



UFR Sciences

2, Bd Lavoisier
49045 ANGERS Cedex 01



AGROCAMPUS OUEST

65 rue de St Brieuc, CS 84 215, BP
35042 - RENNES Cedex

Université de Rennes I

1, 2 rue du Thabor, CS 46510 - 35065
RENNES Cedex



ASTREDHOR Sud-Ouest

Site Inra – 71, avenue Edouard Bourlaux
CS 20032
33882 VILLENAVE D'ORNON

Mémoire de Fin d'Etudes

Master 2 Sciences Technologie Santé
Mention Biologie et Technologie du Végétal
Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)

Parcours : I Productions Végétales Spécialisées / Option IC : Filières de l'Horticulture et Végétal Urbain

Année universitaire 2015-2016

Evaluation d'un procédé de dépollution des sols contaminés par du plomb, à l'aide de plantes ornementales associées à des microorganismes : approche de la phytoremédiation

Par : Marie SOURZAT



Soutenu à Angers le : 19 septembre 2016

Maître de stage : Mr Jean-Marc DEOGRATIAS



ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

M2 ProTeV

2014-2015

Je, soussigné (e) :

Melle Sourzat Marie

déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée.

En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour ce rapport, rédigé au cours de mon Master 2 « ProTeV ».

Je m'engage également à respecter les consignes données pour la rédaction de ce rapport.

A : Villenave d'Ornon

Le : 29/08/2016

Signature :

SOURZAT

L'auteur du présent document vous autorise à le partager, reproduire, distribuer et communiquer selon les conditions suivantes :



- Vous devez le citer en l'attribuant de la manière indiquée par l'auteur (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'il approuve votre utilisation de l'œuvre).
- Vous n'avez pas le droit d'utiliser ce document à des fins commerciales.
- Vous n'avez pas le droit de le modifier, de le transformer ou de l'adapter.

Consulter la licence creative commons complète en français :
<http://creativecommons.org/licences/by-nc-nd/2.0/fr/>

Ces conditions d'utilisation (attribution, pas d'utilisation commerciale, pas de modification) sont symbolisées par les icônes positionnées en pied de page.



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Tout d'abord, je remercie mon maître de stage Mr Jean-Marc Deogratias pour ses conseils, son partage et pour m'avoir fait confiance en acceptant ma candidature. J'adresse aussi mes remerciements à la Directrice d'Astredhor Sud-Ouest, Mme Catherine Sapin.

Je remercie aussi mon tuteur de stage, Mme Claire Campion, pour son accompagnement et sa disponibilité ainsi que Mme Sandrine Travier, co-responsable du Master 2 « Production et Technologie du Végétal », toute l'équipe pédagogique et les intervenants professionnels du Master 2 « Production et Technologie du Végétal ».

Je remercie également toute l'équipe d'Astredhor Sud-Ouest (Christophe Bournerie, France David, Anthony Droui, Romain Jouannic, Frédéric Labat, Sylvie Lemmet, Emilie Maugin, Michèle Penichon, Vincent Prod'homme et Olivier Riaudel) pour leur accueil et leur esprit d'équipe. Je remercie également les stagiaires : Mlles Marie Passedat et Gergana Zhelyazova ainsi que Mr Luc Martin pour leur gentillesse et leur humour et plus particulièrement Mlle Marielle Braune pour son aide précieuse lors de mon stage.

Je tiens à remercier Mr Lilian Marchand de Bordeaux Métropole pour son soutien, sa disponibilité et son partage ainsi que Mr Eric Pesme et Mr Frédéric Wartel qui m'ont permis d'avancer sur mon expérimentation. Je remercie aussi tous ceux qui m'ont permis d'en apprendre plus sur le sujet de la phytoremédiation.

Enfin, je tiens à remercier ceux qui ont participé au contenu de ce rapport et qui m'ont conseillé : ma famille et mes amis.

Table des matières

INTRODUCTION	1
1. Présentation de l'établissement	1
2. Problématique générale et objectifs du stage	1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
1. Contexte et enjeux de l'étude	2
1.1. Le sol et la pollution	2
1.2. Les problèmes dus aux sols pollués en France	3
1.3. Les traitements mis en place	3
1.4. Les Eléments-Traces Métalliques.....	4
2. La phytoremédiation	5
2.1. L'Histoire de la phytoremédiation	5
2.2. Les définitions	6
2.3. La participation des microorganismes	7
2.4. Les coûts de mise en place et de suivi.....	10
2.5. Les projets mis en place et les acteurs de la phytoremédiation	11
2.6. Les plantes dépolluantes	11
MATERIELS ET METHODES	15
1. Matériels d'étude.....	15
1.1. Le matériel végétal.....	15
1.2. Les microorganismes	15
2. Méthodes.....	16
2.1. Techniques culturales	16
2.2. Dispositifs expérimentaux	17
3. Notations effectuées	21
4. Tests statistiques utilisés	22
RESULTATS	23
1. Comparaison du développement et du comportement des plantes	23
1.1. Poids frais et poids secs sur support perlite avant inoculation au plomb	23
1.2. Classes racinaires	23
2. Observations des plantes après inoculation au plomb	24
2.1. Partie racinaire.....	24
2.2. Partie aérienne	24
3. Observations microscopiques	25
4. Analyse du plomb dans les supports de culture	25
4.1. Sur perlite.....	25
4.2. Sur sol pollué.....	26
DISCUSSION.....	26
1. Analyse de l'efficacité de la plante pour la phytoremédiation	26
1.1. Mise en place	26
1.2. Entretien.....	27
1.3. Efficacité des plantes à dépolluer	27
2. Analyse de l'efficacité des champignons mycorhiziens.....	29
3. Attentes sur les futurs essais	30
3.1. Essai sur sol pollué.....	30
3.2. Essai sur site pollué.....	31
4. Aspect social de la phytoremédiation	31
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	32
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	33
1. Bibliographie.....	33
2. Sitographie	36
ANNEXES	37

Glossaire

Adsorption	Propriété que présentent les solides et les liquides de retenir certaines substances (gaz ou liquides) dans la totalité de leur volume.	(Larousse, 2016)
Absorption	Pénétration de liquides ou de gaz dans un organisme vivant à travers une paroi perméable pour eux.	(Larousse, 2016)
Arbuscule	Structure en forme d'arbre formée par le champignon symbiotique à l'intérieur d'une cellule végétale dans le cas des endomycorhizes.	(Garbaye, 2013)
Bande de Caspary	Épaississement hydrophobe des parois radiales des cellules de l'endoderme racinaire.	(Garbaye, 2013)
Biodisponibilité	Propriété d'une substance à atteindre les membranes cellulaires des organismes vivants.	(Bert, 2012)
Biotisation	Inoculation de microorganismes qui exercent un effet théoriquement bénéfique sur la vigueur et la protection des plantes.	(Langlois, 2012)
Clone	Ensemble d'individus issus par multiplication végétative d'une même espèce, possédant un patrimoine génétique identique et qui sont de fait des copies conformes d'un seul et même individu.	(Garbaye, 2013)
Cortex	Tissu externe compris entre le cylindre central et l'épiderme (ou rhizoderme) dans la structure primaire d'une jeune racine fine.	(Garbaye, 2013)
Glomaline	Glycoprotéine sécrétée en abondance par les champignons endomycorhiziens et qui joue un grand rôle dans la formation et la stabilité de la structure du sol.	(Garbaye, 2013)
Glycoprotéine	Molécule composite formée d'une protéine associée à un ou plusieurs sucres.	(Garbaye, 2013)
Hyphe	Filament mycélien de champignon.	(Garbaye, 2013)
Interstitiel	Qui est contenu dans la partie, de dimension le plus souvent microscopique, comprise entre les cristaux d'une roche.	(Larousse, 2016)
Lysimétrique	Se dit d'un dispositif permettant d'étudier quantitativement l'évolution de l'eau dans un profil de sol (notamment la percolation et (ou) l'évapotranspiration).	(CNRTL, 2012)
Manteau	Tissu fongique caractéristique des ectomycorhizes, constitué d'une couche épaisse d'hyphes enchevêtrés qui gaignent complètement la racine courte.	(Garbaye, 2013)
Mycélium	Ensemble des filaments constituant le corps d'un champignon.	(Garbaye, 2013)
Mycorhize	Organe composite formé par l'association symbiotique entre une racine et un champignon.	(Garbaye, 2013)
Perlite	Lave constituée d'un verre volcanique acide hydraté qui après broyage et chauffage brutal à 900-1000°C, présente la particularité de s'expanser.	(Morel, Poncet et Rivière, 2000)
Plasmodesme	Chacun des nombreux prolongements cytoplasmiques unissant les cellules voisines les unes aux autres et permettant toutes sortes d'échanges chimiques entre elles.	(Larousse, 2016)
Polluant	Se dit de tout composé chimique (la plupart du temps synthétique ou issu des activités industrielles) qui présente un danger lorsqu'il est accidentellement introduit dans l'environnement.	(Garbaye, 2013)
Réseau de Hartig	Chez les ectomycorhizes, mycélium hyper-ramifié qui entoure certaines cellules du cortex racinaire et assure une grande surface d'échanges entre les deux partenaires de la symbiose.	(Garbaye, 2013)
Symbiose	Association intime, durable et à bénéfice mutuel entre deux organismes d'espèces différentes.	(Garbaye, 2013)
Vacuole	Organite cellulaire constitué d'une inclusion cellulaire, entourée d'une membrane, dans le cytoplasme.	(Garbaye, 2013)
Vésicule	Chez les endomycorhizes arbusculaires, renflement globuleux formé par le champignon symbiotique à l'intérieur de certaines cellules du cortex racinaire.	(Garbaye, 2013)

Liste des abréviations et des symboles

ACP	Analyse en Composantes Principales
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ASTREDHOR	Association nationale de STRuctures d'Expérimentation et de Démonstrations en HORTiculture
BAM	Bactérie Auxiliaire de la Mycorhization
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
ETM	Elément Trace Métallique
GIE	Groupement d'Intérêt Economique
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques : substances organiques naturelles ou surtout engendrées par les activités industrielles, extrêmement toxiques
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry : Technique Analytique à Plasma Induit – Spectrométrie à Emission Optique
INERIS	Institut National de l'EnviRonnement industriel et des rISques
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
Kg	Kilogramme
L	Litre
LIEC	Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux
Mg	Milligramme
MgO	Oxyde de magnésium
OE	Oligo-élément
pH	Potentiel hydrogène : mesure de l'activité chimique des ions hydrogène H^+ en solution
US-EPA	US-Environmental Protection Agency
[Pb]	Concentration en plomb

Liste des Figures

Figure n°1 : Cartographie des 6 unités de bassin et des 10 stations d'expérimentation de l'Institut Technique Horticole, ASTREDHOR

Figure n°2 : Répartitions des actions menées sur les sites pollués

Figure n°3 : Cycle des polluants dans le système sol-plante

Figure n°4 : Les différentes stratégies de remédiation des sols pollués

Figure n°5 : Répartitions des différentes origines du plomb dans tous les éléments le contenant

Figure n°6 : Les différentes techniques de phytoremédiation

Figure n°7 : Arbre de décision des différents types de phytoremédiation

Figure n°8 : Schéma des différentes structures des champignons endomycorhiziens à arbuscules

Figure n°9 : Comparaison des coûts des différentes techniques en euros/tonne de sol traité

Figure n°10 : Comparaison des coûts pour différentes techniques en euros/m² de sol traité

Figure n°11 : Concentration en Zinc de *Potentilla griffithii* sur des sols miniers (mg/kg)

Figure n°12 : Poids secs des plantes (g), concentration (mg/kg) et quantité de plomb (mg) extrait dans les plantes

Figure n°13 : Transport des éléments-traces vers la racine, par diffusion et flux de masse

Figure n°14 : Transport des éléments-traces dans la racine par la voie symplasmique ou apoplasmique

Figure n°15 : Photographies des fleurs de neuf variétés étudiées dans les essais sur perlite et sur sol pollué (15A : *Geranium sanguineum*, 15B : *Geranium macrorrhizum*, 15C : *Geranium x 'Cantabrigiense'* et 15D : *Geranium x 'Rozanne'*, 15E : *Grevillea juniperina*, 15F : *Grevillea lanigera* 'Mount Tamboritha', 15G : *Grevillea rosmarinifolia* 'Jenkinsii', 15H : *Ceanothus thyrsiflorus* 'Skylark', 15I : *Potentilla fruticosa* 'Goldfinger',)

Figure n°16 : Photographies des eucalyptus étudiés dans l'essai sur sol pollué (16A : *Eucalyptus gundal* Clone 208 et 16B : *Eucalyptus gundal* Clone 645)

Figure n°17 : Schéma de la mise en place des caisses et du bac de rétention pour les essais sur perlite et sur sol pollué

Figure n°18 : Photographies des Sondes EasyAG® 50 (18A) et du boîtier Sentek MULTI® (18B) pour l'arrosage

Figure n°19 : Représentations graphiques des irrigations et de l'humidité générale du sol pour l'essai sur perlite

Figure n°20 : Schéma du dispositif expérimental de l'essai sur perlite

Figure n°21 : Calculs effectués pour l'inoculation au plomb dans la perlite

Figure n°22 : Photographie de la bâche permettant de faire sécher les plantes inoculées au plomb

Figure n°23 : Schéma du dispositif expérimental de l'essai sur sol pollué

Figure n°24 : Cartographie et photographie du lieu du prélèvement du sol pollué

Figure n°25 : Photographie de la mini-pelle remplissant les caisses de sol pollué

Figure n°26 : Photographies du séchage du sol (26A), du tamisage du sol (26B), de l'écrasement des mottes (26C) et du tri des mottes (26D et 26E)

Figure n°27 : Photographies des bacs extérieurs mis en place avec du sol pollué (27A : Bac n°1, 27B : Bac n°2 et 27C : Bac n°3)

Figure n°28 : Photographies de toutes les étapes du protocole de coloration des racines (28A : nettoyage des racines, 28B : bain-marie à 90°C, 28C : apport du KOH à 10%, 28D : effet du KOH, 28E : blanchiment des racines, 28F : coloration des racines et 28G : lames à observer)

Figure n°29 : Classes d'enracinement des géraniums et des arbustes

Figure n°30 : Plan factoriel des poids frais et des poids secs en fonction des espèces, des parties de la plante et de la symbiose mycorhizienne

Figure n°31 : Graphique du nombre total de plantes par classe racinaire pour la notation n°3 en fonction des espèces de plantes

Figure n°32 : Graphique du nombre total de plantes par classe racinaire pour la notation n°2 en fonction de la symbiose mycorhizienne des plantes

Figure n°33 : Graphique du nombre total de plantes par classe racinaire pour la notation n°3 en fonction de la symbiose mycorhizienne des plantes

Figure n°34 : Plan factoriel des tailles, des poids frais et des concentrations en plomb en fonction de la partie racinaire des espèces, de la symbiose mycorhizienne et de la présence ou l'absence de plomb

Figure n°35 : Graphique des concentrations en plomb dans les parties racinaires des espèces en fonction de la symbiose mycorhizienne et de la présence ou l'absence de plomb (cf. codes page 22)

Figure n°36 : Plan factoriel des tailles, des poids frais et des concentrations en plomb en fonction de la partie aérienne des espèces, de la symbiose mycorhizienne et de la présence ou l'absence de plomb

Figure n°37 : Graphique des concentrations en plomb dans les parties aériennes des espèces en fonction de la symbiose mycorhizienne et de la présence ou l'absence de plomb (cf. codes page 22)

Figure n°38 : Photographies des observations microscopiques (x40) des racines pour déterminer l'état de la symbiose mycorhizienne (38A : Hyphe fongique, 38B : Hyphe fongique, 38C : Vésicules et hyphe fongique, 38D : Arbuscule fongique intra-cellulaire, 38E : Vésicules et hyphes fongiques et 38F : Arbuscule fongique)

Figure n°39 : Photographies des symptômes provoqués par des ravageurs (39A : Symptômes provoqués par des cochenilles sur *C. thyrsiflorus*, 39B : *Pseudococcus sp.* (la cochenille farineuse), 39C : Symptômes provoqués par des thrips sur *G. sanguineum* et 39D : *Frankliniella occidentalis* (le thrips californien)

Figure n°40 : Photographie de l'essai mis en place par Bordeaux Métropole

Liste des Tableaux

Tableau n°1 : Avantages et inconvénients de la phytoremédiation

Tableau n°2 : Liste non exhaustive et description des principaux acteurs de la phytoremédiation

Tableau n°3 : Liste des plantes étudiées et leur description

Tableau n°4 : Numéros donnés aux espèces, aux différentes parties de la plante, à la symbiose mycorhizienne et au plomb

Tableau n°5 : Minimums, moyennes et maximums des poids frais, des tailles, des concentrations en plomb en fonction des parties racinaire ou aérienne des plantes

Tableau n°6 : Concentrations en plomb dans les perlites en fonction des espèces mises en place et de la symbiose mycorhizienne

Liste des Annexes

Annexe n°I : Liste non exhaustive des principaux projets recensés en France I

Annexe n°II : Liste des substrats et des fertilisants utilisés pour chaque espèce de plante pour l'essai sur perlite II

Annexe n°III : Liste des substrats et des fertilisants utilisés pour chaque espèce de plante pour l'essai sur sol polluéIII

Annexe n°IV : Tableau de toutes les personnes contactées durant le stage IV

Annexe n°V : Tableau de notation pour un suivi des plantes ornementales après application de plomb V

Annexe n°VI : Analyse du premier prélèvement de sol pollué (feuille recto-verso) VI

Annexe n°VII : Analyse du deuxième prélèvement de sol pollué (feuille recto-verso) VII

Annexe n°VIII : Analyse du troisième prélèvement de sol pollué (feuille recto-verso) VIII

Annexe n°IX : Analyse du prélèvement du sol de la station (feuille recto-verso) IX

Annexe n°X : Analyse de terre du mélange de sol de la station et de terre végétale X

Annexe n°XI : Analyse de terre du mélange de sol pollué et de terre végétale XI



Figure n°1 : Cartographie des 6 unités de bassin et des 10 stations d'expérimentation de l'Institut Technique Horticole, ASTREDHOR
(ASTREDHOR, 2016)

Introduction

1. Présentation de l'établissement

ASTREDHOR est l'Institut Technique de l'Horticulture. Composé de 6 unités de bassin regroupant 10 stations d'expérimentation autour d'une cellule parisienne (Figure 1), il développe des techniques de production innovantes et évalue une gamme diversifiée de plantes ornementales pour les producteurs horticoles. Les programmes d'expérimentation de chaque unité de bassin sont conduits en fonction des orientations données par les adhérents (qui représentent plus de 2000 entreprises) et le tout est coordonné par la cellule nationale. ASTREDHOR Sud-Ouest (GIE Fleurs et Plantes) est une unité de bassin de l'Association nationale de STRuctures d'Expérimentation et de Démonstration en HORTiculture (ASTREDHOR) située à Villenave d'Ornon (33) sur le site de l'INRA de Bordeaux. Cette implantation a été choisie pour partager des connaissances, du matériel et optimiser les relations entre un organisme proche du terrain et les plateformes de recherche fondamentale de l'INRA. Grâce aux outils dont dispose la station, de nombreux programmes d'expérimentation sont menés pour apporter aux entreprises horticoles des solutions aux problèmes fréquemment rencontrés. Les problématiques abordées dans l'établissement concernent les techniques culturales, l'élargissement de la gamme, la protection des plantes mais aussi la dépollution des sols par les plantes. La station est un outil d'expérimentation, mais elle assure aussi des activités de diffusion et de valorisation des résultats, un appui technique aux entreprises par des actions de conseil et une mission de formation continue. (ASTREDHOR Sud-Ouest, 2016).

