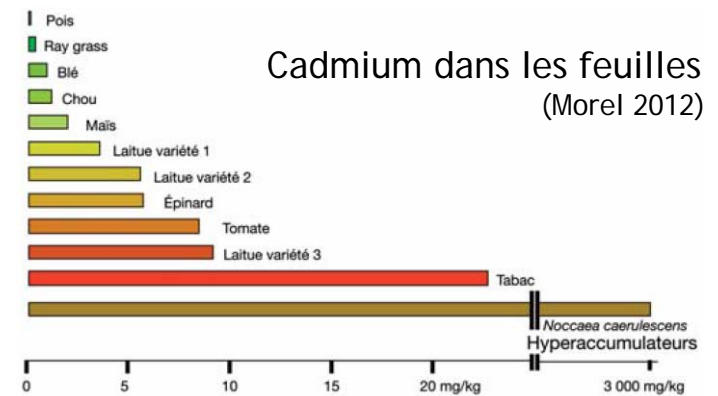
Techniques de phytoremédiation



Favas et al. 2014



(D'après Baker 1981)



Cadmium dans les feuilles
(Morel 2012)

3 cas d'étude tirés de POLLUSOLS

OBJECTIFS

1. Concilier les temporalités longue du végétal et courte de gestion des sols, et les contraintes d'usage
2. proposer des solutions peu coûteuses
3. contribuer à la gestion durable des sols et aux services écosystémiques des plantes

CAS 1

Conservation de l'usage « potager » avec restrictions le temps de l'action de la phytoextraction *in situ* (Plomb)

CAS 2

Phytoextraction *in situ* de sols viticoles et recyclage du Cu en alimentation animale

CAS 3

Phytoremédiation de terres excavées stockées verticalement en contexte urbain



Cas 1 : jardins potagers urbains

Echelle nationale

1/3 des jardins contaminés au Pb
contre 1/10 pour autres métaux
(Cu, Ni, Zn) (Joimel, 2005)

Superficie jardins familiaux France :
183 727 ha (Schwartz et al., 2013)



Plus de 60 000 ha
potentiellement contaminés



Juillet 2007



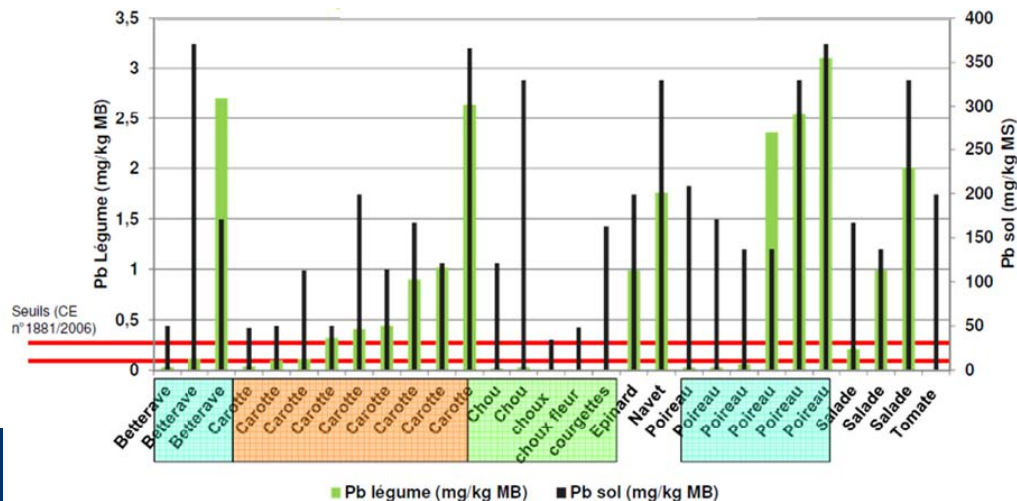
Avril 2013

Jardin partagé « Les Eglantiers » (Nantes) :

