

21 NOVEMBRE 2017  
AUDITORIUM DE LA GRANDE ARCHE – PARIS-  
SOLS URBAINS ET BIODIVERSITE  
RÉSULTATS DE RECHERCHE ET D'EXPERIMENTATION

- *Phytoremédiation : exemple du parc départemental du Peuple de l'Herbe à Carrières sous Poissy (78)*



# *LE PARC DU PEUPLE DE L'HERBE*

- Espace naturel exceptionnel de 130 ha, classé en ZNIEFF, dont les travaux ont débuté en 2014 et qui a été inauguré en Juillet 2017.
- Equipe pluridisciplinaire avec Agence TER mandataire.
- Cout : 23 ME
- Un site d'anciennes gravières remblayées avec une pollution des sols aux métaux, organo-chlorés et aux hydrocarbures;
- Traiter les déblais pollués sur site dans 3 jardins de phytoremédiation de 400 m<sup>2</sup> plutôt qu'une évacuation.





# *LA PHYTOREMEDIATION*

- La **phytorestauration ou phytoremédiation** (phyto restoration pour les anglophones) est l'utilisation de végétaux supérieurs pour extraire, dégrader ou stabiliser des polluants contenus dans les différents compartiments d'un écosystème, à savoir les sols, les eaux ou l'air.
- Les polluants concernés sont les polluants organiques persistants (PCB, pesticides), les dérivés pétroliers (HCT, HAP), les composés chlorés et organiques volatiles (TCE), les résidus de munitions (TNT) et les polluants métalliques y compris radionucléides ou non organiques (cyanure)



La phytorestauration inclue l'ensemble des facteurs biotiques (végétaux supérieurs, mousses, champignons, algues, micro-organismes associés à la rhizosphère) et les différents facteurs abiotiques (substrats, facteurs physico-chimiques ) qui conditionnent la vie végétale.

C'est devenu une technologie à part entière.

L'ensemble des techniques qui font appel à la phytorestauration est dénommé **Phytotechnologie**.

La 14<sup>ème</sup> conférence internationale de Phytotechnologie a eu lieu à Montréal en Septembre 2017

Utilisée depuis les années 90, bien implanté en Amérique du Nord, encore faiblement employée en Europe et exceptionnelle en France restant à des stades expérimentaux

# ORIGINE DU CONCEPT



- L'idée d'utiliser les végétaux pour dépolluer les sols trouve en partie son origine dans la présence de certaines plantes spécifiques à des sols à forte concentration en métaux. Ces plantes sont dénommées **les métalphytes**.
- Cette caractéristique a notamment été utilisée par les géologues-miniers comme indicateur de gîtes minéraux.
- Ainsi, la **pensée calaminaire** (*Viola calaminaria* (DC.) Lej. appartient à l'alliance végétale caractérisant les sols riches en zinc d'Europe centrale et d'Europe de l'Ouest (Lambinon et Auquier, 1963) ;



# HISTORIQUE

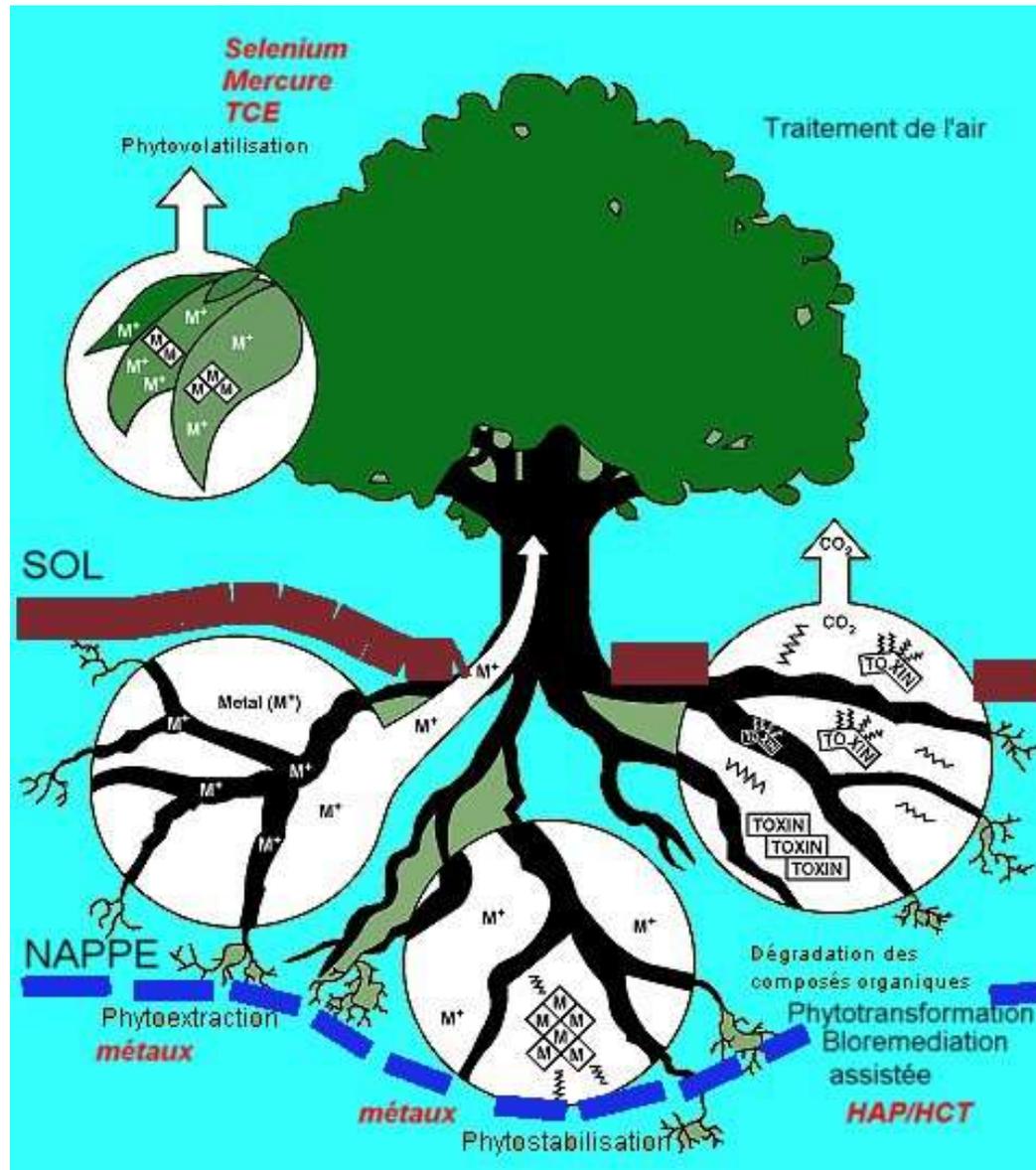
- La phytorestauration prend naissance en Russie dans les années 1910 avec la publication des travaux de **Vladimir Vernadsky**, père de la géochimie moderne et écologiste avant l'heure (la biosphère).
- Les premiers travaux de phytorestauration des sols contaminés par les métaux lourds datent de 1953 en URSS, et ont plus particulièrement été testés dans l'Oural. **Le Laboratoire d'Ecologie Appliquée de l'Université Gorki de l'Oural à Ekaterinbourg** a mis au point des protocoles pour traiter les sols pollués (Mme Tchibrik).
- L'agence USA EPA a créé un site en Décembre 2007 qui fait le point sur la phytotechnologie : <https://clu-in.org/products/phyto/>
- Récent Guide de l'ADEME (Mars 2017): [http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/phyto\\_010191.pdf](http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/phyto_010191.pdf)
- Plusieurs projets de recherches sur ces thématiques ( Michel CHALOT, CNRS, Université de Besançon)