2. Problématique générale et objectifs du stage

Depuis le milieu des années 80 et le début des années 90, la politique de gestion de la pollution des sols s'est développée avec trois axes principaux : 1: prévenir la pollution, 2: garantir l'adéquation des sols et des usages futurs et 3: conserver les données sur les anciens sites pollués et leur réhabilitation. Au niveau de l'Union Européenne, de nombreux textes ont été votés et mis en œuvre par les Etats membres pour limiter la pollution des sols et des eaux souterraines. Ces lois sont d'autant plus importantes que le nombre de friches industrielles augmente et qu'il est nécessaire de les reconverter afin de contribuer à la restriction de l'étalement urbain. Les législations concernent la prévention et la réduction de la pollution, la pollution par les nitrates, la mise en décharge des déchets, la limitation des émissions de certains polluants et bien d'autres thèmes sur la pollution des sols et des eaux.

Aujourd'hui en France, après 200 ans d'activité industrielle, la pollution des sols est une problématique environnementale. Le Circulaire du 8 février 2007 repose sur deux axes: la prévention de la pollution avec un contrôle plus poussé des prescriptions faites sur un lieu contaminé et la maîtrise des sources de pollution en utilisant des traitements bien précis, adaptés aux caractéristiques du lieu. Le Grenelle de l'Environnement initié en 2007, a pour objectif de préparer des décisions à long terme au niveau de l'environnement et du développement durable. Ce processus public a permis de promouvoir la protection des sols et eaux souterraines.

En août 2009, la Loi Grenelle 1 fixant les objectifs et les orientations principales a été votée. En juillet 2010, la Loi Grenelle 2 a été adoptée et elle définit les mesures concrètes ainsi que leur mise en œuvre. En termes de dépollution des sols, dans l'Article 43 de la Loi Grenelle 2, il a été précisé que « les techniques de dépollution par les plantes seront de préférence utilisées » dans un chapitre intitulé « L'environnement et la santé » (Van de Maele, 2011). Il est donc essentiel aujourd'hui d'essayer de comprendre, de définir et d'approfondir les techniques utilisant les plantes associées ou non à des microorganismes pour dépolluer les sols: il s'agit de la phytoremédiation.

Parmi les projets qui ont été développés sur la phytoremédiation, très peu ont abouti sur une mise en situation réelle. Les stations ASTREDHOR Sud-Ouest et ASTREDHOR Grand-Est ont décidé de lancer en 2013 un Programme National sur la phytoremédiation. L'étude porte sur l'évaluation du cycle de vie d'un procédé de dépollution d'un sol contaminé, à l'aide de plantes ornementales avec association de champignons mycorhiziens. Une étude bibliographique des espèces de plantes ornementales candidates pour la phytoremédiation a été effectuée. Après le choix des plantes ornementales, trois échelles d'étude différentes sont envisagées : 1: sur un substrat perlite avec une inoculation au plomb des plantes sous serre, 2: sur un sol pollué sous serre et 3: sur un site pollué.

Les objectifs sont de déterminer si les plantes ornementales choisies, avec association de champignons mycorhiziens, sont candidates et efficaces dans le procédé de dépollution d'un sol contaminé et si les microorganismes participent à la réussite de ce processus.

A terme, la finalité de ces travaux serait de développer une nouvelle filière permettant de valoriser les productions ornementales des professionnels en concevant éventuellement une gamme de plantes adaptées et spécialisées à cette technique de dépollution.

Etude bibliographique

1. Contexte et enjeux de l'étude

1.1. Le sol et la pollution

Le sol est une ressource non renouvelable, issue d'interactions entre le climat, la pédologie, la végétation, l'activité biologique, le temps et l'utilisation des terres. La formation et la régénération du sol sont des processus très longs, s'étalant sur plusieurs milliers d'années. Malheureusement, en quelques années ou décennies, ils peuvent être dégradés par les activités humaines (Van de Maele, 2011).

« Un site pollué est un site qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement ». D'anciennes pratiques sommaires d'élimination des déchets, des fuites, des épandages de produits chimiques, accidentels ou pas, ou des retombées de rejets atmosphériques issus d'activités agricoles, urbaines ou industrielles sont souvent responsables des sites pollués (Basol, 2012).

Pourcentages des actions menées sur les sites pollués

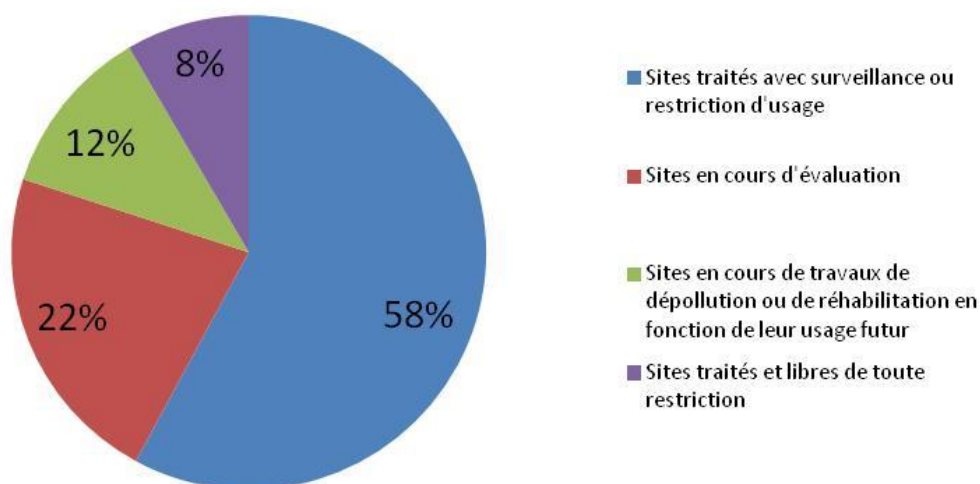


Figure n°2 : Répartitions des actions menées sur les sites pollués
(Moreau, 2013)

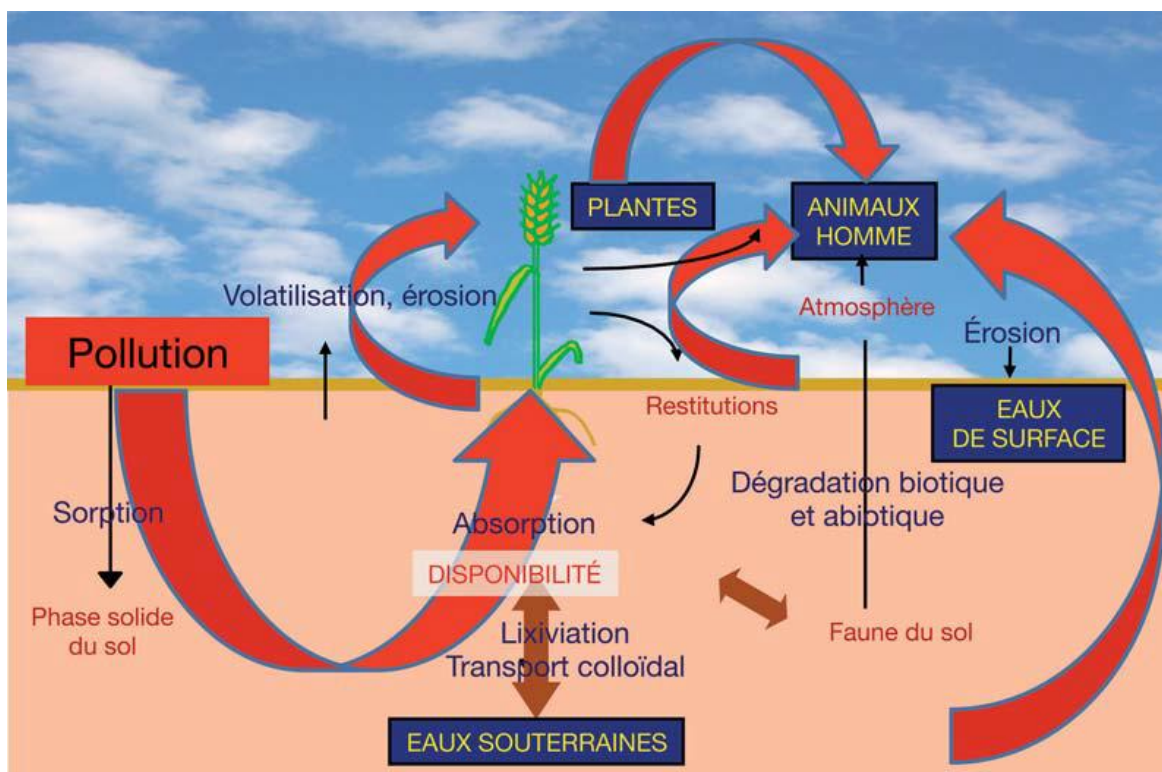


Figure n°3 : Cycle des polluants dans le système sol-plante
(Morel, 2012)

Les polluants sont classés en deux catégories : organiques ou inorganiques. Les polluants organiques contenant du carbone peuvent être des hydrocarbures pétroliers, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), du benzène, du toluène, de l'éthylbenzène, du xylène, du polychlorobiphényle (PCB) ou encore des solvants halogénés. Les composés inorganiques sont les éléments-traces métalliques ou non-métalliques ainsi que les radionucléides (Morel, 2012).

1.2. Les problèmes dus aux sols pollués en France

Selon l'Analyse stratégique de la filière de la dépollution des sites publiée par le Ministère en charge de l'Environnement en 2008, la France compte entre 300 000 et 400 000 sites potentiellement pollués avec une surface d'environ 100 000 hectares (Cadière, 2012). En 2016, selon la base de données Basol, 6351 sites et sols référencés seraient pollués ou potentiellement pollués, appelant à une action de l'administration à titre préventif ou curatif. Les pourcentages des diverses actions menées sur les sites pollués sont présentés en Figure n°2. Les sites traités avec surveillance ou restriction d'usage représentent tout de même 58% même si 34% des sites sont en cours d'évaluation ou en cours de traitement.

Début 2012 en France, près de 25% des sites inventoriés dans Basol sont pollués par les métaux et les métalloïdes et près de 65% par des familles d'hydrocarbures. Trois métaux sont le plus souvent retrouvés : le plomb signalé dans 17% des sols ainsi que le chrome et le cuivre dans 14% des sols (Moreau, 2013). Près de 40% des sites et sols pollués sont concentrés dans les régions de Rhône-Alpes, du Nord-Pas-de-Calais et d'Ile-de-France. L'Aquitaine présente 596 sites pollués soit 9,38% de tous les sites pollués en France. Parmi les départements de l'Aquitaine, la Gironde présente 306 sites pollués soit 51,3% de tous les sites pollués d'Aquitaine avec 29 sites pollués pour la ville de Bordeaux (Basol, 2012). Au cours de leur cycle, les différentes formes des polluants leur permettent d'atteindre les eaux souterraines, les plantes, les eaux superficielles et au final l'homme par la contamination de la chaîne alimentaire. Par conséquent, dès qu'un sol est contaminé, il représente donc une menace pour la sécurité alimentaire. En effet, dans la Figure n° 3, le cycle de vie des polluants dans le système sol-plante peut entraîner une contamination de la chaîne alimentaire par différentes voies : *via* les animaux ayant consommé une plante contaminée, *via* la contamination des eaux souterraines ou *via* l'atmosphère (Morel, 2012).

1.3. Les traitements mis en place

Les techniques de dépollution d'un site varient en fonction des milieux concernés par la pollution (sols ou eaux), du support (déchets ou produits divers), du devenir du polluant et du lieu, des exigences de temps, des coûts, d'efficacité et d'espace. Elles peuvent être classées selon trois critères : la nature des procédés employés (physiques, biologiques, thermiques ou chimiques), le lieu de traitement (hors site, sur site ou *in situ*) et le devenir des polluants (immobilisation ou, destruction totale ou partielle) (Dadrasnia, Shahsavari et Emenike, 2013). La Figure n°4 représente un schéma des différentes stratégies de remédiation des sols pollués classées en deux catégories : les traitements directement sur place permettant la réutilisation des sols ou hors site nécessitant souvent un centre de stockage (Morel, 2012).

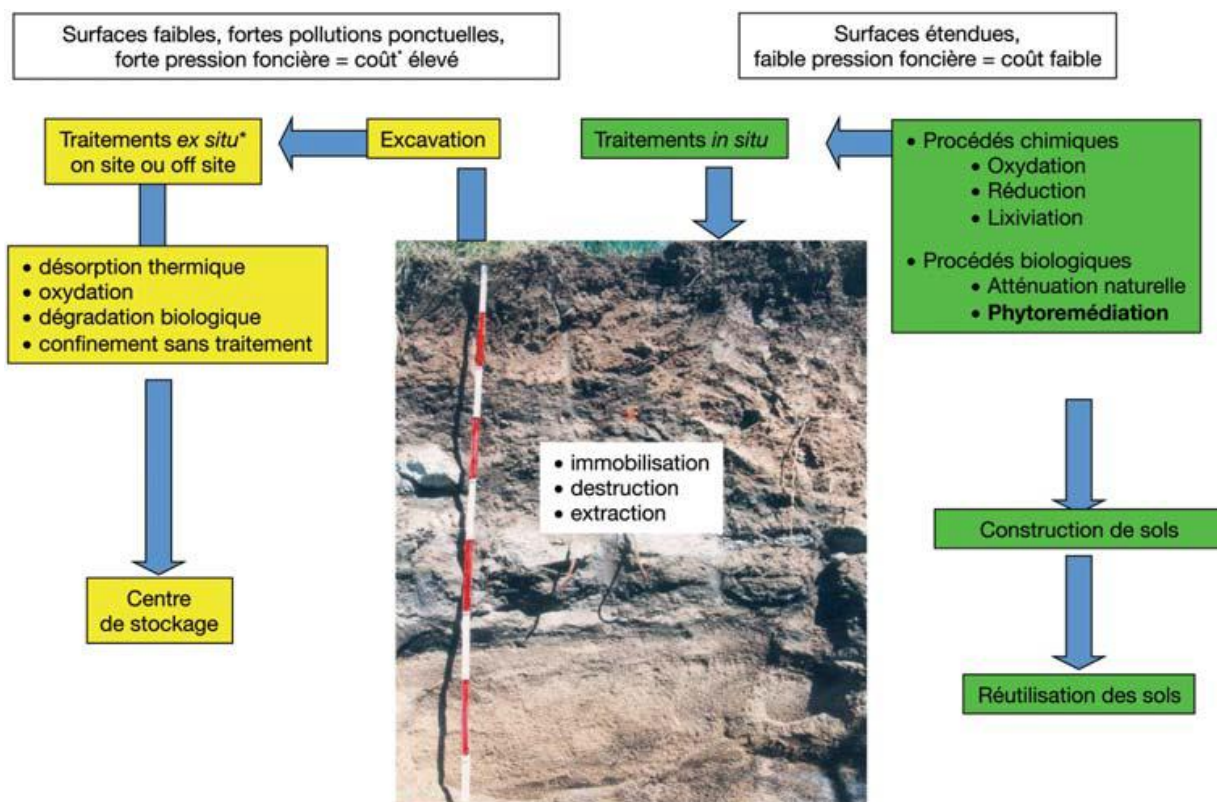


Figure n°4 : Les différentes stratégies de remédiation des sols pollués (Morel, 2012)