- 92 parcelles (20 000 m²)
- Pollution au plomb (170 mg/kg de sol)
- Apport de terre saine sur 3200 m² (200 000 €)



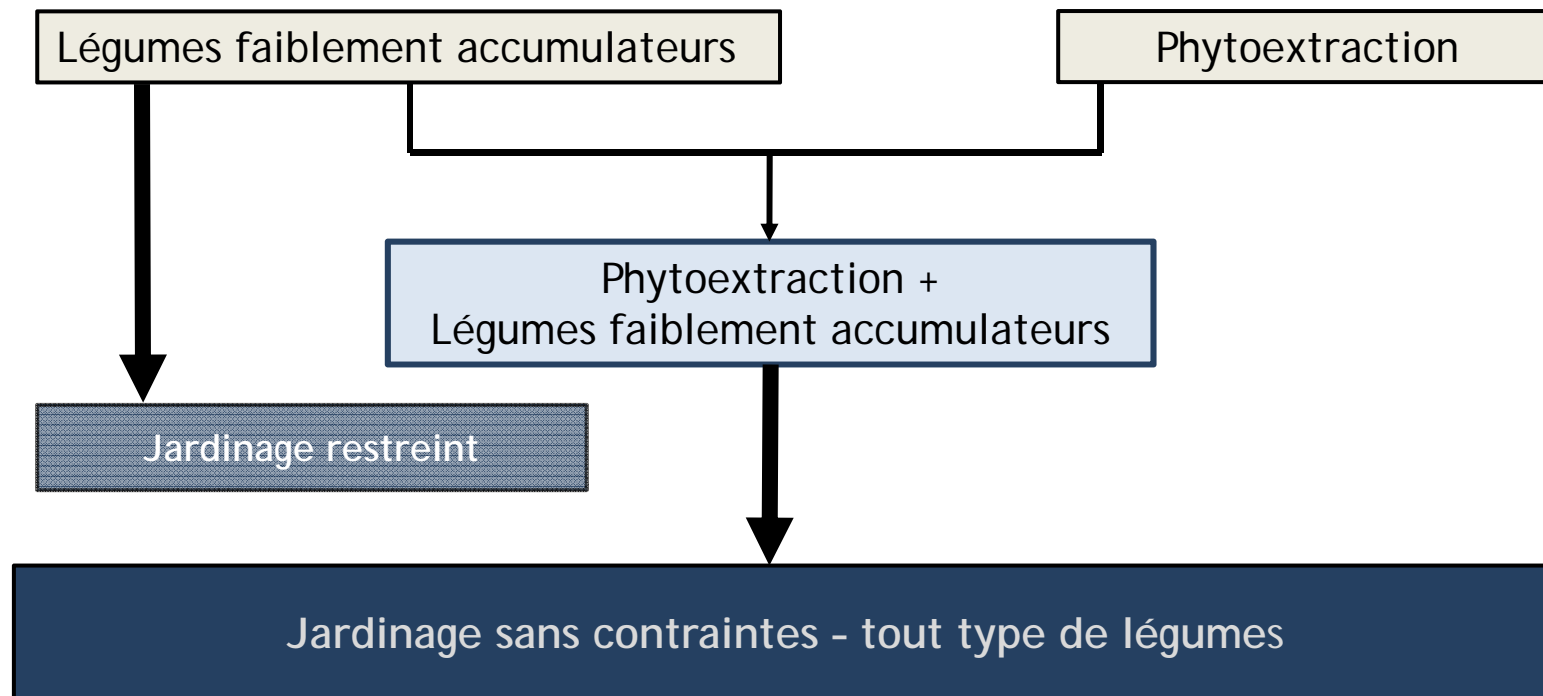
ANR



(Jean-Soro et al. 2014)

Cas 1 : jardins potagers urbains

Thèse Dorine Bouquet (2018)