# TECHNIQUES DE LA PHYTOTECHNOLOGIE

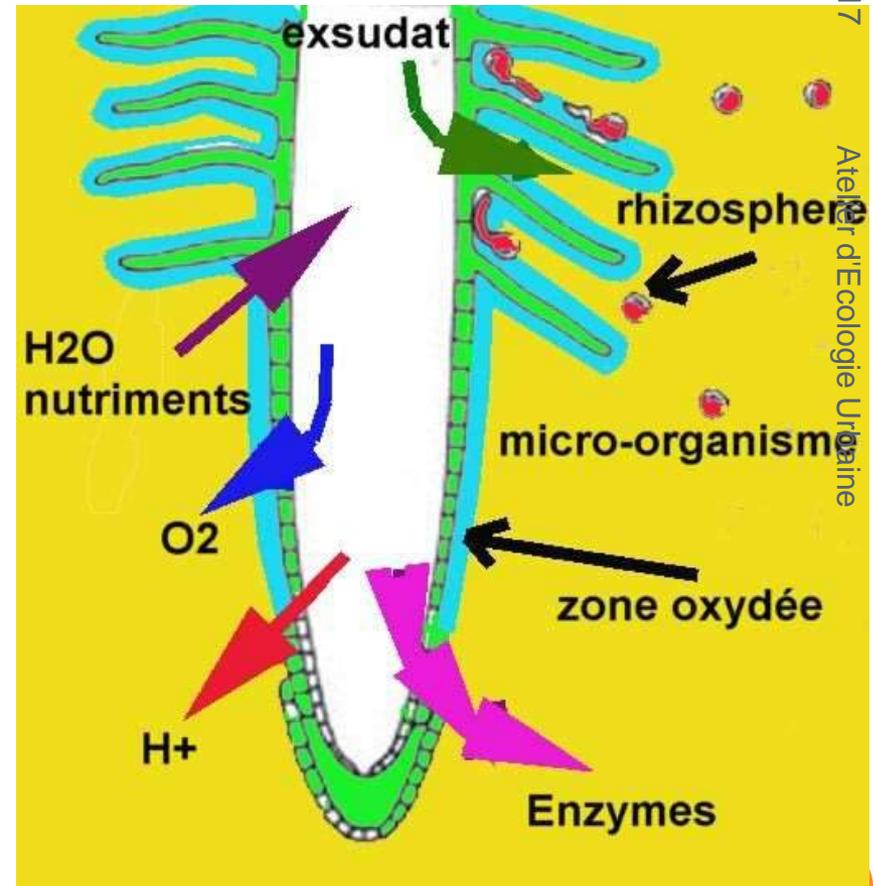
- Phytoextraction
- Phytodegradation
- Bioremédiation assistée ou phytostimulation
- Phytostabilisation
- Phytovolatilisation et phyto rabattement
- Rhizofiltration
- Phytodeshydratation