Pourcentage de répartition du plomb en fonction de tous les éléments le contenant (%)

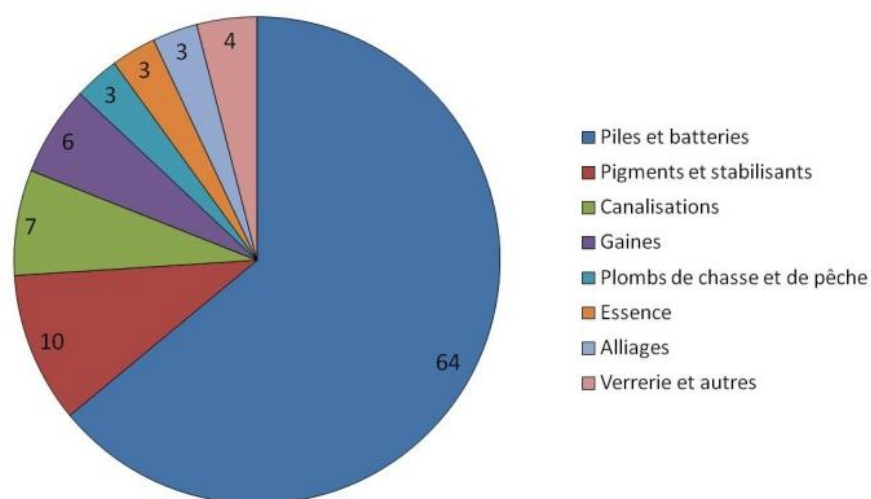


Figure n°5 : Répartitions des différentes origines du plomb dans tous les éléments le contenant (Laperche *et al.*, 2004)

Les traitements les plus couramment utilisés pour traiter les terres polluées sont le stockage de déchets dangereux dans des sites spécialisés, le procédé biologique et le confinement (Moreau, 2013). Les procédés biologiques utilisent des plantes et des microorganismes pour favoriser la dégradation totale ou partielle des polluants. D'autres permettent aussi de fixer ou de solubiliser certains polluants. Le confinement consiste à empêcher ou limiter la migration des polluants (Colombano *et al.*, 2010).

L'avantage des techniques classiques est qu'elles donnent des résultats rapides de dépollution mais elles demandent un travail intensif et une consommation d'énergie, elles sont coûteuses et affectent le sol au niveau de ses propriétés biologiques (Arshad *et al.*, 2008 ; Jadia et Fulekar, 2009). En fonction de l'utilisation future du lieu concerné par la pollution du sol, il est possible d'adapter le traitement en utilisant des techniques plus respectueuses de l'environnement et s'inscrivant dans une démarche de développement durable.

1.4. Les Eléments-Traces Métalliques

1.4.1. Que sont les ETM et les métaux lourds ?

Les éléments-traces sont définis par rapport à leur concentration massique dans un certain milieu. Les éléments-traces dans les êtres vivants ont une concentration inférieure à 0,01% (0,1 pour mille) et de 1% dans les plantes pour certains auteurs. Les éléments-traces de la croûte terrestre ont une teneur inférieure à 0,1% (1 pour mille) en moyenne et représentent 80 éléments chimiques. Certaines sont des métaux c'est-à-dire des éléments-traces métalliques comme par exemple, le cadmium, le chrome, le zinc, le plomb et le cuivre. D'autres sont des non-métaux comme l'arsenic, le sélénium et le bore (Baize, 2006).

1.4.2. Le Plomb : un des principaux polluants

a) Définition

Du latin *plumbum*, le plomb est « un élément naturellement présent dans l'environnement », il est le 36^e élément constituant de l'écorce terrestre qui en contient 14,8 mg.kg⁻¹. Il existe 240 minéraux naturels identifiés, composés de plomb. Cet élément est considéré comme peu mobile dans les milieux naturels et il s'accumule dans les horizons superficiels du sol (Laperche *et al.*, 2004).

b) Quelques données

D'après la Figure n°5, le plomb tient son origine de différents éléments très variés mais il est principalement utilisé dans les piles et les batteries avec 64 % de tous les éléments contenant du plomb (Laperche *et al.*, 2004).

La teneur en plomb dans les sols agricoles varierait de 2 à 200 mg.kg⁻¹ mais de nombreux auteurs affirmeraient que les sols non contaminés contiendraient de 10 à 30 mg.kg⁻¹ avec une moyenne d'environ 17 mg.kg⁻¹. Dans les sols naturels, des teneurs en plomb supérieures à 110 mg.kg⁻¹ ne devraient pas être retrouvées et ne pas être considérées comme normales (Laperche *et al.*, 2004). Au-dessus de 400 à 500 mg/kg, le sol est considéré comme pouvant entraîner un risque pour la santé humaine par l'US-EPA (Arshad *et al.*, 2008). Les valeurs limites de concentration en plomb dans les sols sont comprises entre 50 et 300 mg/kg de matière sèche d'un échantillon représentatif des sols dont le pH est de 6 à 7 (Cecchi, 2008). Pour la protection des sols, aucun cadre législatif européen n'a été encore déterminé.

Aujourd'hui, la France présente 1584 sites et sol pollués (ou potentiellement pollués) au plomb appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif. L'Aquitaine est concernée par 61 sites et sols pollués, la Gironde par 37 et Bordeaux par 11 sites et sols pollués au plomb ce qui est loin d'être négligeable (Basol, 2012).

c) Toxicité

Chez l'homme, le plomb est très toxique et peut avoir des effets sur le système cardio-vasculaire, le système nerveux, le système auditif et visuel. Il peut aussi avoir un effet très néfaste sur les jeunes enfants et les fœtus, pouvant entraîner des conséquences peu ou pas réversibles sur les facultés cognitives (Tremel-Schaub et Feix, 2005).

Trois voies peuvent permettre au plomb de pénétrer dans l'organisme : par inhalation, par ingestion et par voie cutanée. Sa diffusion dans les différents organes comme le cerveau ou encore les tissus fortement calcifiés (dents et os) est rapide *via* la circulation sanguine (Laperche *et al.*, 2004).

d) Traitements

En France, lorsque les volumes de sol pollué ne sont pas trop importants, ils sont placés dans des décharges. Le confinement et le stockage ne sont pas de réelles solutions de traitement des sols pollués au plomb ni des techniques de traitement universelles mais elles peuvent s'adresser à n'importe quel type de pollution. En fonction des objectifs de réhabilitation recherchés, une méthode sera choisie plutôt qu'une autre en tenant compte aussi de ses limites technique et/ou économique. La nature de la pollution au plomb comme la diversité des formes minérales ou organo-minérales, la taille des particules, la situation du plomb dans le sol, vont déterminer la faisabilité technique et économique d'un traitement de remédiation (Laperche *et al.*, 2004).

e) La plante et le plomb

Le pH a un impact important dans le transfert du plomb du sol vers les végétaux. En effet, l'adsorption sur les oxydes de Fe et d'Al peut empêcher le plomb d'être biodisponible pour la plante.

Certains cations comme le plomb sont très peu prélevés par les racines car ils ont tendance à rester fixés dans les parois cellulaires des racines. Ce phénomène est dû à la capacité d'échange cationique (CEC) de la paroi des cellules végétales entraînant une forte liaison à des composés globalement chargés négativement. Le plomb y est fortement immobilisé sous forme de pyrophosphate de plomb (Laperche *et al.*, 2004).

La teneur normale en plomb retrouvée dans les plantes est de 1 µg par g de plante. Il existerait 14 plantes hyper-accumulatrices de plomb avec une concentration supérieure à 1 mg par g de matière sèche des feuilles (Tremel-Schaub et Feix, 2005 ; Van der Ent *et al.*, 2013).

2. La phytoremédiation

2.1. L'Histoire de la phytoremédiation

La phytoremédiation n'est pas apparue à un moment précis mais a été caractérisée grâce à des observations et des essais. Les Etats-Unis et le Canada ont été les pionniers dans le domaine. En 1948, il a été découvert des concentrations élevées en nickel dans des feuilles d'*Alyssum bertolonii* en Toscane (Küpper *et al.*, 2001).

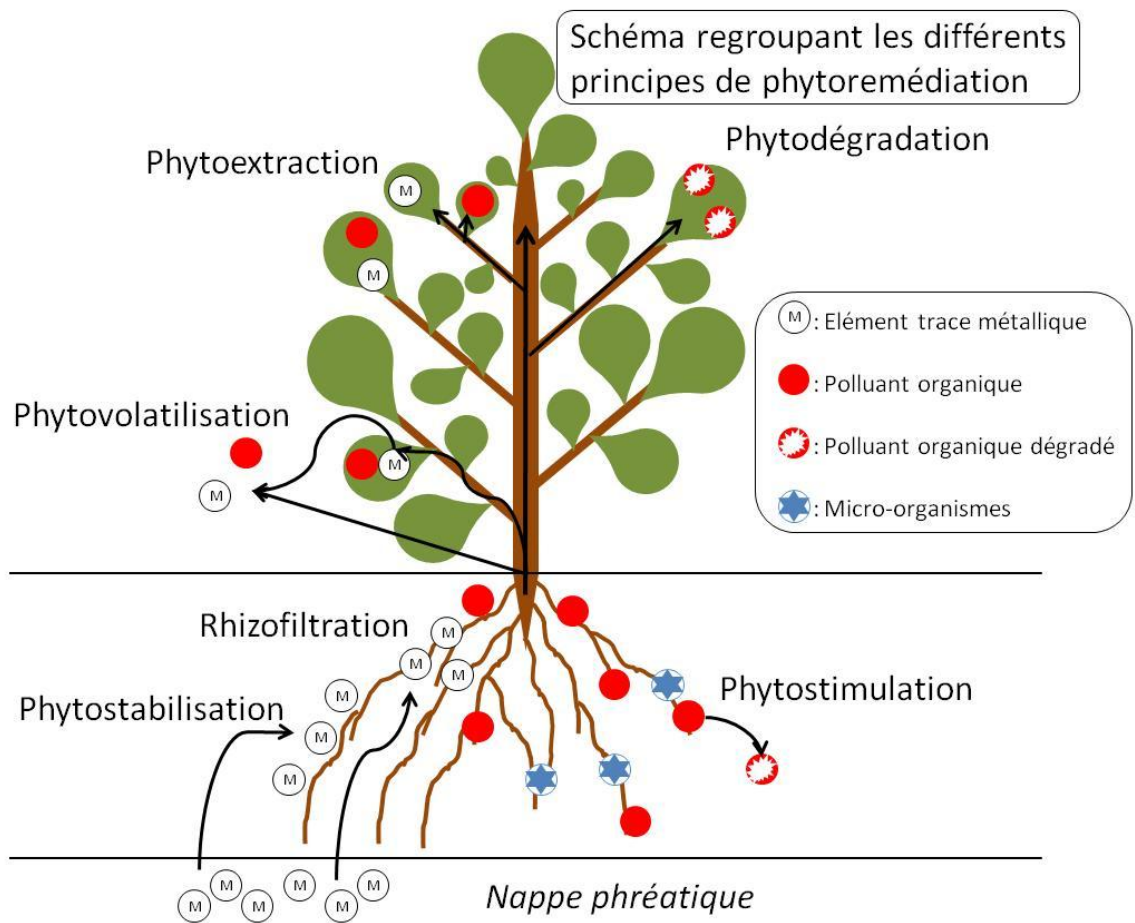


Figure n°6 : Les différentes techniques de phytoremédiation
(Sourzat, 2016)

En 1976, le terme « hyperaccumulation » est apparu grâce à Jaffré *et al.* en Nouvelle-Calédonie avec la description du comportement d'accumulation de Ni (Jaffré *et al.*, 1976). En 1983, au Canada, Chaney *et al.* ont décrit la phytoremédiation comme étant l'utilisation des plantes pour décontaminer des sols pollués. Entre 1997 et 1999, Chaney *et al.* déposent des brevets pour la phytoextraction des métaux à partir des sols contaminés et leur récupération pour un usage commercial dans le but de produire des métaux (phytomine) (Chaney *et al.*, 1997). En 2007, Chaney *et al.* mettent en place des essais au champ avec les espèces des genres *Alyssum* (Brassicacées) et *Berkheya* (Asteracées). Aujourd'hui, des essais sont poursuivis avec différentes plantes et des projets de phytoremédiation continuent à être mis en place (Echevarria *et al.*, 2012).

2.2. Les définitions

« Les phytotechnologies ou la phytoremédiation regroupent un ensemble de techniques qui utilisent des espèces végétales, avec ou sans combinaison à des amendements, pour extraire, immobiliser ou dégrader des polluants organiques ou inorganiques. D'une manière générale, les composés inorganiques sont immobilisés ou extraits alors que les composés organiques sont dégradés ». La phytoremédiation fait partie des traitements biologiques *in situ*, permettant une action jusqu'à 50 cm de profondeur. Elle comprend plusieurs techniques : la phytostabilisation, la phytoextraction, la phytovolatilisation, la phytodégradation et la phytostimulation (Selecdepol, 2013). Les différentes techniques sont représentées dans un schéma en Figure n°6.

Parmi ces techniques, la **phytostabilisation** permet la réduction de la mobilité des polluants essentiellement métalliques (par adsorption, précipitation et maintien physique (confinement)) et la prévention de leur migration (biodisponibilité, lessivage, réenvols des sols de subsurface potentiellement pollués...). Ce traitement agit essentiellement dans les racines et dans la rhizosphère, zone périphérique des racines. Il ne dépollue pas les sites ou les sols mais permet de maîtriser les risques grâce à la stabilisation des éléments traces du sol en évitant les réenvols de sols de subsurface.

Grâce aux plantes, la **phytoextraction** consiste à extraire les contaminants (essentiellement les métaux biodisponibles), les transférer et les stocker dans la biomasse aérienne des plantes alors que la **rhizofiltration** concerne plus précisément la partie racinaire. Ce traitement permet la réduction des concentrations de polluants à traiter dans les sols mais seulement partiellement car il ne concerne que la fraction biodisponible des polluants. La partie aérienne contenant des polluants est ensuite récoltée, traitée et valorisée (calcination, mise en décharge, valorisation en métallurgie ou en biosynthèse...). La capacité de la plante à stocker les polluants sans effets néfastes sur son développement et à produire une biomasse importante détermine son efficacité pour la phytoextraction. Les plantes concernées par ce processus sont des herbacées, des arbustes, des arbres ainsi que des plantes dites « hyperaccumulatrices » qui ont été mises en évidence. Les plantes « hyperaccumulatrices » sont capables d'accumuler des éléments traces métalliques à une concentration tissulaire d'environ 100 fois supérieure à celle des espèces végétales classiques.