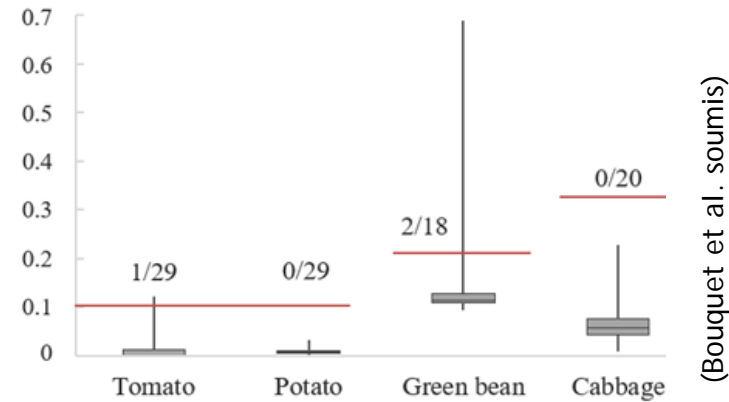
Cas 1 : jardins potagers urbains

Thèse Dorine Bouquet (2018)

| Espèce végétale | Organe | Peu accumulateur (< 0,1 ppm MF) | Moyennement accumulateur (0,1 à 0,9) | Très accumulateur (> 0,9) |
|-----------------|--------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Battavia | | Ni, Pb | Cu, Zn | Cd |
| Bette | | Ni, Pb | Cu, Zn | Cd |
| Betterave | | Cr, Ni, Pb | Cd, Cu, Zn | |
| Blé | Grain | Cr, Ni, Pb | Cd, Cu, Zn | |
| | Paille | Cr, Cu, Ni, Pb | Cd, Zn | |
| Carotte | | Cu, Ni, Pb | Zn | Cd |
| Céleri-rave | | Pb | Cu, Hg, Zn | Cd |
| Chou pommé | | Pb | Cd, Cu, Zn | Hg |
| Colza | Entier | Ni | Cu, Pb, Zn | Cd |
| | Grain | Cr, Ni, Pb | Cu, Pb, Zn | |
| Dactyle | | Ni, Pb | Cd, Cu, Zn | |
| Haricot | | Cd, Pb | Cu, Ni, Zn | |
| Laitue | | Co, Cr | Cu, Ni, Pb, Zn | Cd, Hg |
| Maïs | Grain | Cr | Cd, Cu, Ni, Pb | Zn |
| Nectarine | Fruit | Cr, Ni | Cu, Pb, Zn | Cd, Hg |
| Oignon | | Ni, Pb | Cd, Cu, Zn | |
| | | | | |
| Orge | Grain | Ni, Pb | Cd, Cu, Zn | |
| | Paille | Cu, Ni, Pb | Cd, Zn | |
| Pêche | Fruit | Cr, Ni, Pb | Cd, Cu, Hg, Zn | |
| Petit pois | | Cd, Ni, Pb | Cu, Zn | |
| Poireau | | Ni | Cu, Pb, Zn | Cd, Hg |
| Pomme de terre | | | | |
| | | Cr, Ni, Pb | Cd, Cu, Zn | |
| Seigle | Grain | Ni | Cd, Cu, Zn | |
| | Paille | Cu, Ni | Cd, Zn | |
| Trèfle | | Cd, Ni, Pb | Cr, Cu, Zn | |

(Tremel-Schaub et Feix, 2005)

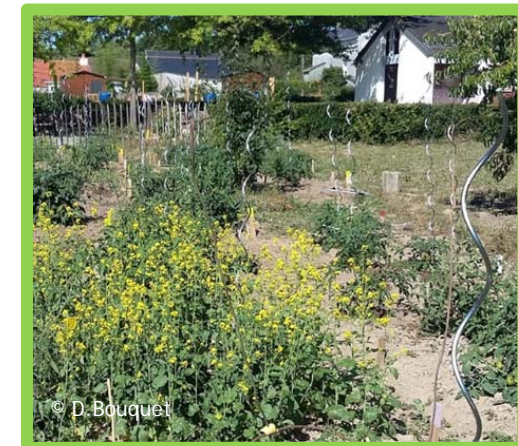
Pb amounts in vegetables (mg/kg FM)