# LES FONDAMENTAUX

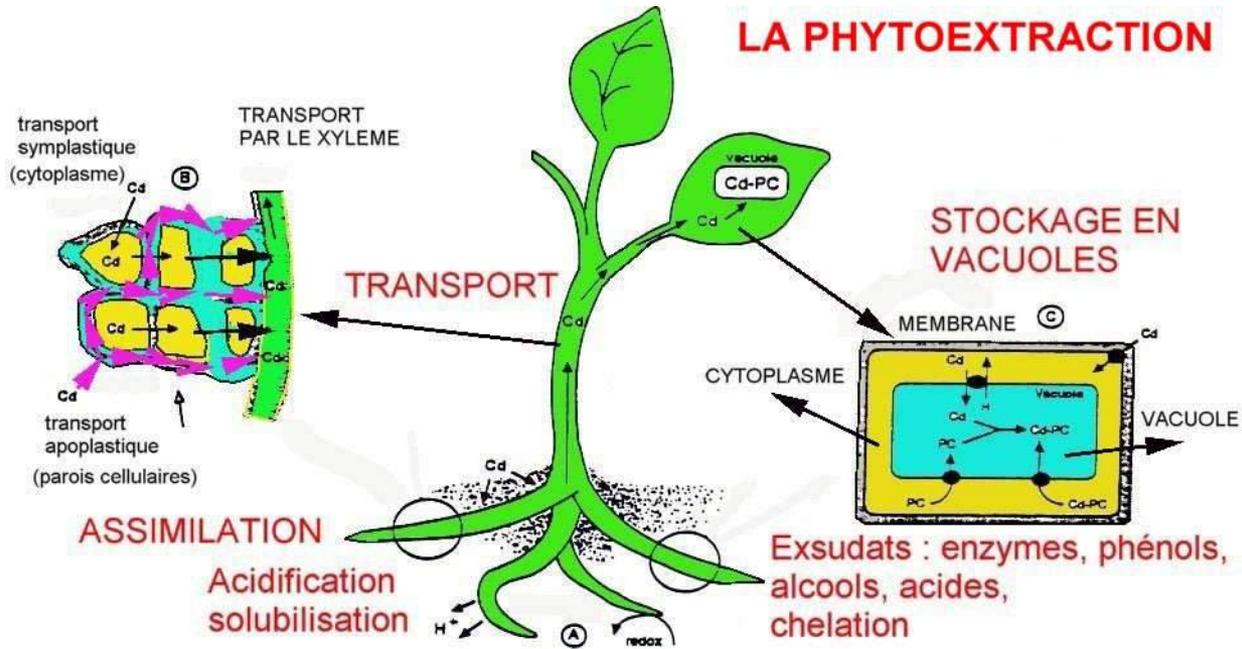
- La racine est la clé de voûte de la phytoremédiation
- La rhizosphère et ses microorganismes
- Les échanges entre le substrat et les tissus
- Une véritable usine biochimique



# PHYTOEXTRACTION

- la **phytoextraction** consiste à décontaminer un site en accumulant les polluants dans les parties aériennes des végétaux.
- Le principe est de cultiver et de récolter des plantes (arbres, vivaces ou annuelles, plantes fourragères ou vivrières) accumulant les métaux lourds couplés ou non à un amendement organique ou minéral, ou à un correcteur de pH (acidifiant en général).
- Les polluants sont extraits du sol par absorption racinaire, transférés dans les organes aériens puis exportés par fauchage ou faucardage pour incinération ou valorisation en fonction de la nature du polluant, de sa concentration et de l'usage du végétal.
- La phytoextraction peut également déboucher sur une technologie minière (*Phytobiomining*) : c'est l'utilisation de végétaux et de bactéries pour extraire des métaux présents à faible teneur dans les sols.
- La **phytoextraction est surtout appliquée pour les métaux lourds et pour les produits organiques**