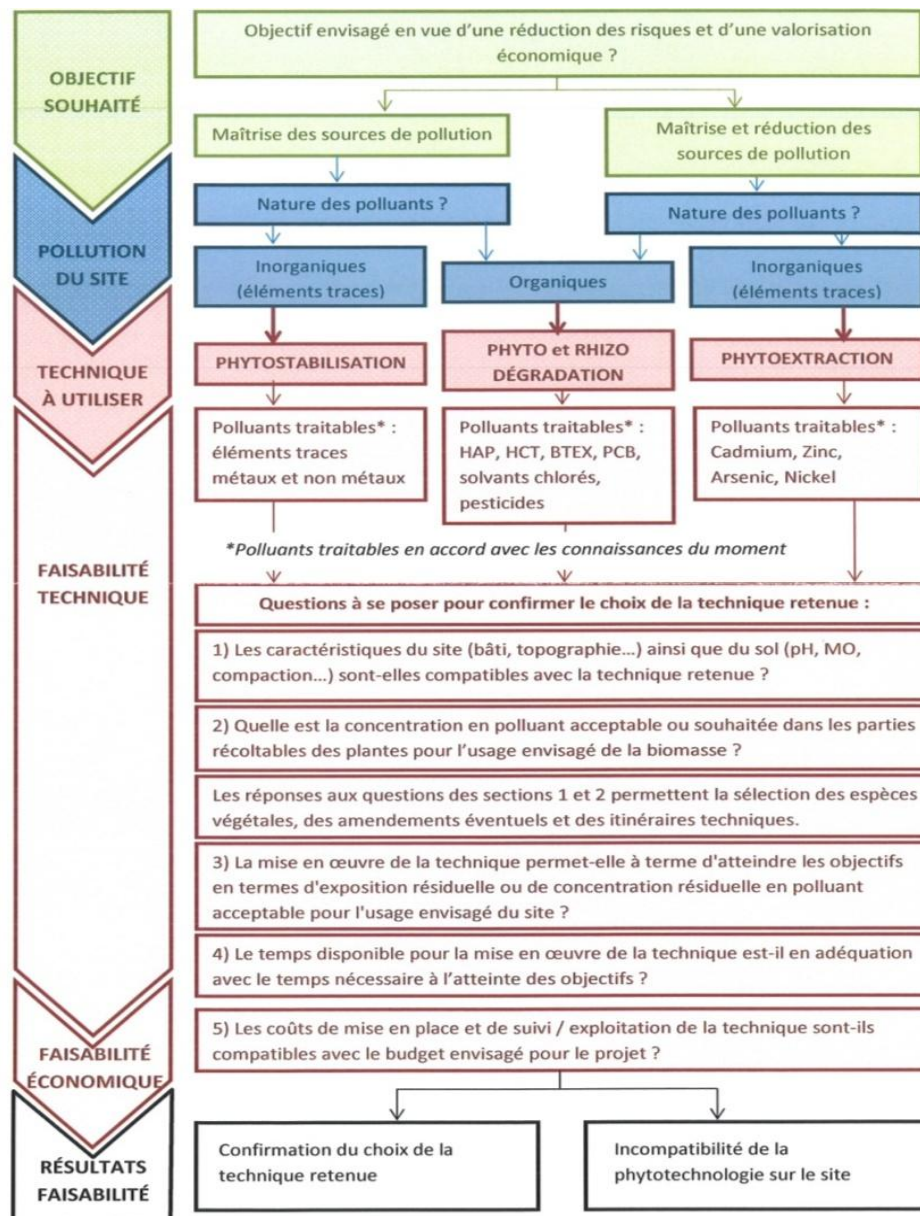


Figure n°7 : Arbre de décision des différents types de phytoremédiation (Bert, 2012)

Tableau n°1 : Avantages et inconvénients de la phytoremédiation (Bert, 2012)

Avantages	Inconvénients
En adéquation avec le développement durable	Accès aux polluants limité aux racines (moyenne de 50 cm et jusqu'à 1m50)
Différentes valorisations possibles : foncière, paysagère, métallurgie, énergie...	Durée de décontamination longue, de l'ordre de plusieurs années (2 à 20 ans)
Gestion in situ des terres : pas de transfert de sol	Entretien des végétaux
Couverture végétale: limite érosion, envol de poussières, lessivage, maintient et restaure une microflore et une microfaune	Risque de déstabilisation de l'écosystème local
Coûts dans la moyenne des autres techniques, compétitivité en fonction de la gestion et de la valorisation ou non des plantes	Hétérogénéité des polluants, concentrations parfois trop élevées
Traitement sur de grandes superficies	Dépendance aux facteurs abiotiques

Près de 500 espèces de plantes hyperaccumulatrices auraient été signalées (Qiu *et al.*, 2006 ; Evangelou *et al.*, 2015). Elles produisent peu de biomasse parce qu'elles utilisent beaucoup d'énergie pour se défendre face aux hautes concentrations de métaux dans les tissus (Tremel-Schaub et Feix, 2005).

La **phytovolatilisation** concerne certaines plantes adsorbant puis éliminant par transpiration (volatilisation) certains contaminants inorganiques (Hg, Se, fertilisants, nitrate,...) ou organiques (hydrocarbures, phénols, produits phytopharmaceutiques,...). Les plantes ne concentrent pas les polluants mais les transfèrent du sol vers l'atmosphère qui les restituera une nouvelle fois au sol par dépôt. A cause de cet inconvénient, le procédé est peu pratiqué en France.

La **phytodégradation** consiste à utiliser certaines plantes pouvant dégrader certains contaminants organiques en constituants moins toxiques grâce à leur activité métabolique et donc à la production de nombreuses enzymes.

L'adsorption du contaminant permet la dégradation dans la plante mais elle peut aussi s'effectuer en dehors avec la production d'enzymes extraracinaires (exsudats). La plante n'a accès qu'à la fraction biodisponible des polluants : la dépollution n'est que partielle.

La **phytostimulation** ou la **rhizodégradation** est un processus utilisant les interactions naturelles et nombreuses entre les plantes et les microorganismes. L'activité de biodégradation des contaminants organiques est stimulée au niveau des racines grâce à l'augmentation de l'infiltration des eaux et à l'aération du système racinaire. Il s'agit aussi d'une technique de dépollution partielle comme pour la phytodégradation.

Un arbre de décision aide dans le choix de la technique de phytoremédiation la plus pertinente en fonction des objectifs de gestion d'un site pollué (Figure n°7) (Bert, 2012). En effet, le type de polluant, les caractéristiques du site et du sol, le temps de mise en place et le devenir du site après traitement sont autant de critères à prendre en compte pour la sélection du procédé de phytoremédiation. Dans le Tableau n°1, les avantages sont essentiellement la possibilité d'une valorisation foncière, la gestion sur place des sols pollués et l'adéquation avec le développement durable. La mise en place d'un couvert végétal est aussi bénéfique pour le sol. Les inconvénients de cette technique sont liés à l'efficacité de dépollution et la résistance des végétaux face à la pollution du sol.

Afin d'aider les différents processus de phytoremédiation, des amendements peuvent être apportés : on parle de phytoremédiation aidée. Ils peuvent être de deux types : les amendements chimiques comme par exemple les fertilisants et amendements biologiques (bactéries, champignons mycorhiziens...). (Selecdopol, 2013)

2.3. La participation des microorganismes

Les plantes collaborent avec de nombreux microorganismes, très variés dans la rhizosphère : des champignons, des oomycètes, des bactéries, des nématodes ou encore des virus. Il s'agit de relations symbiotiques entre les végétaux et leurs microorganismes associés du sol. Les microorganismes jouent des rôles déterminants dans l'évolution des plantes, en intervenant dans l'absorption de l'eau et des nutriments dans le sol, dans la protection contre les bioagresseurs et dans la résistance aux stress liés à l'environnement. Ils favorisent les conditions agronomiques nécessaires pour la croissance de la plante et l'augmentation de sa biomasse (Selecdopol, 2013 ; Bainard, Klironomos et Gordon, 2011).

2.3.1. Les champignons mycorhiziens

Les symbioses mycorhiziennes ou mycorhizes correspondent à l'association et la collaboration d'une plante par l'intermédiaire de ses racines, et d'un champignon filamenteux. Plus de 90% des plantes terrestres vivent en symbiose mycorhizienne sauf quelques familles comme les Brassicacées et les Chenopodiacees.

La plante fournit des sucres aux champignons tandis que le champignon l'approvisionne en eau et en éléments minéraux à partir du substrat. Plusieurs formes d'associations mycorhiziennes existent (Fortin, Plenchette et Piché, 2008 ; Strullu-Derrien et Strullu, 2007). Les plus connues et expérimentées sont les ectomycorhizes et les endomycorhizes.

Les champignons mycorhiziens jouent un rôle très important dans la détoxification de l'environnement immédiat des racines. La symbiose ectomycorhizienne permet de protéger l'arbre des ions métalliques avec leur accumulation et leur immobilisation par le champignon. Il peut les fixer à la surface extérieure des hyphes du mycélium externe ou du manteau, ou les complexer sous une forme inerte à l'intérieur des cellules. Par conséquent, il permet de réduire la concentration de l'élément toxique à proximité des racines, de diminuer le risque de toxicité pour celles-ci et de limiter le transfert vers des eaux souterraines. Au-delà d'un certain seuil, le système a tout de même ses freins car la cellule ne peut tolérer l'internalisation d'une forte concentration d'un métal lourd. De plus, l'immobilisation est limitée dans le temps et s'arrête à la mort du champignon.

Il existe un autre mécanisme qui est la précipitation du métal le transformant sous forme de complexes insolubles dans le sol rhizosphérique, à l'extérieur des tissus. Le champignon sécrète des acides organiques complexant, principalement l'acide oxalique, rendant un métal lourd potentiellement toxique, non mobile et inoffensif. L'aptitude du champignon mycorhizien à survivre et à former des mycorhizes en présence de concentrations élevées de la substance toxique va déterminer sa capacité de détoxification (Garbaye, 2013)

a) Les champignons ectomycorhiziens

Les ectomycorhizes ne concernent cependant que 5% des espèces végétales et essentiellement des plantes ligneuses c'est-à-dire des arbres et des arbustes. Le nombre d'espèces de champignons formant des ectomycorhizes est estimé à plus de 6000 et il en est découvert sans cesse. Les champignons sont extrêmement divers, ils appartiennent aux familles des Ascomycètes et des Basidiomycètes.

Le manteau est formé d'hyphes plus ou moins différents et enchevêtrés en fonction des espèces de champignon. Sous le manteau, les cellules de la première assise qui constituaient le rhizoderme avant la formation de l'ectomycorhize, sont mortes et se remplissent de substances polyphénoliques brunes. Il s'agit d'une réaction naturelle de défense de la plante. Les hyphes sortant du manteau vont se faufiler entre les cellules saines du parenchyme cortical. Une sorte de filet est constituée par l'imbrication des mycéliums entre les cellules et forme le réseau de Hartig. Les structures fongiques assurant le contact entre le sol et la racine peuvent être des hyphes isolés ou souvent agrégés entre eux formant des mèches ou des cordons. Certains cordons sont appelés rhizomorphes pouvant être ramifiés et atteindre plusieurs mètres dans des sols sableux.

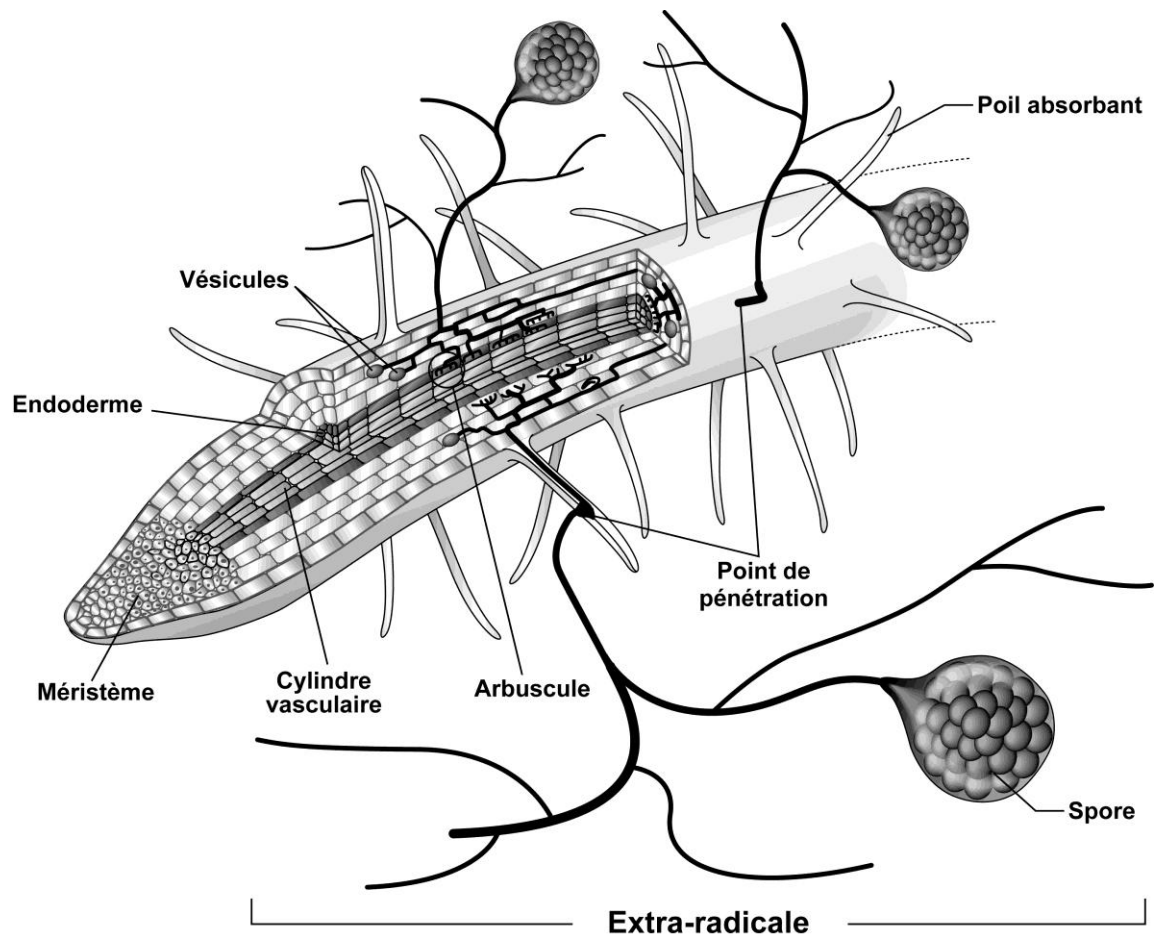


Figure n°8 : Schéma des différentes structures des champignons endomycorhiziens à arbuscules (Fortin, Plenchette et Piché, 2008)

La première étape de formation d'une ectomycorhize est le contact entre un hyphes et la surface d'une racine compatible. L'hyphes est attiré par des signaux moléculaires libérés par la racine. La deuxième étape est l'expansion et la ramification de la surface de la racine. Les deux phases durent de l'ordre de quelques jours. Le manteau participerait pour 20 à 40 % de la masse totale de racines fines en fonction de l'espèce du champignon et de l'espèce végétale (Garbaye, 2013).

b) Les champignons endomycorhiziens arbusculaires

Les endomycorhizes dites arbusculaires sont les plus répandues et les plus anciennes, elles concernent plus de 80% des végétaux vasculaires terrestres actuels, soit au moins 400 000 espèces dont les plantes à fleurs, mono et dicotylédones. Elles sont apparues il y a 400 à 500 millions d'années lorsque les premières plantes terrestres ont commencé à coloniser la terre ferme. Les champignons concernés par la symbiose endomycorhizienne arbusculaire se rattachent tous à un groupe très ancien, les Glomérormycètes existants depuis plus d'un milliard d'années et regroupant actuellement 250 espèces. Le champignon modèle de cette classe est *Rhizophagus irregularis*, anciennement *Glomus intraradices*, dont le génome entier a été séquencé.

Grâce à leur grande diversité interne et leur plasticité génétique et fonctionnelle, les champignons endomycorhiziens arbusculaires s'adaptent facilement à des situations très variées et peuvent transporter rapidement les éléments nutritifs entre le sol et la plante-hôte. Le processus de mise en place de la symbiose endomycorhizienne s'effectue en quatre étapes: l'attraction du mycélium après la germination de la spore, la pénétration dans les cellules de l'épiderme, la colonisation intercellulaire du cortex racinaire et la formation de spires et/ou d'arbuscules (Figure n°8). Lorsque les conditions de développement pour la plante sont favorables et que la symbiose endomycorhizienne s'est bien installée, la longueur des racines vivantes est colonisée de 60 à 80%. Avec l'extension des structures dans le cortex racinaire, le champignon va occuper le sol autour de la racine grâce à un système mycélien dense, fin, très ramifié, formant un réseau avec des soudures entre les ramifications. Enfin, les hyphes sécrètent une glycoprotéine, la glomaline collante, complexant les métaux et jouant donc un rôle essentiel dans la fertilité et la stabilité du sol (Garbaye, 2013 ; Hamel et Plenchette, 2007).

2.3.2. Les bactéries auxiliaires de la mycorhization (BAM)

Parmi les organismes rhizosphériques, certains interagissent avec la symbiose mycorhizienne comme les bactéries libres, vivant à la surface ou à proximité immédiate des racines ou des mycéliums du champignon mais n'entrant pas en association avec les tissus de la plante. Certaines exercent une action bénéfique sur l'association plante-champignon. En effet, elles ont évolué en même temps que les symbiotes fongiques et les plantes et se sont adaptées aux symbioses. Elles sont appelées BAM pour bactéries auxiliaires de la mycorhization et appartiennent à des genres différents des Protéobactéries, des Firmicutes et des Actinobactéries. Grâce à une variété de mécanismes, elles favorisent la mise en place de la symbiose mycorhizienne. Par l'émission de molécules actives à très faibles concentrations, les bactéries peuvent stimuler la croissance du mycélium dans le milieu. Les molécules peuvent être des vitamines que le champignon ne pourrait pas produire ou des molécules « signal » qui modifieraient le comportement ou le développement d'un organisme tiers.