(Bouquet et al. soumis)

Légumes autorisés : chou, haricot, pomme de terre, tomate

Association tomate (n'accumule pas Pb) + *Brassica juncea* (accumule Pb)

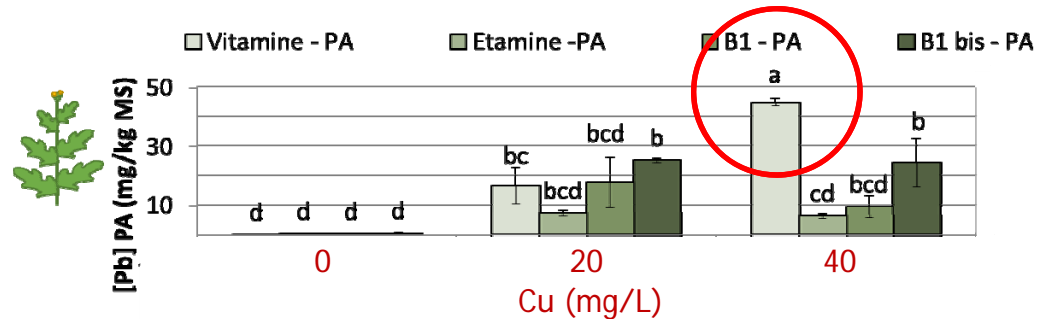


Cas 1 : jardins potagers urbains

Thèse Dorine Bouquet (2018)

Utilisation de concentrations de Pb « bioaccessibles » (hydroponie)

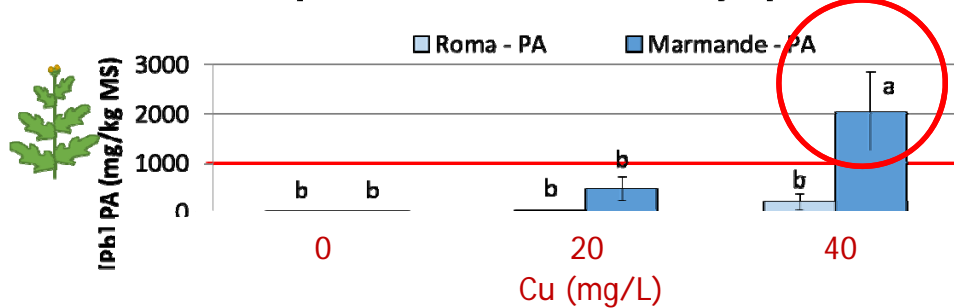
• Evaluation du potentiel d'accumulation de *Brassica juncea*



(Bouquet et al. soumis)



• Evaluation du potentiel d'accumulation de *Lycopersicon esculentum*



(Bouquet et al. soumis)



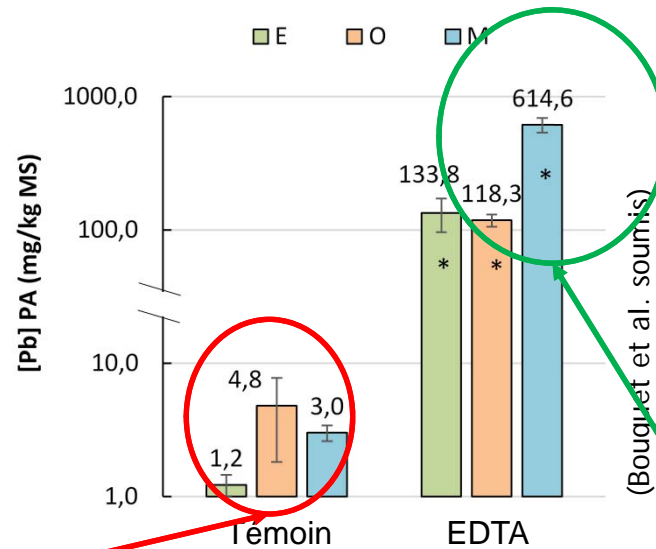
Concentration de plomb dans les tiges/feuilles de tomate 20 à 100 fois supérieures à celles de *Brassica juncea*