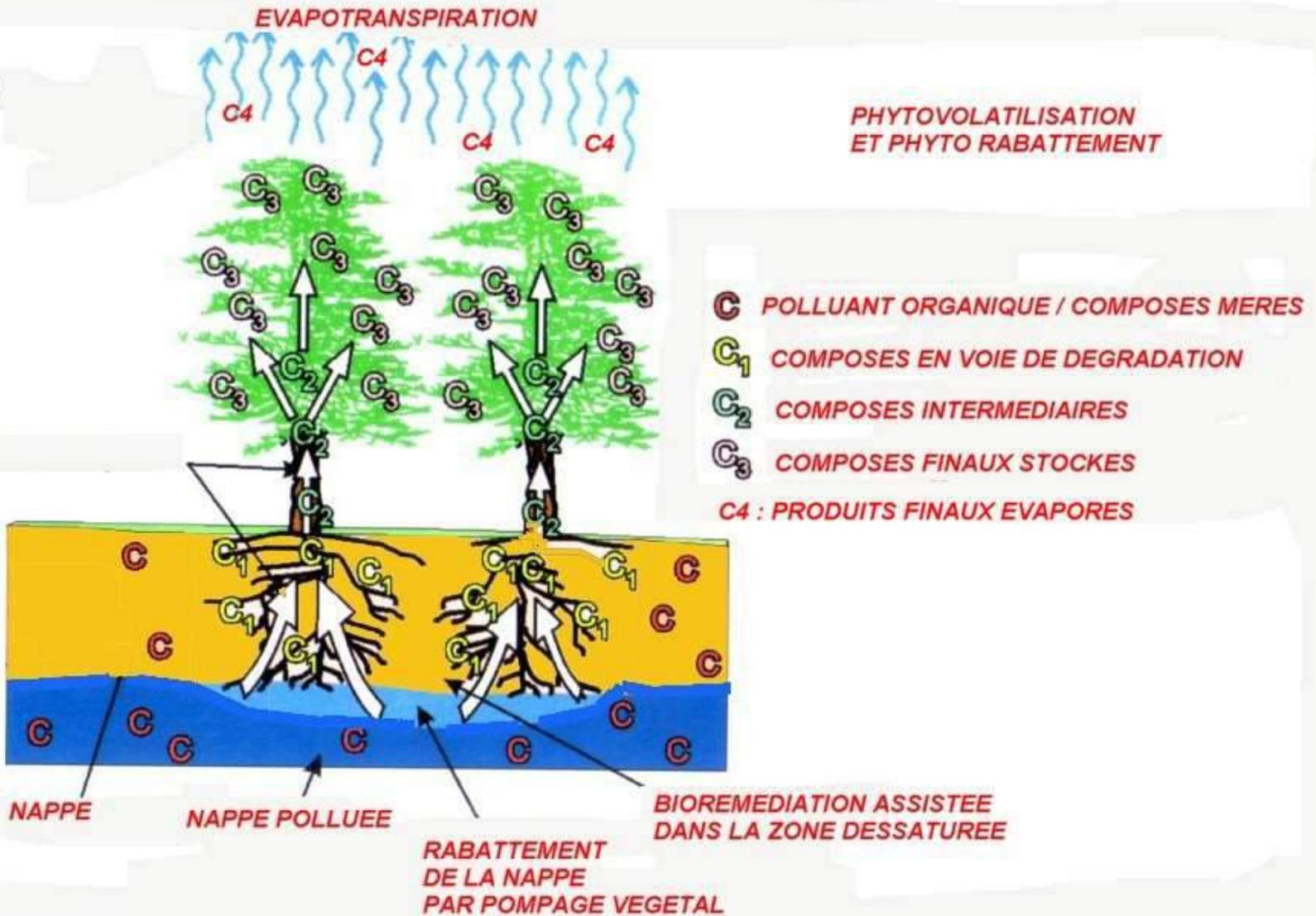




# PHYTOVOLATILISATION

- La **phytovolatilisation** consiste à utiliser les plantes pour volatiliser des polluants métalliques (arsenic, mercure et sélénium) ou organiques (solvants comme le TCE ou trichloréthylène) ;
- Les polluants sont adsorbés par les plantes grâce aux phénomènes d'évapotranspiration puis sont transformés et rejetés dans l'atmosphère.
- Le **phyto rabattement** ou contrôle hydraulique est une variante qui consiste à rabattre la nappe par le biais du pompage végétal et de bloquer ainsi une partie des polluants.