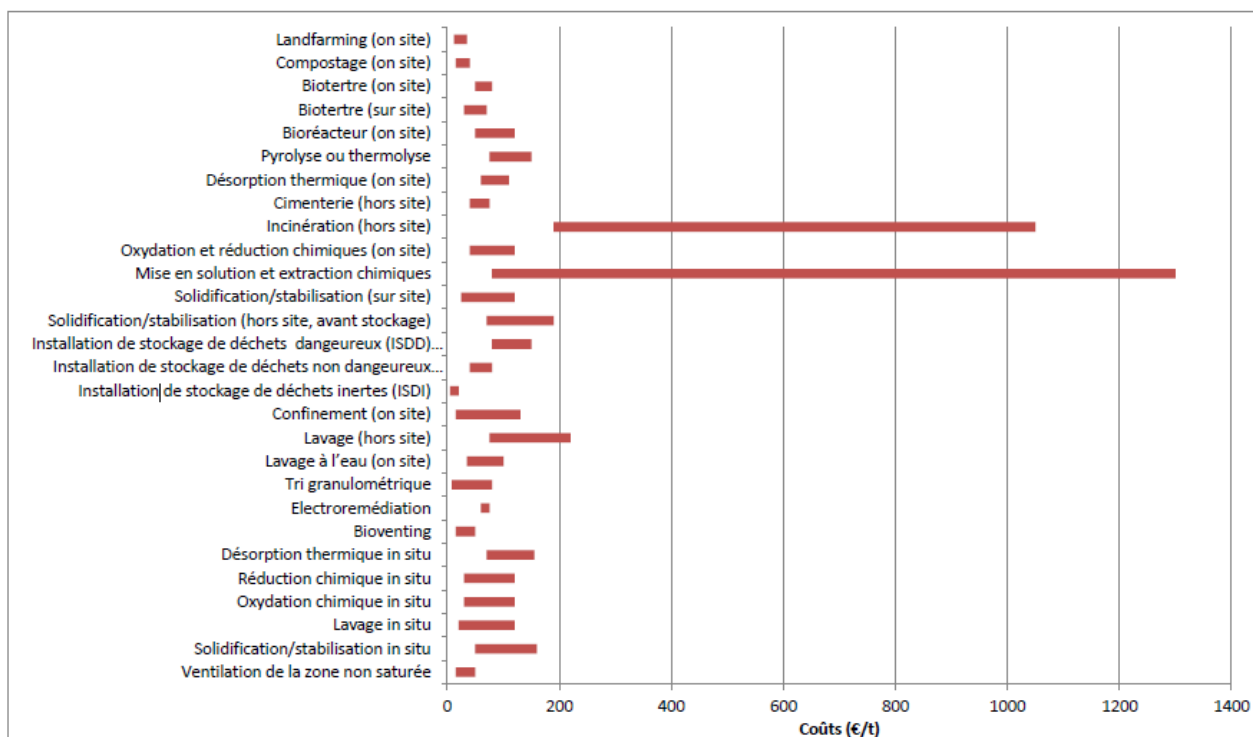


Figure n°9 : Comparaison des coûts des différentes techniques en euros/tonne de sol traité (Selecdepol, 2013)

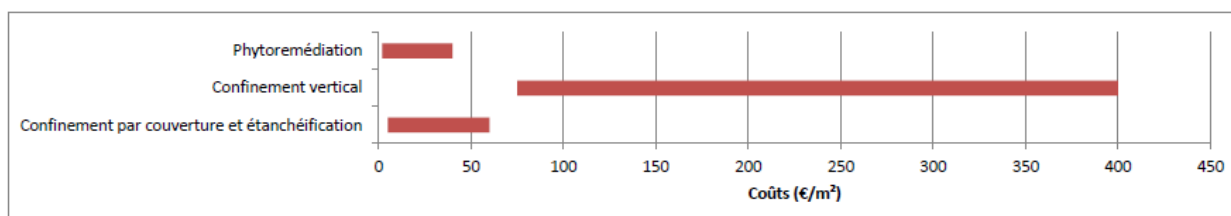


Figure n°10 : Comparaison des coûts pour différentes techniques en euros/m² de sol traité (Selecdepol, 2013)

La réceptivité de la racine et la colonisation du champignon peuvent être améliorées grâce à ces molécules « signal » qui permettraient la libération d'enzymes entraînant un ramollissement de la paroi des cellules de l'épiderme de la racine. Elles n'agissent pas directement au niveau de la racine ou du champignon mais durant les étapes qui précèdent la symbiose au niveau du « dialogue moléculaire ». Enfin, des bactéries aident aussi à la mobilisation des éléments nutritifs du sol par le champignon, à partir des minéraux et de la matière organique (Garbaye, 2013).

2.4. Les coûts de mise en place et de suivi

Les coûts de mise en place dépendent de trois points: 1: l'investissement initial avec la préparation des sols, l'ajout d'amendements, la végétalisation des surfaces et la mise en place d'installations pour la gestion des sols pollués, 2: les charges liées à l'entretien des végétaux et à un éventuel traitement des eaux de ruissellement ainsi que 3: le suivi des plantes. Les coûts varieraient de 18 à 40 €/m² de surface traitée par la phytoextraction et de 2 à 12 €/m² de surface traitée par phytostabilisation sans compter l'apport de terre végétale. Les coûts restent encore à étudier en fonction de toutes les variables suivantes: la mise en place, la gestion et la surveillance des plantes, la durée du suivi et la valorisation des biomasses.

Selon les acteurs, les coûts de la phytoremédiation seraient dans la moyenne des autres techniques (Figure n°9). Le confinement vertical ainsi que le confinement par couverture et étanchéité sont des techniques beaucoup plus chères que la phytoremédiation avec des coûts de 75 à 400 €/m² et 20 à 60 €/m² respectivement. Avec une densité de 1,5 t de terre par m³, la phytoextraction coûterait de 54 à 120 €/t et de 6 à 36 €/t pour la phytostabilisation. En analysant la Figure n°10, la phytoremédiation reste moins chère ou dans la moyenne du prix des autres techniques. (Selecdepol, 2013)

En 2010, 5800 tonnes de terres polluées sur un total de 4 815 500 auraient été traitées grâce à la phytoremédiation. Le taux d'utilisation de la phytoremédiation en tant que technique de dépollution des sols est de seulement 0,3% des terres traitées *in situ* et 0,1% du total de terres traitées. Ces taux d'utilisation très bas sont dus à leur mise en place sur des cas très spécifiques de pollution: non complexes, la plupart du temps en présence d'un unique polluant et un traitement à faible profondeur (Cadière, 2012).

Paradoxalement, les coûts de mise en place plus faibles sembleraient créer un frein pour le développement de la phytoremédiation en France. En effet, les industriels n'auraient pas forcément envie d'utiliser des techniques qui leur rapporteraient moins en les vendant moins chères que des techniques classiques. Selon ceux-ci, leurs principaux freins seraient l'action des plantes qui ne seraient efficaces que sur certaines concentrations et profondeurs de polluants. De plus, les polluants ne seraient dégradés que lentement ou juste confinés (Lesquel, 2009). Certains industriels et structures de recherche et d'expérimentation mettent en place des projets afin de déterminer l'efficacité et l'intérêt économique de la phytoremédiation.

Tableau n°2 : Liste non exhaustive et description des principaux acteurs de la phytoremédiation (Sourzat, 2016)

Entreprises	Description
ADEME	L'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie contribue à la gestion des sites et sols pollués par la mise en place de programmes d'innovation. Elle développe des outils pratiques destinés aux acteurs de la réhabilitation des sites pollués.
BRGM	Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières est l'établissement public français de référence dans le domaine des sciences de la Terre. Le programme R&D comporte des projets de procédés innovants de traitement des sols contaminés.
INERIS	L'Institut National de l'EnviRonnement Industriel et des risqueS est un établissement public menant des programmes de recherche afin de prévenir les risques causés par les activités économiques sur la santé, la sécurité des personnes et des biens, et sur l'environnement.
INRA	L'Institut National de Recherche Agronomique est le premier institut de recherche agronomique en Europe. Il mène des programmes de recherche sur les enjeux de société majeurs. Le Laboratoire BIOGECO à Bordeaux ainsi que le Laboratoire LSE à Nancy travaillent sur la phytoremédiation.
GISFI	Le Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Friches Industrielles est un regroupement de douze laboratoires lorrains de recherche publique relevant de l'Université de Lorraine, de l'INRA, du CNRS, de l'INERIS et du BRGM. Le but est de rassembler différentes compétences autour de projets scientifiques et technologiques pour la requalification durable des sites dégradés et pollués par les activités industrielles passées comme par exemple l'utilisation de la phytoremédiation.
Phytorestore	Phytorestore est une société créée en 2004 par le président actuel, Thierry Jacquet. Elle est spécialisée dans le traitement des pollutions de l'air, de l'eau et du sol par les plantes et l'aménagement paysager.
Terra Logic	Terra Logic est une entreprise fondée par Géraldine Legrain. Elle est spécialisée dans la phytodépollution des sols de la prise de contact jusqu'aux visites régulières après la mise en place des plantes.
Phytorem	Phytorem est une société spécialisée dans la dépollution des sols et l'assainissement des eaux par les plantes. Ils ont créé des systèmes d'éco-stations avec l'utilisation de bambous.

Table 1 Zn concentration of plants and soils in mining area (mg kg⁻¹) DW

No	Shoot	Root	Soil
A1	8384	2970	39952
A2	8529	3764	41899
A3	8081	4209	5577
A4	5364	3263	6487
A5	6343	4393	4038
A6	4581	2023	4980
A7	3865	2264	4194
B1	6883	1289	81088
B2	5195	3246	57214
B3	5275	3175	192681
Mean±std	6250±1661	3060±974	43811±58938

A: Beichang mine, B: Jiayashan mine, DW: dry weight.

Figure n°11 : Concentration en Zinc de *Potentilla griffithii* sur des sols miniers (mg/kg) (Qiu *et al.*, 2006)

2.5. Les projets mis en place et les acteurs de la phytoremédiation

Dans le Monde, en Europe et plus précisément en France, de nombreux projets sont mis en place sur différents types de phytoremédiation à l'aide de plantes très variées avec ou sans apport de champignons mycorhiziens.

En France, onze programmes ont été mis en place et ont été financés par l'Agence Nationale de la Recherche sur la phytoremédiation. Cette agence participe au développement des sciences et des technologies, adapte les projets en fonction des attentes économiques et sociétales, favorise les partenariats et les interactions entre les différentes disciplines (Agence Nationale de la Recherche, 2006). Différents projets du Programme ANR de Phytoremédiation ainsi que des projets français sont listés dans l'Annexe n°I.

Les principaux acteurs de la phytoremédiation sont listés et présentés dans le Tableau n°2. Chacun a sa spécialité : la recherche fondamentale, la mise en place de projets, la création de documents référents ou le développement de la phytoremédiation. Certains s'associent afin de partager leurs compétences et leurs savoirs dans le domaine.

2.6. Les plantes dépolluantes

2.6.1. Les caractéristiques

D'après une base de données canadienne PHYTOREM, plus de 800 espèces pourraient être utilisées et seraient référencées pour dépolluer les sols. Les difficultés rencontrées sur les phytotechnologies se situent surtout au niveau du choix des plantes dépendant du type de sol, du type de polluant, de l'environnement climatique et de sa possible valorisation (Ben Ghnaya *et al.*, 2006 ; Sarma, 2011). Avec la recherche bibliographique des projets mis en place en France, une liste non exhaustive des plantes candidates pour la phytoremédiation a été réalisée (Annexe n°I). Cependant, les horticulteurs ne produisent pas toutes les plantes présentes dans cette liste car elles ne sont pas obligatoirement ornementales. Il est donc envisagé d'élargir la gamme avec des plantes ornementales, vivaces ou arbustives pouvant résister à différentes conditions climatiques.

Au Canada par exemple, une liste de plantes d'intérêt paysager ayant des capacités de traitement du sol et des eaux souterraines a été créée. Parmi les plantes citées, les espèces du genre *Ceanothus* (famille des Rhamnacées) sont des arbustes pouvant participer à la phytoremédiation grâce à leur capacité de filtration des éléments (Young *et al.*, 2015).

D'après Claude Grison et Vincent Escande, des plantes appartenant aux genres *Sedum* de la famille des Crassulacées et *Potentilla* de la famille des Rosacées (Qiu *et al.*, 2006) posséderaient des capacités hyper-accumulatrices de métaux lourds (Centre National de la Recherche Scientifique, 2014). En effet, d'après la Figure n°11, *P. griffithii* pourrait accumuler en moyenne 6250 mg/kg de Zn dans les feuilles contre 3060 mg/kg en moyenne dans les racines. Cette plante a réussi à se développer sur un sol minier avec une concentration en Zn de 193 000 mg/kg sans montrer aucun symptôme de phytotoxicité.

D'autres plantes du genre *Grevillea* y sont décrites comme ayant la possibilité d'accumuler du manganèse et éventuellement plusieurs métaux comme le magnésium, le zinc, le cuivre, le fer, le calcium, le cadmium et l'aluminium (Rabier *et al.*, 2007).

Biomass, total lead content in shoots and lead extracted per plant, for field cultures on soil-B

Cultivar	Shoot dry weight (DW) (g plant ⁻¹)	[Pb] Shoots DW (mg Pb kg ⁻¹)	Pb extracted per plant (mg Pb plant ⁻¹)
Attar	66 ± 13c	1467 ± 134c	96.7 ± 19b
Clorinda	56 ± 14c	1182 ± 336b	64 ± 15b
Atomic	28 ± 6ab	1107 ± 193b	30.5 ± 7b
Graveolens	39.5 ± 9.5b	435 ± 157a	17 ± 7a
Sweet	22.5 ± 6.5a	549 ± 76a	12 ± 1.5a
Concolor	16 ± 3a	468 ± 91a	8 ± 2.5a

For each bioassay, mean values with different letters are significantly different ($p < 0.05$) as measured by LSD Fisher test.

Figure n°12 : Poids secs des plantes (g), concentration (mg/kg) et quantité de plomb (mg) extrait dans les plantes (Arshad *et al.*, 2008)

Dans des feuilles séchées de *Grevillea exul ssp.*, il peut être accumulé environ 15000 à 280000 mg de Mn par kg de poids sec de la plante, de 2000 à environ 35000 mg/kg de poids sec pour le Fe (III) et de 1500 à environ 80000 mg/kg de poids sec pour l'Al (III) (Centre National de la Recherche Scientifique, 2014).

D'autres travaux de recherche ont été menés par l'ENSAT de Toulouse avec des pélargoniums odorants dont les variétés 'Atomic snowflake', 'Attar of rose' et 'Lady Plymouth' dans l'objectif de décontaminer des sols en plomb (Arshad *et al.*, 2008). D'après la Figure n°12, à partir d'un sol contaminé à 1830 mg de plomb par kg de sol, il a été retrouvé des concentrations en plomb variant d'environ 468 à 1467 mg/kg de poids sec de feuilles en fonction des cultivars utilisés.

Dans une autre étude, la variété 'Attar' des pélargoniums pourrait accumuler 5550 mg de plomb par kg de poids sec de racines et 8644 mg de plomb par kg de poids sec de feuilles à partir d'un sol fortement contaminé à 39250 mg de plomb total par kg sans observer aucun symptôme de phytotoxicité. Pour ce même sol, sur l'année 2006 lors de l'expérimentation, il aurait été possible d'extraire environ 125,8 kg de plomb par ha ce qui correspondrait à environ 2,7% de la totalité du plomb de ce sol chaque année, avec une densité de 150 000 géraniums par ha. Même si la quantité extraite paraît élevée, le pourcentage de plomb capté reste faible à cause de la forte pollution de ce sol. La pollution d'origine d'un sol, plus précisément le type et la concentration du polluant et le lieu de la pollution ne sont pas à négliger dans le choix d'une technique de réhabilitation d'un site pollué (Shahid *et al.*, 2011). Dans de nombreuses études, les pélargoniums se sont montrés à plusieurs reprises très efficaces pour le processus de phytoremédiation (Mahdieh, Yazdani et Mahdieh, 2013). Les travaux sur les pélargoniums sont très intéressants car ils permettraient la création d'une nouvelle filière de production d'huiles essentielles après séparation des ETM de la biomasse grâce à des techniques modernes de chimie. Afin d'adapter les plantes à différentes conditions climatiques et dans un intérêt paysager, il serait envisageable de travailler sur des espèces vivaces de géraniums, plus résistantes au froid.

Enfin, des genres d'arbres comme les eucalyptus sont aussi intéressants dans la phytoextraction des polluants comme le plomb ou encore le cadmium. En effet, *Eucalyptus rostrata* aurait la capacité d'accumuler 220,5 mg de plomb par kg de racines et 140,6 mg de plomb par kg de feuilles sur un sol contaminé à 1000 mg/kg (Sameera, 2008). Une étude au Canada et une autre au Nigeria ont aussi montré que *Eucalyptus camaldulenses* aurait la possibilité d'accumuler du cadmium et autres ETM (Daniel, Nanven et Daniang, 2012). La piste de l'utilisation des eucalyptus pour dépolluer les sols est donc à exploiter car ils pourraient ensuite être valorisés en matières premières telles que le papier et le bois (Gomes *et al.*, 2012).

2.6.2. Les transferts du sol vers les plantes

a) Le prélèvement des éléments-traces par les racines

Mécanismes de prélèvement

Les ETM peuvent entrer en contact avec la plante de deux façons : les parties aérienne ou racinaire. La quantité d'élément pouvant être transférée dans la plante durant son développement correspond à la phytodisponibilité de cet élément-trace.