Tomate

plante 2 en 1 : fruit consommable et plante dépolluante

Cas 1 : jardins potagers urbains

Thèse Dorine Bouquet (2018)



Pas d'expression du potentiel de phytoextraction sans mobilisation du plomb du sol

Jusqu'à 615 mg Pb/kg tomate avec EDTA

→ à remplacer par un complexant efficace, non toxique et peu coûteux



CAS 2 : Réduire la charge en Cu des sols viticoles

Objectifs

- Compenser les apports annuels de Cu (fongicides)
- Réduire l'érosion
- Valoriser Cu en alimentation animale



Phytoextraction *in situ* :

1. Inter rangs des vignes
2. Friches viticoles
3. Parcelles d'épandage de lisier

CAS 2 : Réduire la charge en Cu des sols viticoles

Stock de Cu sol viticole (exemple)

- 365 mg/kg (0,365 kg/T) x 1200 T/ha (contamination sur 10 cm épaisseur)
= 438 kg Cu/ha



Quantité/ha +/- biodisponibles

- 1,4 mg Cu/kg (extrait CaCl₂)
→ 1,7 kg Cu/ha (0,4%)
- 135 mg Cu/kg (extrait EDTA)
→ 162 kg Cu/ha (37%)

Traitements fongicides (Qté max. autorisée de Cu)

- 4 kg Cu/ha/an (règlementation EU 2018/1981)

Performances attendues en phytoextraction pour compenser les apports :

200-400 mg Cu/kg plante x 10 T/ha/an = 2-4 kg/ha/an

La phytoextraction pourrait :

- Rapidement extraire du sol le stock de cuivre le plus biodisponible (i.e. à risque)
- Compenser une part non négligeable des apports de bouillie bordelaise

CAS 2 : Réduire la charge en Cu des sols viticoles

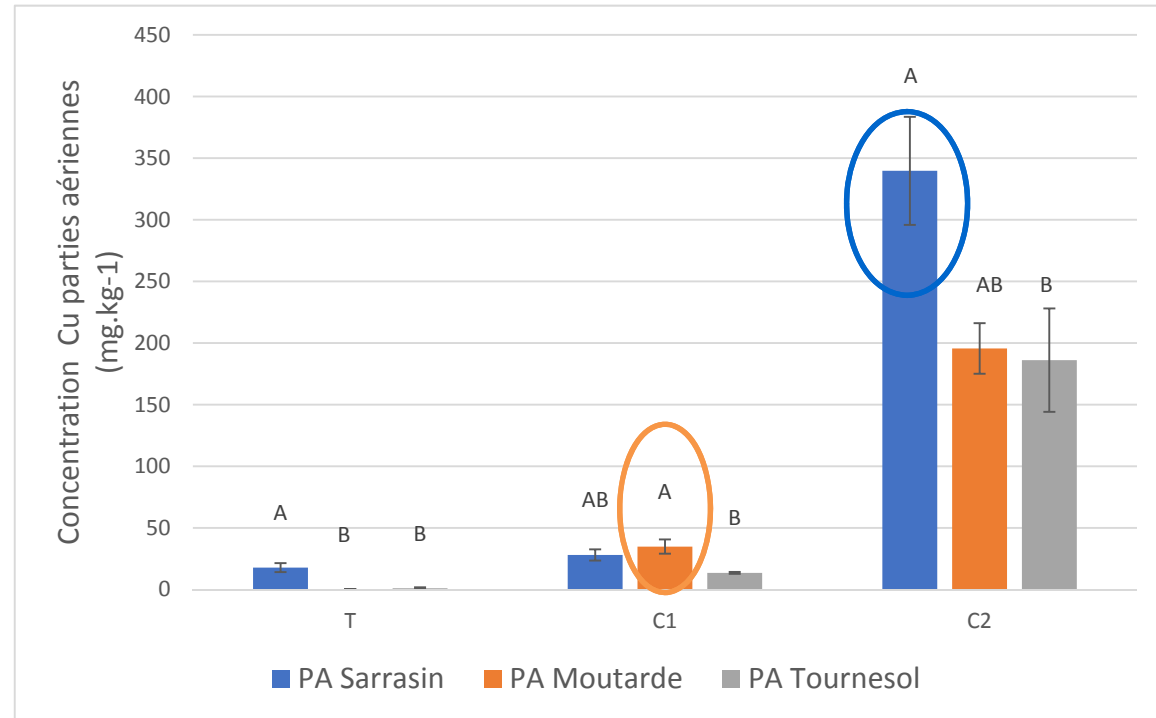
Thèse Justine Garraud (en cours)