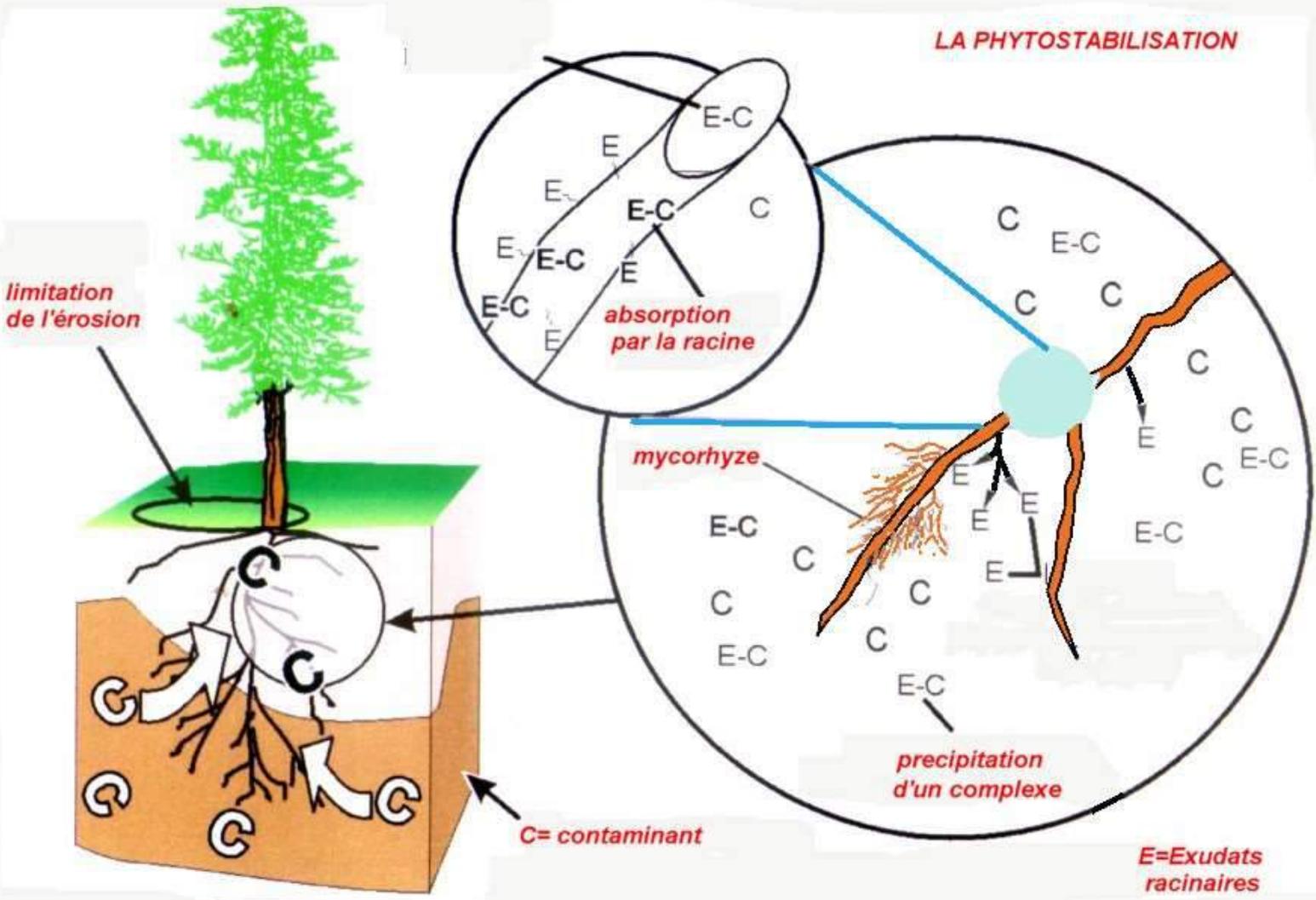


# PHYTOSTABILISATION

- La **phytostabilisation** ou **phytoséquestration** consiste à utiliser les plantes, avec ou sans amendement spécifique, pour réduire la mobilité des polluants des sols par précipitation, adsorption ou absorption par les racines, ou simplement en limitant l'érosion
- Les polluants sont bloqués in situ souvent sous une forme complexe moins toxique (phosphate, carbonate).
- La **phytostabilisation** est une alternative peu coûteuse pour immobiliser une source de pollution (*Tisserand, 1998*) notamment dans le cas de friches industrielles sources permanentes de pollution par érosion et envol de poussières.
- Le principe peut consister à mettre en œuvre à la fois un amendement bloquant la disponibilité des métaux et une végétalisation sous forme de pelouses ou de taillis tolérants aux métaux.
- Les polluants sont toujours présents, mais inactivés et non lixiviables ;
- Adapté pour les métaux lourds (As, Pb, Cd, Cr, Cu, Zn);