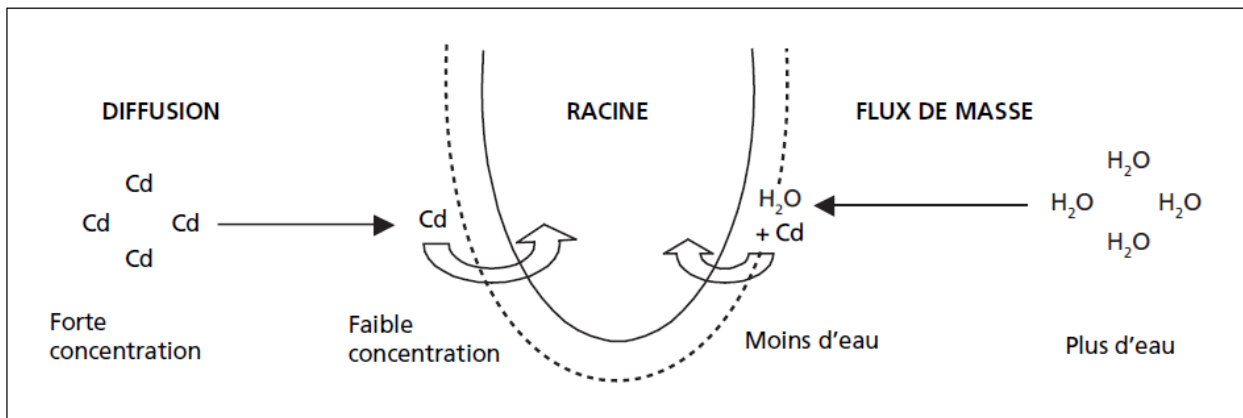


Figure n°13 : Transport des éléments-traces vers la racine, par diffusion et flux de masse (Tremel-Schaub et Feix, 2005)

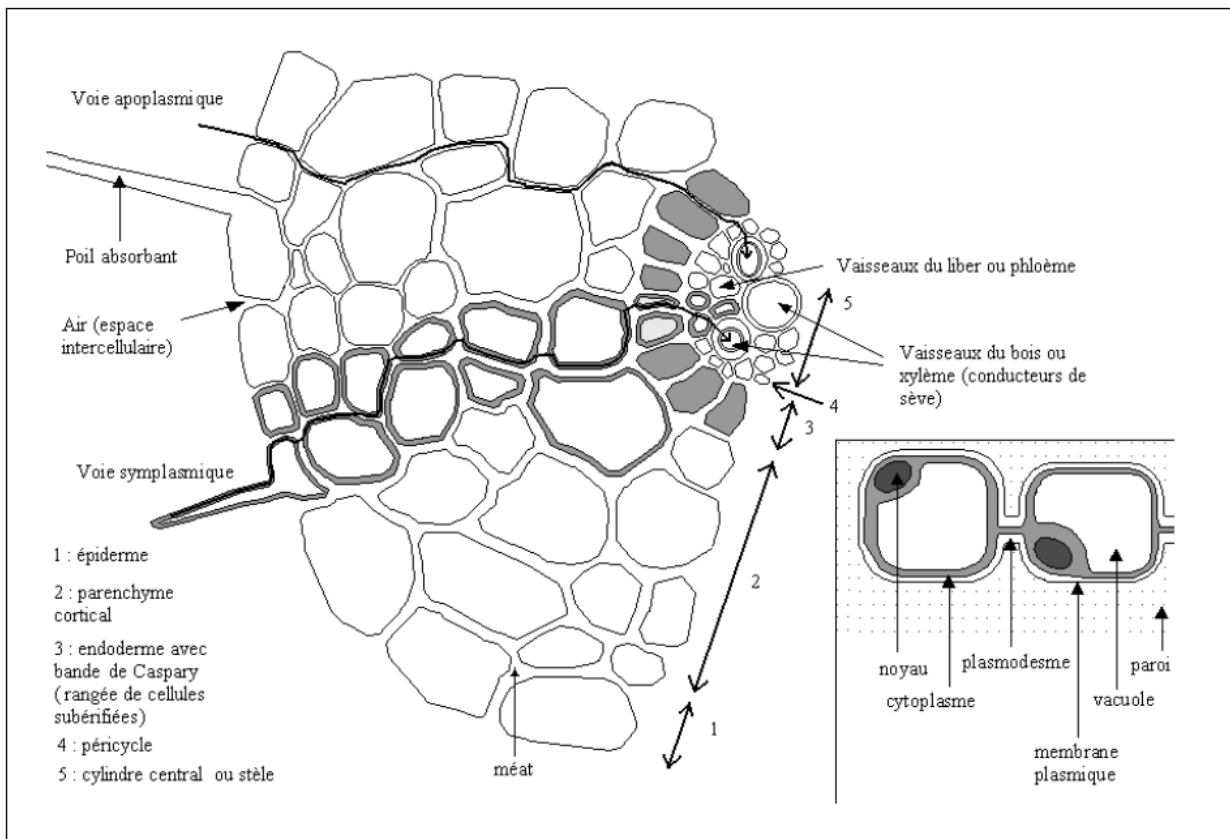


Figure n°14 : Transport des éléments-traces dans la racine par la voie symplasmique ou apoplasique (Tremel-Schaub et Feix, 2005)

L'absorption des ETM par les racines de la plante est un mécanisme encore mal compris. Leur disponibilité est dépendante du temps, des composantes du sol, de la plante et de sa biomasse. Elle permet un ensemble de processus successifs contribuant au transfert de l'élément de la phase solide du sol vers la solution du sol puis aux tissus de la plante par prélèvement.

La fraction disponible en ETM pour les racines des plantes est faible par rapport à la teneur totale en ETM et elle se situe dans la solution du sol, l'eau interstitielle. En effet, la phase liquide permet aux ions de se déplacer vers la surface des racines. Les plantes ont une concentration en ETM plus basse de un à trois ordres de grandeur par rapport à celle dans la solution du sol. Deux processus permettent aux éléments d'être transférés vers la rhizosphère : la diffusion qui est un transport passif et le flux de masse lors de l'absorption de l'eau (Figure n°13) (Tremel-Schaub et Feix, 2005).

Prélèvements des éléments-traces

La membrane plasmique permet de réguler et sélectionner l'entrée des éléments minéraux en concentrant les éléments nutritifs et en excluant les éléments toxiques. Elle est une barrière aux mouvements passifs des ions. Les cellules communiquent et sont reliées entre elles grâce à des plasmodesmes, des « tunnels » de cytoplasme. Les ions sont prélevés sous forme cationique, sont libérés dans l'apoplaste des racines et sont ensuite distribués entre trois compartiments: plus loin à l'intérieur des cellules, plus loin dans l'apoplaste ou en se fixant aux substances des parois cellulaires. Les éléments-traces peuvent circuler par deux voies dans les racines: symplasmique ou apoplasmique (Figure n°14).

Le symplasme correspond à l'intérieur de la membrane plasmique. Les éléments-traces métalliques traversent la paroi et la membrane plasmique et circulent de cellule en cellule grâce aux plasmodesmes. La cellule végétale absorbe l'élément de trois manières: une absorption passive avec un gradient électrochimique des ions, une absorption passive avec une dépense énergétique de la cellule comme par exemple une pompe à protons ou encore une absorption active avec aussi une dépense énergétique et l'implication d'un transporteur. Par le transport actif, les ions absorbés sont sélectionnés, impliquant la sortie d'un ion de la même charge. Les métaux peuvent s'accumuler dans le cytoplasme des cellules parce qu'ils peuvent se fixer aux charges négatives de macromolécules variées solubles et faisant partie des structures cellulaires. La quantité de métal accumulée dépend du métal et de l'espèce végétale. En présence de plomb, de zinc et de cadmium, certains compartiments comme la vacuole permettraient une détoxification cytosolique empêchant des effets sur les processus métaboliques essentiels. Dans le cytoplasme, certaines molécules solubles peuvent fonctionner comme des « navettes » en formant des complexes avec les métaux afin de faciliter la traversée du tonoplaste vers la vacuole.

L'apoplasme correspond à la paroi perméable ainsi que les espaces entre les cellules et représente 10 à 15% du volume de la racine. Cette voie est décisive pour certains éléments-traces chargés positivement pénétrant difficilement dans la cellule ou se liant fortement à des composés de la paroi. Par cette voie, l'élément est prélevé mais non absorbé car il ne pénètre pas dans la cellule. Le transport par cette voie se fait par l'endoderme et est arrêté après cinq à dix rangées de cellules par la bande de Caspary qui est composée de cellules recouvertes d'une substance lipidique imperméable. Les éléments-traces devront donc être absorbés par les cellules pour ensuite être transportés vers les vaisseaux conducteurs de sève brute, le xylème. Le xylème permettra aux éléments de se diriger vers les parties aériennes de la plante (Tremel-Schaub et Feix, 2005).

b) Le transport des éléments-traces dans la plante

Le principal moyen de transport des racines vers les parties aériennes pour les ions minéraux est le xylème. En effet, la sève brute pouvant contenir des ions métalliques circule des racines vers les parties aériennes grâce à la poussée radiculaire et la transpiration foliaire. Dans les vaisseaux xylémiens, une majorité des ions métalliques serait transportée sous forme de composés cationiques ou anioniques. Les éléments-traces peuvent donc circuler sous la forme d'ions libres ou de complexes avec des acides organiques.

Cependant, la paroi du xylème contient des éléments chargés négativement pouvant lier les ions positifs libres de la sève et ainsi freiner la progression des métaux par exemple. Le phloème est constitué de cellules contenant des substances et des ions se liant facilement ce qui rendrait difficile le transport des éléments-traces (Tremel-Schaub et Feix, 2005). L'apport de microorganismes aux plantes pourrait avoir un intérêt certain pour la dépollution des sols et surtout pour le développement et la résistance des plantes face à un environnement difficile (Hildebrandt, Regvar et Bothe, 2007). Le choix des plantes est essentiel mais l'intervention des microorganismes dans le processus de phytoremédiation est une voie à prendre en compte.

Comme abordé dans la partie introductive, il est rappelé ici que cette étude est menée en collaboration avec la station ASTREDHOR GRAND-EST qui travaille comme dans cet essai avec une gamme de plantes de géraniums vivaces (9 espèces de géraniums), mais aussi avec une gamme de saules (14 espèces de saules). Des champignons mycorhiziens différents de ceux utilisés dans cet essai sont également apportés lors du repotage des plantes.

Ce mémoire se compose d'une partie correspondant aux matériels et aux méthodes utilisées présentant les dispositifs expérimentaux ainsi que leurs caractéristiques concernant les végétaux et leur mise en place, les microorganismes et les polluants. Puis, d'une autre partie, qui aborde les résultats donnant un aperçu graphique et chiffré des données obtenues, analysées, interprétées puis discutées. Et enfin, des perspectives sont abordées afin d'envisager les suites à donner à ce projet.



Figure n°15 : Photographies des fleurs de neuf variétés étudiées dans les essais sur perlite et sur sol pollué (15A : *Geranium sanguineum*, 15B : *Geranium macrorrhizum*, 15C : *Geranium x 'Cantabrigiense'* et 15D : *Geranium x 'Rozanne'*, 15E : *Grevillea juniperina*, 15F : *Grevillea lanigera* 'Mount Tamboritha', 15G : *Grevillea rosmarinifolia* 'Jenkinsii', 15H : *Ceanothus thyrsiflorus* 'Skylark', 15I : *Potentilla fruticosa* 'Goldfinger',)
(Sourzat, Mai 2016, ASTREDHOR Sud-Ouest)



Figure n°16 : Photographies des eucalyptus étudiés dans l'essai sur sol pollué (16A : *Eucalyptus gundal* Clone 208 et 16B : *Eucalyptus gundal* Clone 645)
(Sourzat, Août 2016, ASTREDHOR Sud-Ouest)

Matériels et méthodes

1. Matériels d'étude

1.1. Le matériel végétal

Dans un premier temps, une recherche et une synthèse bibliographique ont permis de mettre en évidence une liste non exhaustive de plantes candidates pour la phytoremédiation. D'après la bibliographie, il est possible d'utiliser des géraniums pour la phytoremédiation des sols contaminés par les métaux lourds et notamment le plomb. Dans le cas de cette étude, il est choisi de travailler avec des géraniums vivaces plus résistants à des températures froides. Quatre espèces vivaces du genre *Geranium* sont choisies : *Geranium sanguineum* L. (Figure n°15A), *Geranium macrorrhizum* L. (Figure n°15B), *Geranium x 'Cantabrigiense'* (Figure n°15C) et *Geranium x 'Rozanne'* (Figure n°15D).

Dans un deuxième temps, au regard de la bibliographie, trois espèces du genre *Grevillea* sont choisies : *Grevillea juniperina* A. Cunn. (Figure n°15E), *Grevillea lanigera* A. Cunn. 'Mount Tamboritha' (Figure n°15F) et *Grevillea rosmarinifolia* A. Cunn. 'Jenkinsii' (Figure n°15G). Deux autres plantes arbustives sont sélectionnées : *Ceanothus thyrsiflorus* Eschsch. 'Skylark' (Figure n°15H) et *Potentilla fruticosa* L. 'Golfinger' (Figure n°15I). Enfin, deux clones d'*Eucalyptus gundal*, les clones 208 (Figure n°16A) et 645 (Figure n°16B), sont inclus pour leur éventuel intérêt dans la phytoremédiation. Il s'agit de clones ayant de bonnes capacités de croissance et tolérants le gel. Les eucalyptus sont mis en place seulement sur l'essai « sol pollué ». Cette décision est prise après la mise en place de l'essai sur perlite et suite à des discussions avec des spécialistes bordelais travaillant sur la phytoremédiation. Les recherches bibliographiques ont confirmé l'intérêt de cette plante pour la phytoremédiation.

Au regard du Tableau n°3, les espèces étudiées possèdent des floraisons, des feuillages et des ports différents permettant de concevoir des aménagements paysagers intéressants. Les grévilléas, les potentilles et les céanotes sont fournis par les Pépinières Jacques Briant à Saint-Sylvain-d'Anjou (49) et les Pépinières La Forêt à Les Sorinières (44), les géraniums par les Pépinières Muller à Moncel Les Luneville (54). Les eucalyptus ont pour origine de jeunes plants issus de culture *in vitro* du FCBA, l'Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement.

1.2. Les microorganismes

1.2.1. Champignons mycorhiziens

Afin de savoir si les champignons endomycorhiziens arbusculaires jouent un rôle dans la phytoremédiation, ces derniers sont ajoutés dans le support de culture pour certaines modalités.

Pour ce faire, lors du repotage, la moitié des plantes est mise en présence du champignon endomycorhizien arbusculaire, *Rhizophagus irregularis*. Il s'agit du produit appelé Myke Pro P501 commercialisé par la Société Premier Tech Faliénor. Il se présente sous forme d'une poudre dont la concentration est de 500 spores/g. La poudre est incorporée au substrat dans un mélangeur (bétonnière) lors du repotage des plants à une concentration de 400 g/m³.

Tableau n°3 : Liste des plantes étudiées et leur description (Sourzat, 2016)

Espèces	Famille	Description
<i>Geranium sanguineum</i> L.	Géraniacées	Le géranium sanguin est une plante rustique et très robuste avec une floraison de mai à juin. Les fleurs sont rose foncé. Le feuillage est semi-persistant vert avec des lobes dentelés.
<i>Geranium x</i> 'Rozanne'		Le <i>Geranium x</i> 'Rozanne' est un géranium hybride entre <i>Geranium himalayense</i> et <i>Geranium wallichianum</i> 'Buxton's Variety'. Il s'agit d'une plante avec une floraison bleu clair de mai à octobre. Le feuillage est semi-persistant, vert avec des lobes dentelés.
<i>Geranium macrorrhizum</i> L.		Le <i>Geranium macrorrhizum</i> est une plante originaire du Sud et du centre de l'Europe. Elle peut mesurer plus de 30 cm de hauteur. Les feuilles sont semi-persistantes, vertes et peuvent mesurer plus de 8 cm. Les fleurs sont rose foncé à mauve.
<i>Geranium x</i> 'Cantabrigiense'		Le géranium de Cambridge est un hybride entre <i>Geranium dalmaticum</i> et <i>Geranium macrorrhizum</i> . Il s'agit d'une plante rustique et robuste pouvant atteindre une hauteur de 25 cm et 40 cm de large. Le feuillage est semi-persistant et vert. Les fleurs apparaissent d'avril à juin et sont rose clair à mauve.
<i>Potentilla fruticosa</i> L. 'Goldfinger'	Rosacées	La potentille arbustive est originaire de l'hémisphère nord. Il s'agit d'un arbuste vivace, érigé et pouvant mesurer 1,20 m de hauteur et de largeur. Son feuillage est caduc, vert et argenté. Les fleurs se développent de juin à octobre et sont de couleur jaune citron.
<i>Ceanothus thyrsiflorus</i> Eschsch. 'Skylark'	Rhamnacées	Le Lilas de Californie est une autre espèce ayant été choisie. Il est originaire de la Californie. Il s'agit d'un arbuste dressé, mesurant 1,50 m de hauteur et de largeur. Son feuillage est persistant et vert foncé. Les fleurs se développent de mai à juin et sont de couleur bleu indigo.
<i>Grevillea juniperina</i> A. Cunn.,	Protéacées	Le <i>Grevillea juniperina</i> est un arbuste vivace, dressé, d'une hauteur de 2 m, au feuillage persistant vert en forme d'aiguilles. Les fleurs se développent de mai à août, en grappes rouges jusqu'à 6 cm de longueur.
<i>Grevillea lanigera</i> A. Cunn. 'Mount Tamboritha'		Le grévilléa laineux est un arbuste rampant d'une hauteur de 50 cm et d'une largeur de 1,50 m. Son feuillage est persistant, vert, légèrement poilu et allongé, aux bords incurvés. Les fleurs apparaissent de mars à juin et sont roses et blanches.
<i>Grevillea rosmarinifolia</i> A. Cunn. 'Jenkinsii'		Le grévilléa à feuilles de romarin ou grévillier est un arbuste vivace, dressé, pouvant atteindre une hauteur de 2 m. Il présente un feuillage persistant et piquant, vert foncé et argenté dessous. Les fleurs apparaissent de mars à juin et sont sous forme de grappes de 7 cm roses et crème.
<i>Eucalyptus gundal</i> Clone 208	Myrtacées	L' <i>Eucalyptus gundal</i> est issu des hybrides naturels de deux espèces tasmaniennes, <i>Eucalyptus gunnii</i> et <i>Eucalyptus dalrympleana</i> . A 10 ans, ils peuvent mesurer 25 m de haut et atteindre 35 à 40 m en Europe. Les feuilles juvéniles du clone 208 sont ovales alors que celles du clone 645 sont lancéolées. Pour les deux clones, les feuilles adultes sont lancéolées, vertes à vert foncé. Les fleurs sont blanches et sont souvent regroupées par trois.
<i>Eucalyptus gundal</i> Clone 645		

Les champignons ectomycorhiziens utilisés dans cette étude proviennent du produit PE-2 avec une concentration de 4.10^6 spores/g, commercialisé par la Société Premier Tech Faliénor. La poudre est constituée de trois champignons : *Pisolithus tinctorius*, *Rhizopogon spp.* et *Scleroderma spp.*. Elle est incorporée au sol pollué additionné à la terre végétale dans le mélangeur lors de la plantation avec une concentration de 0,3 g/l.