Inter rang des vignes

- Avoine
- Moutarde
- Raygrass
- Sarrazin

Friches viticoles

- Chanvre
- Tournesol



[Cu]

0,02 mg/L
(traces milieu Hoagland)

1,8 mg/L
(extrait CaCl₂)

18 mg/L
(10% extrait EDTA)

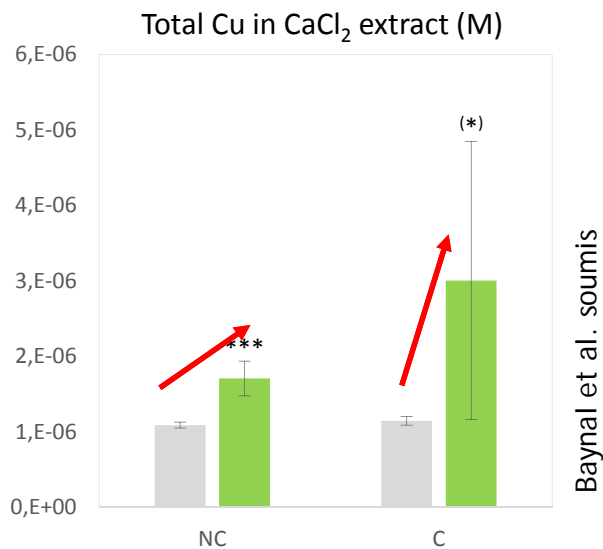
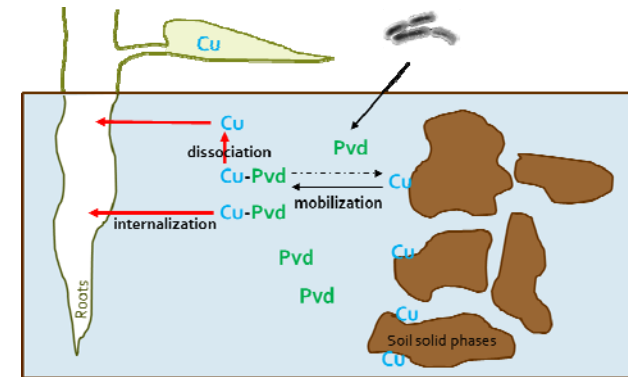
disponible