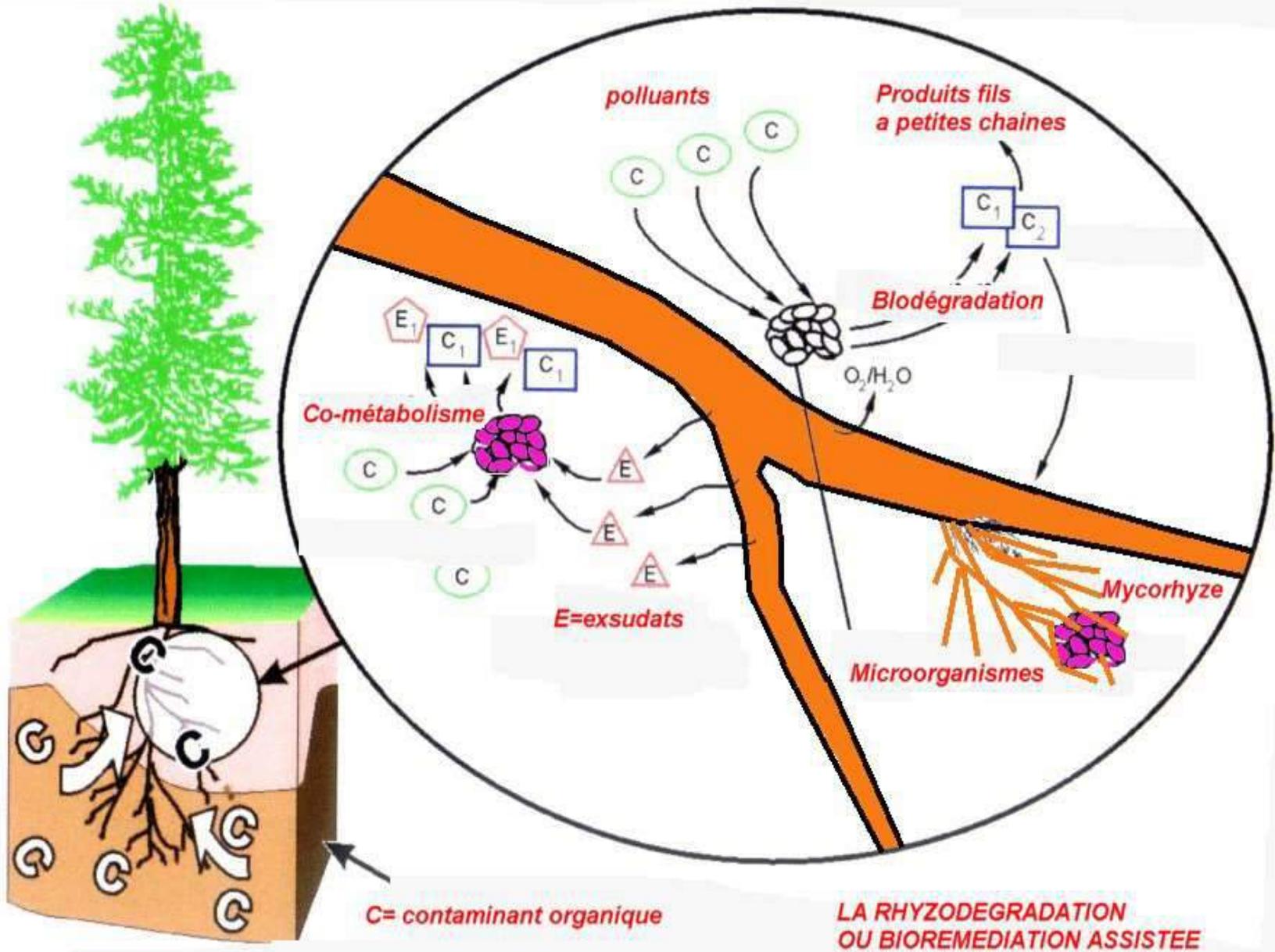
### LA PHYTOSTABILISATION



# PHYTODEGRADATION ET PHYTOSTIMULATION RACINAIRE

- **La phytodégradation** consiste à utiliser la rhizosphère et son écosystème bactérien pour dégrader les polluants organiques.
- **La phytostimulation ou bioremediation assistée** consiste à stimuler naturellement la rhizosphère par ajouts de nutriments ou de bactéries ce qui permet de créer un milieu particulièrement propice aux micro-organismes pour dégrader les polluants organiques (hydrocarbures, solvants) ; les polluants sont dégradés in situ et transformés essentiellement en eau et en CO<sub>2</sub>





# LES ORIENTATIONS ACTUELLES

- **Les méthodes naturelles** consistent à utiliser des plantes sélectionnées et des microorganismes associés pour une action de dépollution spécifique ( hybrides et de cultivars dotés d'un potentiel d'hyper accumulation ou d'une tolérance spécifique associée à une forte biomasse ).
- **Les méthodes assistées** favorisent, induisent ou décuplent l'action de dépollution. L'action de dépollution de la plante est favorisée soit **génétiquement** soit **biochimiquement**. Dans le premier cas, sont créées des plantes transgéniques qui possèdent un gène spécifique permettant la tolérance ou l'accumulation du polluant. Dans le second cas, les agents biochimiques utilisés favorisent la disponibilité des polluants dans le milieu (correcteur de pH, amendements) et/ou leur mobilité dans la plante en permettant une meilleure translocation des racines vers les parties aériennes (chélatés).