1.2.2. Bactérie Auxiliaire de la Mycorhization

Afin de favoriser la symbiose mycorhizienne entre les différentes plantes et *Rhizophagus irregularis*, il est ajouté lors du repotage, une bactérie auxiliaire de la mycorhization (BAM), *Bacillus pumilus*. Le produit utilisé s'appelle GHA 180 de la Société Premier Tech Faliénor et il est sous la forme liquide. La concentration de la solution de suspension bactérienne *Bacillus pumilus* est de 10^9 spore/ml et est incorporée au substrat à la concentration de 50 ml/m³.

2. Méthodes

Le travail s'effectue sur trois échelles d'étude. Les plantes sont mises en place sur : 1: un support inerte de perlite avec ou sans inoculation au plomb, 2: un sol pollué d'un site de Bordeaux, 3: un site pollué de Bordeaux.

Ce stage ne concerne que les essais sur supports perlite et sol pollué. La localisation des essais se situe en serre découvrable.

2.1. Techniques culturales

2.1.1. Biotisation des substrats et préparation des plantes pour la plantation

Tous les repotages sont effectués dans des pots de 2L avec ajout ou non de spores de champignons endomycorhiziens arbusculaires accompagnés de bactéries auxiliaires de la mycorhization. Dans le cas de l'expérimentation sur perlite et avant l'installation de l'essai, les plantes sont précultivées sur différents substrats fertilisés (Annexe n°II). La biotisation des géraniums et des potentilles est faite sur le substrat Premier Tech Faliénor « Dipla » avec une fertilisation Multicote 6 mois (18-6-12+Micronutriments). Les céanothes et les grévilléas sont biotisés sur le substrat STAR pierre ponce avec le fertilisant Basacote Plus (16-8-12+2MgO). Dans le cas de l'essai sur sol pollué, la biotisation des plantes est effectuée sur le substrat Premier Tech Faliénor « Dipla » et le fertilisant Basacote Native 6 mois (14-3-19+2MgO) excepté pour les eucalyptus où est utilisé le fertilisant Nutricote T140 (18-6-8) (Annexe n°III).

2.1.2. Utilisation de bacs de culture

Des bacs lysimétriques sont utilisés pour contenir la perlite et le sol pollué. Ainsi, deux caisses de 18 L percées de 5 trous sont déposées sur un bac étanche de 38 L permettant la récupération des percolats (Figure n°17). Chaque caisse contenant les supports de culture est composée de deux plantes. Les caisses sont uniquement remplies avec 12 litres de support de culture. L'essai est placé sur des tablettes de 7 m² situées dans la serre découvrable pilotée informatiquement.

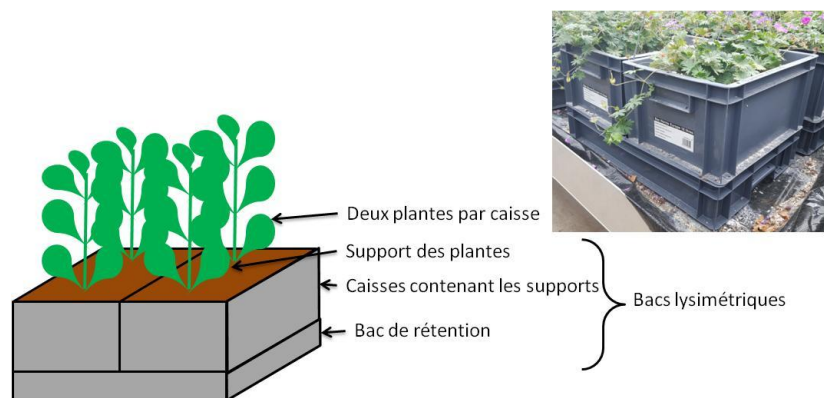
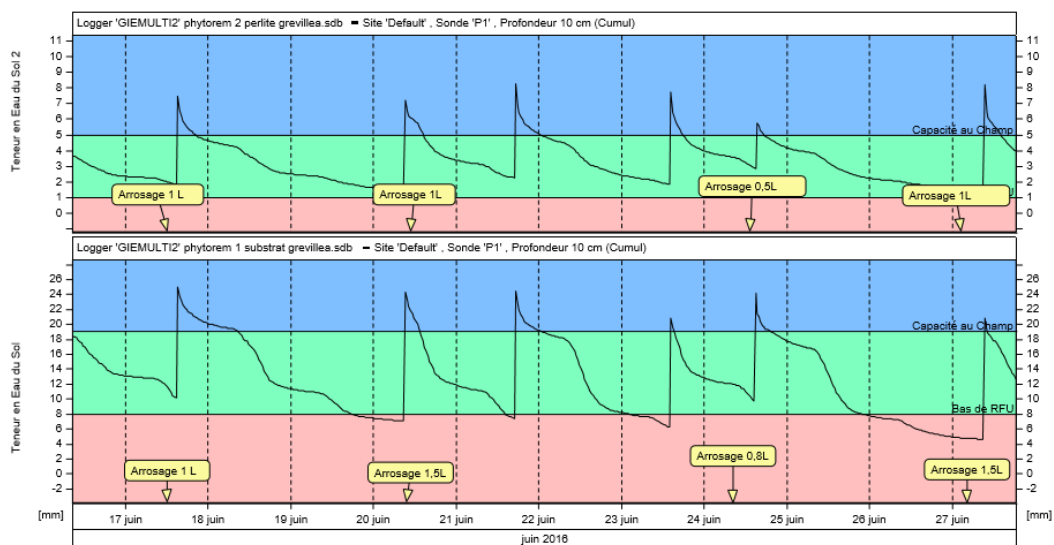


Figure n°17 : Schéma de la mise en place des caisses et du bac de rétention pour les essais sur perlite et sur sol pollué (Sourzat, Mars 2016, ASTREDHOR Sud-Ouest)



Figure n°18 : Photographies des Sondes EasyAG® 50 (18A) et du boîtier Sentek MULTI® (18B) pour l'arrosage (Sourzat, 2016, ASTREDHOR Sud-Ouest)



Graphique ImiMAX "T:\Experimentation\Essais\2015\phyto remediation\sonde sentek\PN phytorem pour AR grevillea.gtf"

Imprimé: 28/07/2016 11:51:02 AM

Figure n°19 : Représentations graphiques des irrigations et de l'humidité générale du sol pour l'essai sur perlite (Sourzat, 2016)

2.1.3. Irrigation

La gestion de l'arrosage s'effectue grâce à deux sondes, une placée dans la perlite et l'autre dans le substrat. Les sondes utilisées sont des Sondes EasyAG® 50 (Figure n°18A) de l'entreprise Sentek. Elles permettent d'effectuer un suivi de l'environnement racinaire de la plante jusqu'à une profondeur de 50 cm avec quatre capteurs à 10 cm, à 20 cm, à 30 cm et à 50 cm. Un champ électrique est créé autour du capteur permettant de déterminer la résistance électrique du sol et d'obtenir son humidité. La sonde est connectée à un boîtier Sentek MULTI® (Figure n°18B) enregistrant et analysant les données. Enfin, le logiciel IrriMAX® donne une représentation graphique des irrigations et de l'humidité générale du sol (Figure n°19). Grâce à ces graphiques, des décisions sont prises sur l'arrosage des caisses. D'une part, les sondes permettent de ne pas trop arroser pour qu'il n'y ait pas trop de percolation et de plomb se retrouvant dans le bac de rétention. D'autre part, la plante ne doit pas subir trop de stress hydriques qui pourraient l'affaiblir. En fonction de l'observation et des résultats obtenus sur les courbes, un arrosage manuel des plantes est appliqué.

2.1.4. Moyens de lutte contre les bio-agresseurs

Des traitements sont effectués sur les cultures afin de lutter contre de nombreux ravageurs des plantes. La lutte biologique est privilégiée dans cet essai. Cependant dans certains cas, il est nécessaire d'utiliser des produits phytosanitaires. Par exemple, les céanothes sont traités en action curative et préventive contre les cochenilles et les géraniums de manière curative contre les thrips et l'oïdium. Les traitements en lutte biologique sont effectués par la suite et permettent d'anticiper d'éventuelles attaques de cochenilles, de pucerons et d'acariens.

2.2. Dispositifs expérimentaux

2.2.1. Essai sur perlite

a) Modalités

Les modalités étudiées sont : 1: le facteur « espèces » avec 9 espèces différentes, 2: le facteur « absence ou présence de symbioses mycorhiziennes », 3: le facteur « absence ou présence de plomb ».

Le témoin de référence est constitué de substrat (le terreau 525 DA (14-16-18+oligo-éléments) de l'entreprise Peltracom) et permet de savoir si la perlite a un effet sur le développement de la plante.

L'essai comporte 63 grands bacs supportant deux caisses (126 caisses). Chaque caisse présente deux plantes pour un nombre total de 252 plantes (28 plantes par variété). Le témoin sans plomb présente 4 répétitions, 8 répétitions pour les plantes en présence de plomb et enfin 2 répétitions pour les témoins substrats (Figure n°20).

b) Préparation de la perlite et du substrat

Le dispositif expérimental est mis en place huit semaines après le repotage des plantes sur le substrat de préculture. Il est ajouté une fertilisation de 2 g/L d'Osmocote exact 5-6 (15-9-12+2MgO+TE) par caisse à la perlite et au substrat de référence. Les plantes pré-cultivées avec ou sans mycorhize sont dépotées, l'excédent de substrat est enlevé et ces dernières sont empotées dans les caisses de l'essai.

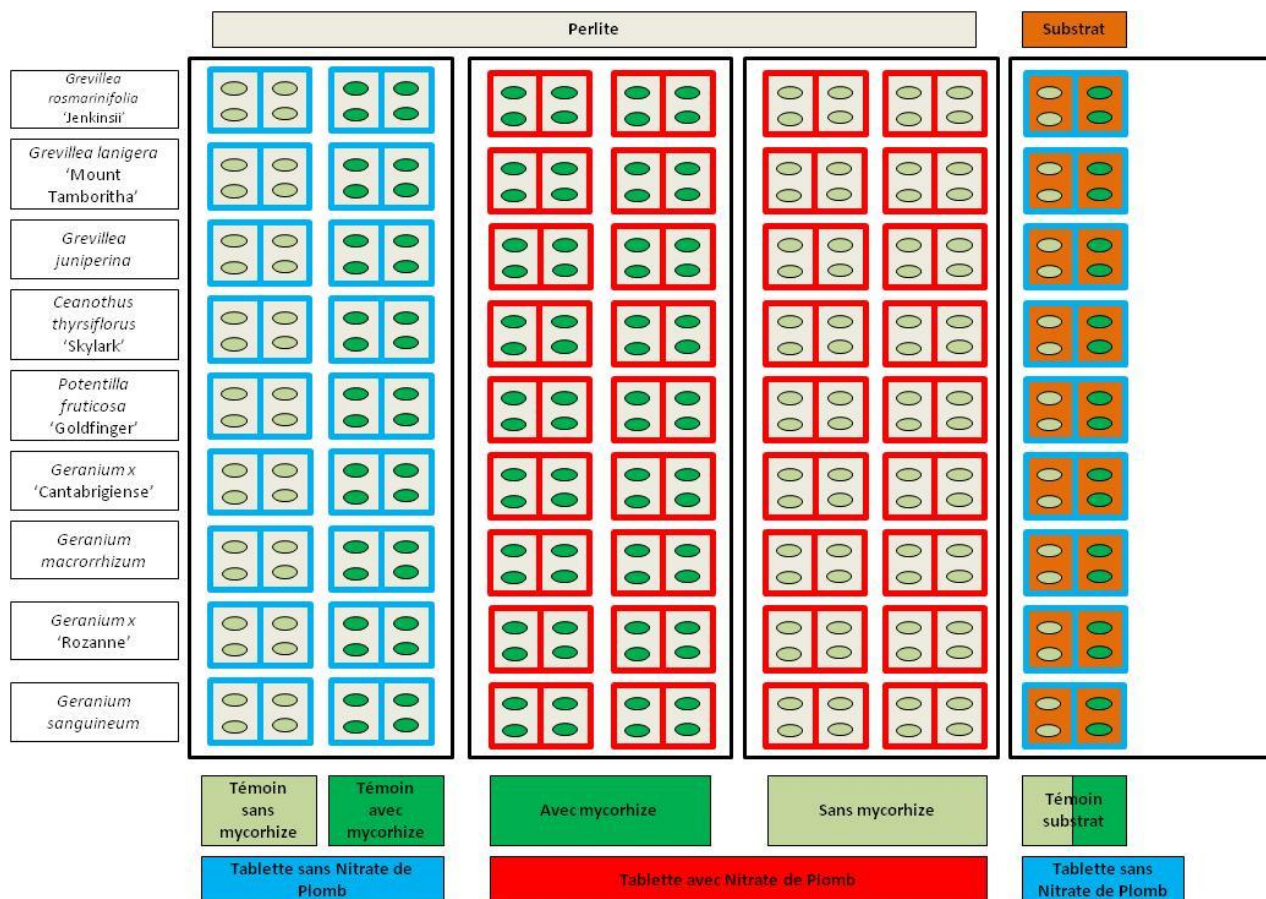


Figure n°20 : Schéma du dispositif expérimental de l'essai sur perlite (Sourzat, 2016)

Calculs pour l'inoculation au Nitrates de Plomb :

Volume dans la caisse = 0,012 m³ et poids de la caisse vide = 900 g

Avec 13 cm de perlite sèche, poids moyen de la caisse + perlite = 2500 g

Donc poids de la perlite par caisse = 1600 g

Densité de la perlite = 1600 g / 0,012 m³ = 134 kg/m³

Contamination à 200 ppm : 1,6 kg x 0,2 g.kg⁻¹ = 0,32 g de plomb par caisse

Masse volumique du plomb : 207,2 g/mol ; 0,32 x 207,2 = 0,001544 mol de plomb par caisse

Masse volumique du Pb(NO₃)₂ : 331,2 g/mol ; 0,001544 x 331,2 = 0,511 g de nitrates de plomb/caisse

Pour un apport de 100 mL de solution contaminée par caisse : solution concentrée à 0,511 / 0,1 L = 5,11 g/L

A peser pour 72 caisses : 0,511 g x 72 = 36,79 g de nitrates de plomb en tout

A préparer : 0,1 L x 72 = 7,2 L de solution à 5,11 g/L de nitrates de plomb

Figure n°21 : Calculs effectués pour l'inoculation au plomb dans la perlite (Maugin, 2016)

c) Inoculation du plomb

Le plomb est apporté dans les caisses sous forme de Nitrate de plomb, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, mis en solution. La contamination est effectuée à 200 ppm (mg.kg^{-1}). Cette teneur est conseillée par le Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux (LIEC) de l'Université de Lorraine avec qui nous collaborons pour l'analyse des échantillons. Les calculs pour l'inoculation sont présentés dans la Figure n°21. L'inoculation au plomb a été faite le 09/03/2016 sur 72 caisses, 8 caisses par variété au nombre de 9.

d) Prélèvements pour les analyses

Trois récoltes d'échantillons sont effectuées. Le 10 mars 2016, les plantes témoins empotées dans des caisses non contaminées par le plomb (à T0) et des sachets de perlite témoins sont récoltés afin de savoir s'ils contiennent du plomb. Pour obtenir les poids secs, les échantillons sont apportés au laboratoire AUREA afin de les faire sécher après le passage dans une étuve à 80°C. Le 10 mai et 24 mai 2016, les plantes à Tf avec ou sans plomb ainsi que de la perlite avec ou sans ajout de plomb sont prélevées. Les plantes du 10 mai sont envoyées au laboratoire AUREA de Blanquefort (33) et celles du 24 mai au LIEC de Nancy (54). Cependant, il n'a pas été possible d'envoyer toutes les plantes de chaque modalité car les analyses sont très chères. De plus, tous les échantillons qui devaient être envoyés au LIEC ne l'ont pas été (délais trop importants). De ce fait, il est décidé d'effectuer un deuxième prélèvement et d'envoyer d'autres échantillons à un autre laboratoire, AUREA qui pouvait donner les résultats avant la fin du mois d'août. Par conséquent, les résultats obtenus concernent les plantes témoins sans plomb et la perlite à T0, analysées par le LIEC, ainsi que les plantes et la perlite à Tf analysées par AUREA.

e) Devenir des plantes non utilisées

Les plantes non inoculées au plomb sont jetées au compost contrairement aux plantes étant en contact avec le plomb. Celles-ci sont séchées dans une bâche plastique placée à l'extérieur (Figure n°22) afin qu'elles puissent être traitées et éliminées par un laboratoire spécialisé dans la récupération de produits toxiques. La perlite contenant le plomb est aussi séchée et conservée jusqu'à ce qu'elle soit traitée et éliminée.