accessible

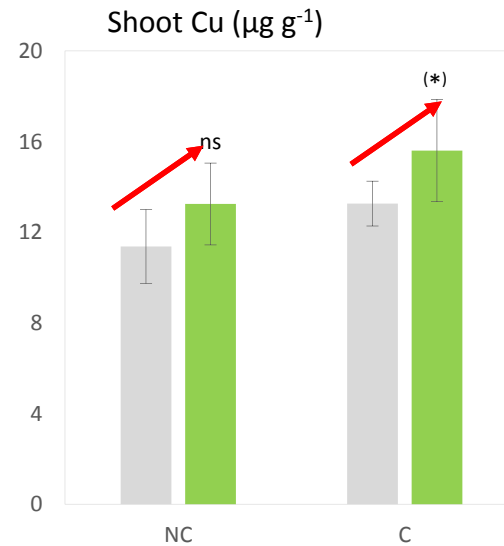
Accélérer la mobilisation de Cu

CAS 2 : Réduire la charge en Cu des sols viticoles

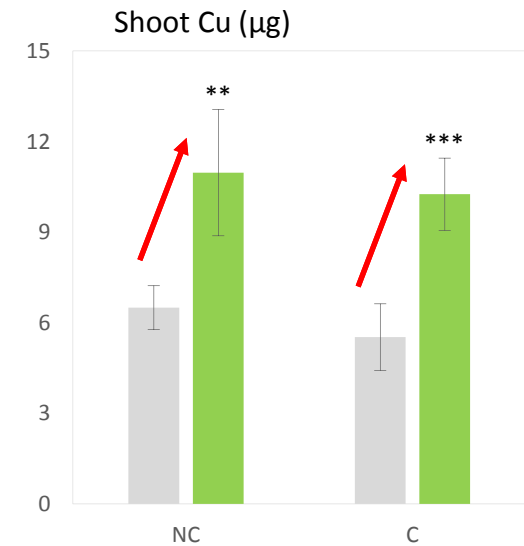
Effet de la bioaugmentation de sols viticoles (non carbonaté vs. carbonaté) avec *Pseudomonas putida* (similaire à ATCC 8209)



Augmentation de la mobilisation du Cu du sol (Non Carbonaté (NC) et Carbonaté (C))



Augmentation de la concentration de Cu dans les parties aériennes (sol C)



Doublement de la quantité de Cu (sols NC et C)

CAS 3 : Stockage vertical végétalisé de terres excavées

Terres urbaines peu contaminées (souvent évacuées en ISD)



Excavation et constitution de réserves de terre gérées localement



Phyomanagement (dépollution, paysage, énergie, biodiversité, etc)

Réemploi des terres une fois assainies (affranchissement des contraintes de temps)

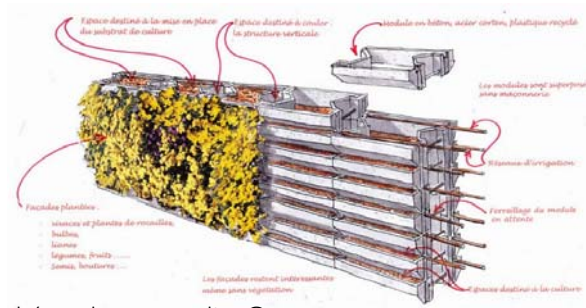


Schéma du Mur Jardin. © Terra Ferma



Stocker verticalement la terre polluée

- Réduire l'emprise foncière
- Concilier temps court de l'aménagement vs. long du végétal
- Gérer localement les terres peu polluées (réduire bilan C lié au transport)
- Constituer une ressource de terre végétale (mobilisable à +/- long terme)

Coût biocentre

| | Coût (HT) |
|---|---------------------|
| Terrassement terres polluées (1 750 m ³) | 8,6 à 10,5 k€ |
| Suivi des travaux (1 750 m ³) | 6,5 à 7,8 k€ |
| Transport / élimination (biocentre) (1 750 m ³) | 233 à 280 k€ |
| TOTAL | 248 à 298 k€ |

Coût mur

- 1750 m³ : 2170 k€
- Déduire achat terre végétale (87 k€) et transport (35 à 875 k€)
- **TOTAL : 1208-2048 k€**

→ Mur non rentable au coût actuel du m² !



Merci de votre attention