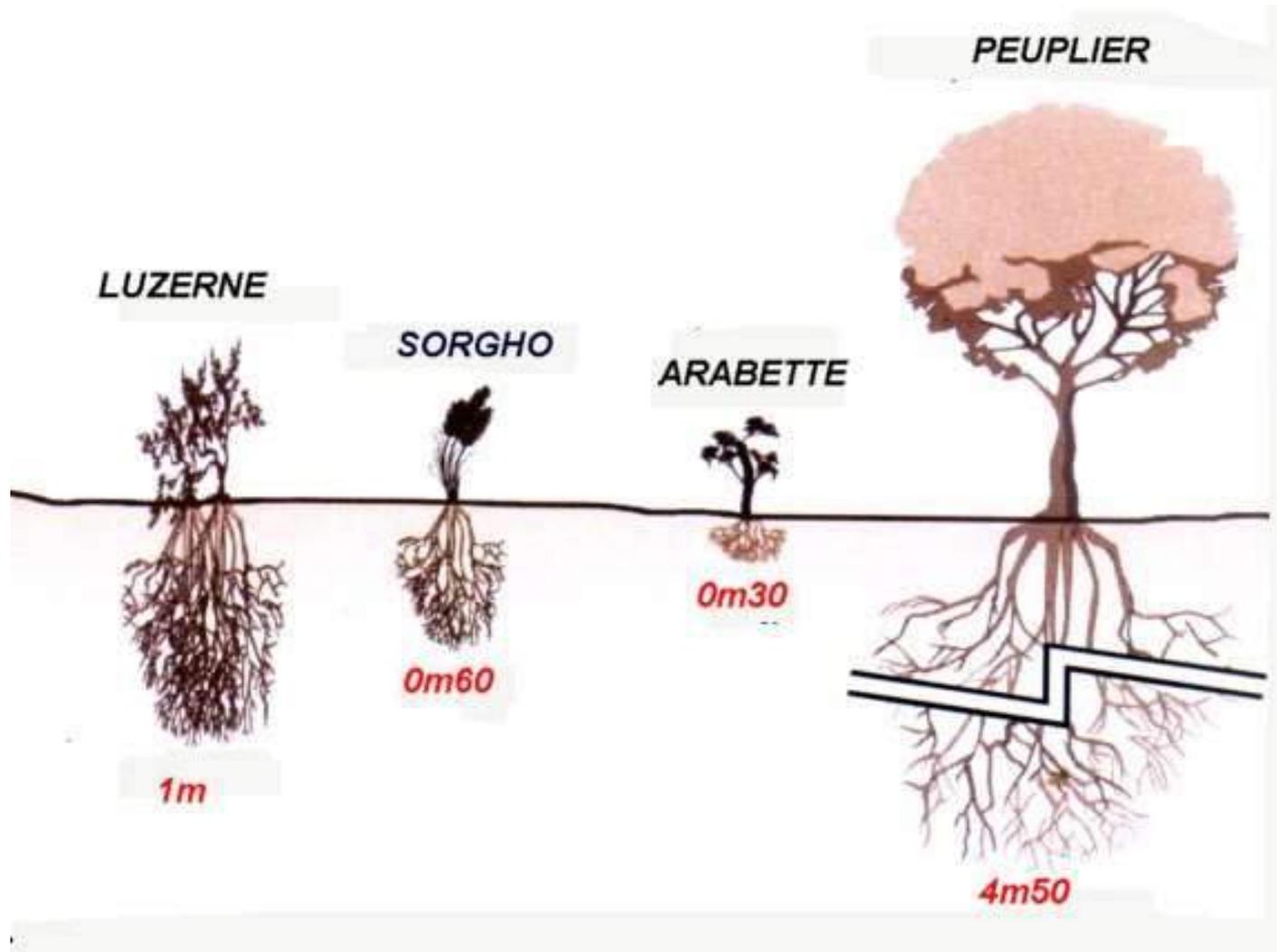


# ATOUTS ET CONTRAINTES

Technique de Phytoremédiation	Avantages	Inconvénients.
Phytoremédiation par les arbres ; taillis de saules à courte rotation ;peupleraie	Biomasse importante Profondeur >3m Valorisation énergétique	Relargage possible par les feuilles.
Phytoremédiation par des plantes vivaces ou annuelles	Biofixation pouvant être importante en teneurs	Biomasse faible Profondeur faible <0m50 Temps de dépollution long.
Phytoremédiation par plantes fourragères ou à haut rendement	Biomasse importante Valorisation	Risque d'intégration à la chaîne alimentaire
Phytoremédiation avec ajout d'activateur	Biofixation ou dégradation importante	Risque de lessivage des métaux Pollution des nappes
Phytoremédiation avec plante génétiquement modifiée	Biofixation ou dégradation importante	Risque de pollution génétique



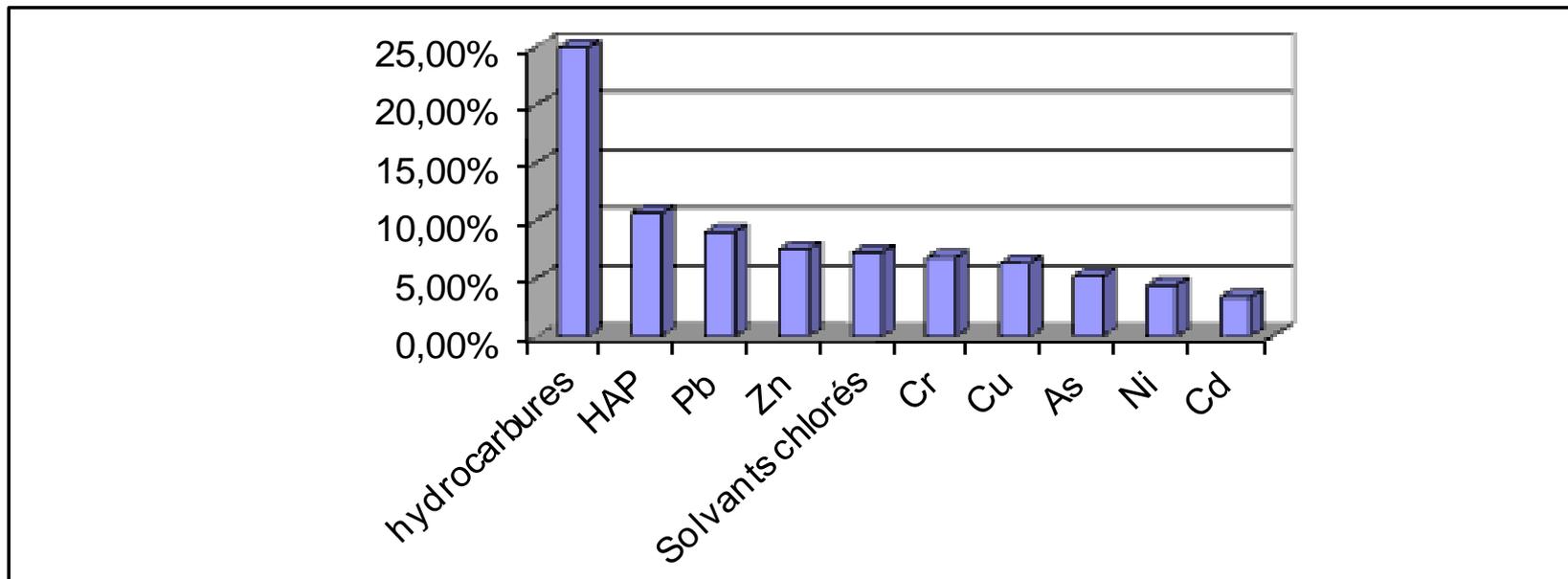
# LES VÉGÉTAUX EPURATEURS ET LEUR INFLUENCE



# APPLICATION : LES POLLUANTS LES PLUS RENCONTRÉS

Novembre 2017

Atelier d'Ecologie Urbaine



# LES PLANTES LES PLUS UTILISÉES : LES FOURRAGÈRES ET VIVRIÈRES

- *Medicago sativa* : phytostabilisation
- *Brassica juncea* : tolérante aux métaux et aux radionucléides; forte biomasse (18 t/ha)
- *Helianthus annuus* : tolérant à l'uranium, césium et aux métaux; phytoextraction avec chélateurs
- *Sorghum bicolor* : tolérant aux métaux (Cu et Zn) par ses mycorhizes.
- *Hordeum vulgare* et *Avena sativa* : phytoextraction du Zn avec activateur



# LES ARBRES LES PLUS UTILISÉS

- Salix sp : tolérant au cadmium;
- Populus alba : phytoextraction du Cd et Zn mais concentration dans les feuilles;
- Populus deltoides : barrières hydrauliques et phytovolatilisation des solvants
- Populus X OGM : phytovolatilisation du mercure méthyl
- Robinia pseudacacia: phytostabilisation des métaux
- Taxodium distichum



# LES JARDINS ÉPURATEURS DU PARC DU PEUPLE DE L'HERBE.

- Trois jardins orientés selon les polluants :
- un jardin agroforestier ex situ (TTCR saulaie) en milieu acide ( phytoextraction des ETM, COHV, HAP)
- Un jardin ex situ de prairie métallicole à Brassicacées ( Phytoextraction des ETM)
- Un jardin in situ agroforestier et luzerne (phytodégradation des hydrocarbures, phytostabilisation des ETM).

Ex situ : jardin réalisé dans un casier étanche comblé par des déblais pollués et maîtrisé par des filtres avant rejet au milieu naturel

In situ : jardin par épandage de terre peu polluée.



# CARACTERISITIKUES DES TERRES DES DEBLAIS

Novembre 2017

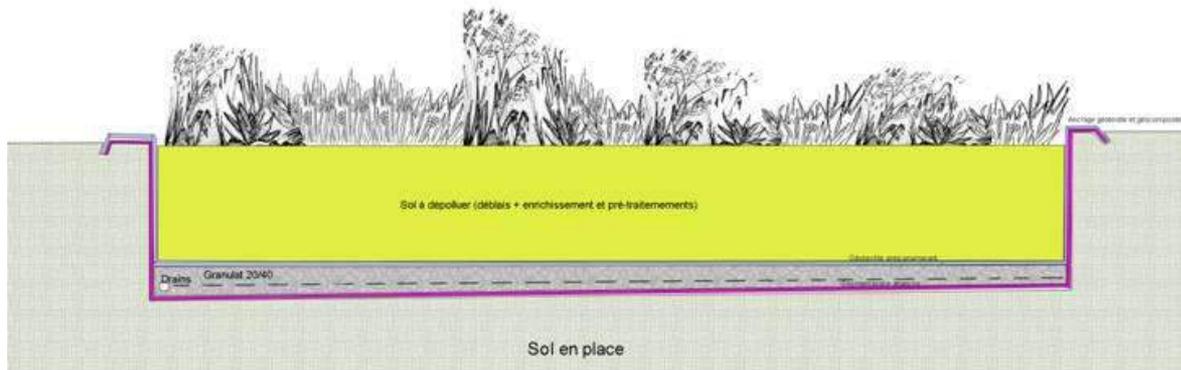
Atelier d'Ecologie Urbaine

Sondages de l'étude géotechnique	Polluants le plus concernés	Concentration au droit des sondages considérés (mg/kg)	Fond géochimique local considéré * (mg/kg)	Ecosystème épurateur envisagé
P18bis	Cu Hg Pb Zn HAP (somme 16) Trichloroéthylène	796 7,2 430 320 52 1,7	20 0,10 50 100 5 <1	<b>Jardin Ex-situ agroforestier en milieu acide.</b> Phytoextraction ETM, Dégradation des chaînes polycycliques des HAP Volatilisation COHV
P19	Cu Pb Zn	88 516 360	20 50 100	<b>Jardin Ex-situ de prairie métallicole à Brassicacea</b> Phytoextraction ETM.
S25	Alcanes C10-C40	570	50	<b>Jardin In-situ agroforestier associé à la luzerne</b> Dégradation Alcanes

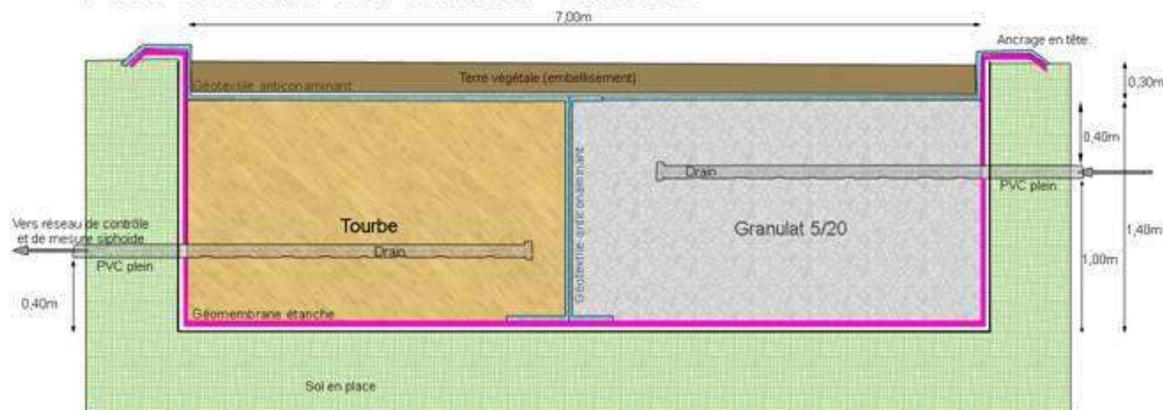


# JARDINS EX SITU

Jardin de phytoremediation - structure



Filtre à tourbe et à cailloux - structure



# JARDIN EX SITU



Novembre 2017

Atelier d'Ecologie Urbaine



# FILTRES DE TRAITEMENT



# JARDINS IN SITU



Novembre 2017

Atelier d'Ecologie Urbaine



# CONCLUSIONS

- Site approprié à la méthode de phytotechnologie (pas de contrainte temporelle ou spatiale, niveau de pollution moyen non écotoxique)
- Jardin épurateur expérimental
- Suivi analytique pour vérifier l'atténuation et la qualité des végétaux.