2.2.2. Essai sur sol pollué

a) Modalités

Les modalités étudiées sont : 1: le facteur « espèces » avec 11 espèces différentes, 2: le facteur « absence ou présence de symbioses mycorhiziennes », 3: le facteur « ajout ou non de champignons mycorhiziens lors de la plantation en caisse », 4: le facteur « absence ou présence de plomb dans le sol ».

L'essai comporte 57 grands bacs supportant deux caisses (114 caisses). Chaque caisse présente deux plantes, soit un nombre total de 220 plantes (20 plantes par variété). Seules 4 caisses avec uniquement du sol permettent de voir le comportement des sols sans couverture végétale.



Figure n°22 : Photographie de la bâche permettant de faire sécher les plantes inoculées au plomb (Sourzat, Juillet 2016, ASTREDHOR Sud-Ouest)

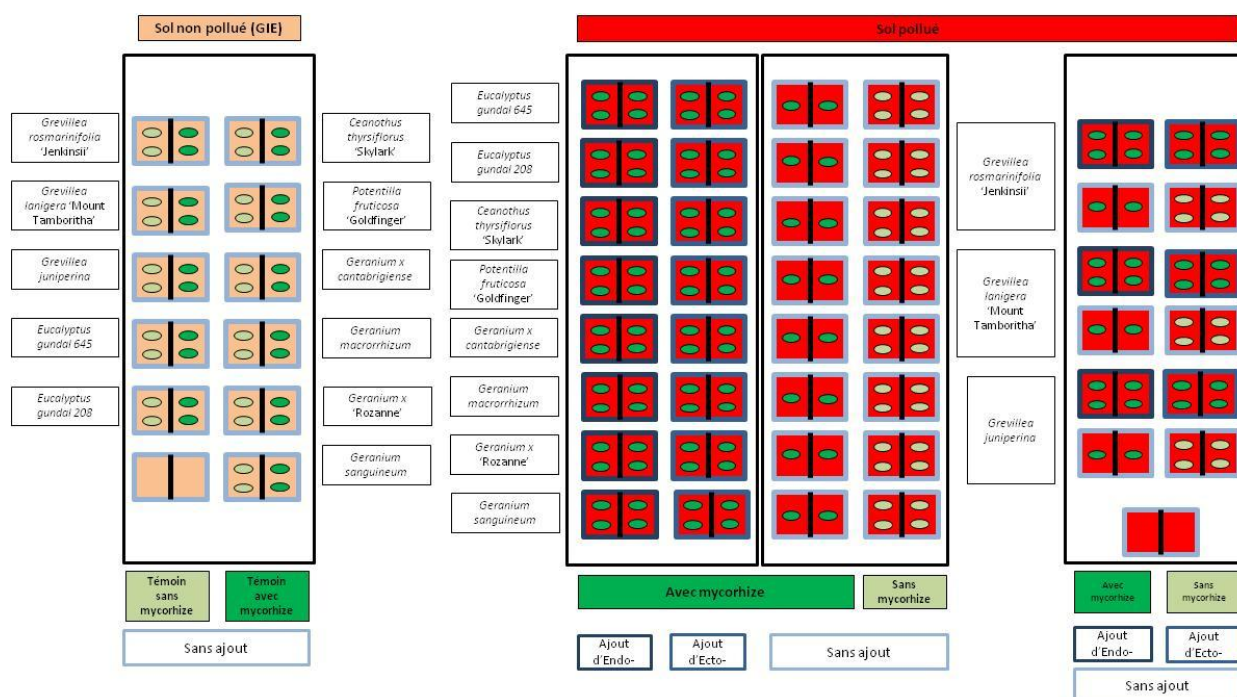


Figure n°23 : Schéma du dispositif expérimental de l'essai sur sol pollué (Sourzat, 2016)

Le témoin sol non pollué présente 2 répétitions pour les plantes mycorhizées et pour les non mycorhizées. Pour le sol pollué, il est mis en place une modalité d'ajout ou non de champignons mycorhiziens : 4 répétitions de plantes mycorhizées pour un ajout de champignons endomycorhiziens arbusculaires, 4 répétitions de plantes mycorhizées pour un ajout de champignons ectomycorhiziens, 2 répétitions de plantes mycorhizées sans ajout et 4 répétitions de plantes non mycorhizées sans ajout (Figure n°23).

b) Recherche d'un sol pollué

Le sol pollué devait être fourni à ASTREDHOR Sud-Ouest et Grand-Est par le LIEC de Nancy et devait provenir d'un site industriel d'ArcelorMittal. Au dernier moment cette société a refusé de fournir le sol pollué souhaité. De ce fait, il a été nécessaire d'obtenir des contacts de responsables de sites contenant des sols pollués afin de pouvoir effectuer des prélèvements pour l'expérimentation. Grâce à une recherche de structures ayant déjà travaillé sur la phytoremédiation, une série de premiers mails est envoyée à l'ADEME et au BRGM d'Aquitaine. Malheureusement, ces structures n'ont pas pu fournir de sol pollué. En conséquence, il est nécessaire de changer de stratégie. Par l'intermédiaire de certains contacts, il est possible de se renseigner sur des sites pollués ou potentiellement pollués aux alentours de Bordeaux, notamment grâce au site internet Basol. Une liste de sites pouvant correspondre aux attentes de l'expérimentation est établie. Les exploitants étaient de deux sortes, soit privés soit publics comme par exemple Bordeaux Métropole. Mr Eric Pesme, Directeur des Espaces Verts et Mr Lilian Marchand, Ingénieur d'étude ont répondu favorablement à notre requête. Après plusieurs réflexions et discussions, Mr E. Pesme a proposé un site potentiellement intéressant pour des prélèvements de sol et normalement contaminé au plomb et au zinc. Un déplacement sur le terrain est organisé avec Lilian Marchand et suite à cette visite une collaboration est établie. Le choix du lieu est définitivement déterminé. Les prélèvements du sol sont organisés avec un adjoint au Chef d'Unité zones naturelles du Nord, Mr Frédéric Wartel. Un tableau de toutes les personnes contactées durant le stage est placé en Annexe n°IV.

c) Présentation du site

Le site où est prélevé le sol se situe rive gauche de la Garonne au dessus du Pont d'Aquitaine, au Parc des Berges du Nord au 5 Avenue du Docteur Schinazi 33300 Bordeaux (Figure n°24). Ce lieu comporte un espace vert ouvert au public et d'anciens jardins familiaux construits dans les années 80, aujourd'hui abandonnés. La mise en place de ce parc de 10 hectares dans les années 1980 sur une propriété du port autonome de Bordeaux a permis la réhabilitation d'une ancienne décharge municipale. La Ville y a mené de nombreux travaux comme l'aménagement de zones herbacées, la plantation d'arbres, d'arbustes et de plantes à massif et la mise à disposition d'équipements pour les jardins familiaux. Aujourd'hui, le parc est entretenu écologiquement avec une réflexion sur les tontes afin de favoriser la biodiversité de la faune et de la flore.

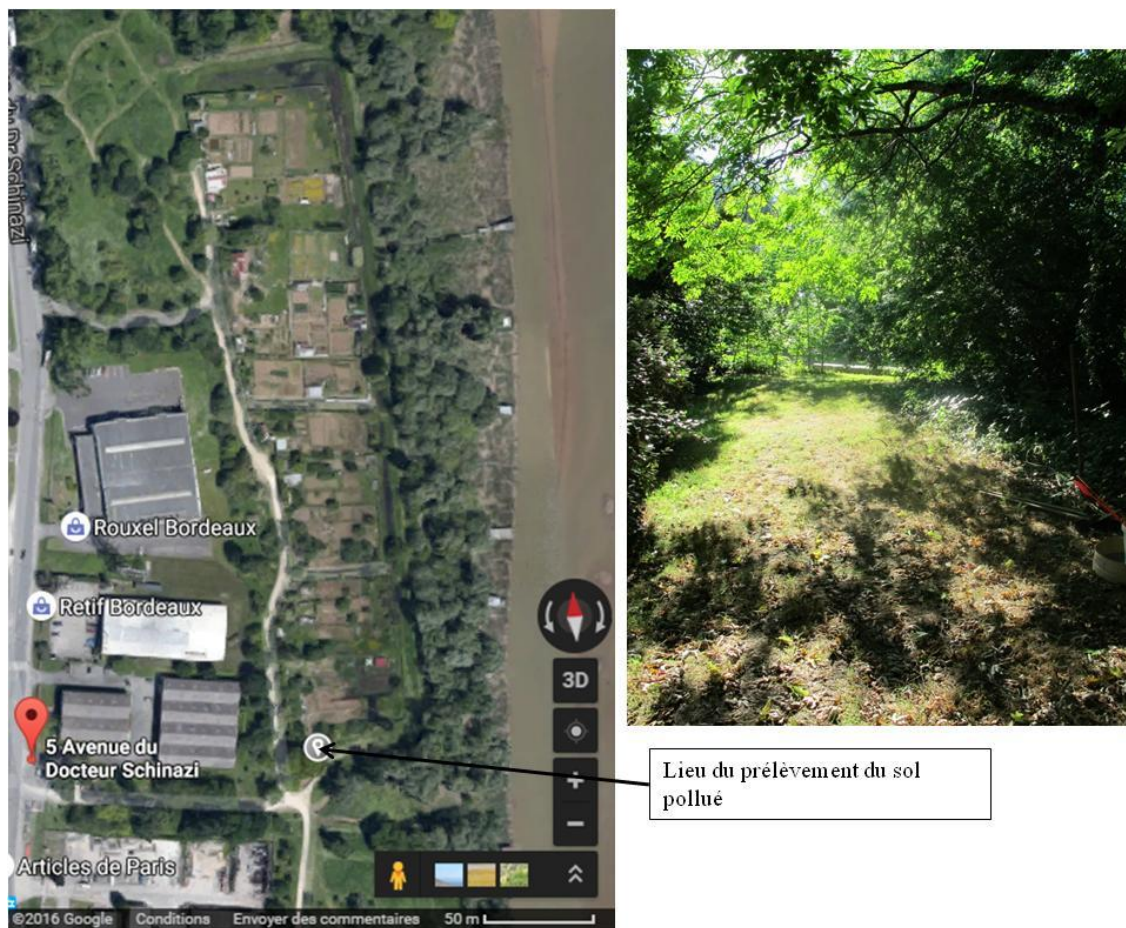


Figure n°24 : Cartographie et photographie du lieu du prélèvement du sol pollué
(Google maps, 28/08/2016 et Sourzat, Août 2016, 5 Avenue du docteur Schinazi 33300 Bordeaux)



Figure n°25 : Photographie de la mini-pelle remplissant les caisses de sol pollué
(Sourzat, Août 2016, 5 Avenue du docteur Schinazi 33300 Bordeaux)

Il y a environ 30-40 ans, une usine d'incinération de déchets spéciaux à proximité du parc a été fermée car celle-ci libérait du plomb et du zinc dans l'atmosphère. La présence de cette usine et de la décharge recouverte ont entraîné une pollution de surface par des métaux lourds ainsi qu'une pollution en profondeur par toute sorte de déchets. En effet, il est possible de retrouver de nombreux déchets non recyclables en creusant à environ 15-20 cm. A partir du site internet Google maps, les coordonnées GPS sont définies pour avoir le lieu exact de prélèvement du sol: 44.886122, -0.539703 (Figure n°24).

d) Récupération et préparation des sols

Des premiers prélèvements de sol sont effectués le 1^{er} août 2016 afin de les faire analyser en laboratoire pour obtenir les taux de métaux lourds. Le 4 août 2016, le sol est prélevé. L'expérimentation nécessite environ 2 m³. Grâce à une mini-pelle du Service des Espaces Verts de Bordeaux Métropole, il est possible de récupérer la quantité souhaitée (Figure n°25). Une première couche de sol d'environ 2 cm comprenant les végétaux est supprimée afin d'éliminer les déchets organiques. Puis le sol est creusé sur seulement 15 cm maximum de profondeur. En effet il est nécessaire d'éviter de récupérer les déchets de la décharge. Ce sol est ramené à la station d'expérimentation.

Durant quatre jours, le sol est séché dans des caisses (Figure n°26A). Puis il est tamisé afin de supprimer les déchets organiques et inorganiques (Figure n°26B), écrasé afin de casser les mottes (Figure n°26C) et trié pour récupérer un sol d'une granulométrie de 2 cm de diamètre (Figures n°26D et 26E).

Le dispositif expérimental est mis en place 20 semaines après la préparation des plantes biotisées. Dans un objectif d'obtenir un sol non pollué correspondant au témoin, il est décidé de récupérer celui-ci à proximité de la station d'expérimentation. Pour améliorer la teneur en matière organique du sol non pollué ou pollué, une terre végétale est récupérée sur l'entreprise La Grande Jauge à Saint-Médard-en-Jalles (33), spécialisée dans les composts. Ainsi, pour la préparation des supports d'expérimentation, deux tiers de sols non pollué ou pollué sont mélangés avec un tiers de terre végétale. La terre végétale permet d'améliorer la reprise des plantes avec une décomposition de la matière organique lente mais bien aérée.

Une fertilisation supplémentaire est rajoutée. Il s'agit de 3 g/l de Basacote Native 6 mois (14-3-19+2MgO) et 1 g/l d'Osmocote Bloom 2-3 (12-7-18+TE). En ce qui concerne les modalités des plantes biotisées, il est décidé de rajouter en supplément des champignons endomycorhiziens arbusculaires ou des champignons ectomycorhiziens (cf. Paragraphe « Champignons mycorhiziens » page 15). L'implantation des plantes dans les caisses est faite le 17 août 2016 et se déroule de façon identique à l'essai sur perlite.

e) Mise en place de bacs en milieu extérieur

En complément du dispositif expérimental sous serre, trois bacs en bois sont placés à l'extérieur avec le sol pollué et les plantes restantes, sur la pépinière hors-sol. Cette mise en place permettra d'observer le comportement des plantes dans un contexte climatique différent de la serre. Le premier bac correspond aux plantes arbustives témoins (Figure n°27A), le deuxième aux plantes arbustives mycorhizées (Figure n°27B) et le troisième aux géraniums mycorhizés ou non (Figure n°27C).



Figure n°26 : Photographies du séchage du sol (26A), du tamisage du sol (26B), de l'écrasement des mottes (26C) et du tri des mottes (26D et 26E)
(Sourzat, 2016, ASTREDHOR Sud-Ouest)



Figure n°27 : Photographies des bacs extérieurs mis en place avec du sol pollué (27A : Bac n°1, 27B : Bac n°2 et 27C : Bac n°3)
(Sourzat, 2016, ASTREDHOR Sud-Ouest)



Figure n°28 : Photographies de toutes les étapes du protocole de coloration des racines (28A : nettoyage des racines, 28B : bain-marie à 90°C, 28C : apport du KOH à 10%, 28D : effet du KOH, 28E : blanchiment des racines, 28F : coloration des racines et 28G : lames à observer) (Sourzat, 2016, ASTREDHOR Sud-Ouest)

Le sol pollué est préparé de la même manière que pour l'expérimentation précédente (2/3 sol pollué et 1/3 terre végétale ainsi que fertilisation). Afin d'améliorer la reprise des végétaux, des champignons ectomycorhiziens sont ajoutés dans les trois bacs à une concentration de 0,3 g/l. Il s'agit d'une première approche pour appréhender l'implantation des végétaux directement sur un site pollué.

3. Notations effectuées

Symptômes de phytotoxicité

Après l'apport de plomb dans les bacs contenant les plantes concernées et avant les récoltes des échantillons, durant les semaines 11, 13, 15, 17 et 19, il est effectué une notation des symptômes de phytotoxicité afin de savoir si le plomb a un impact sur le développement ou la physiologie de la plante. Les symptômes observés, les organes touchés et l'intensité des symptômes sont notés. Les symptômes observés sont liés à la coloration, à la forme ou à l'état de la plante. L'intensité des symptômes est notée de 0 à 3 avec 3 correspondant à des dégâts très significatifs. Le tableau de notations des symptômes de phytotoxicité est placé en Annexe n°V.

Symbiose mycorhizienne

Pour l'essai sur perlite, lors de la récolte des différentes plantes à échantillonner, la symbiose mycorhizienne des racines par les champignons endomycorhiziens arbusculaires est vérifiée pour toutes les plantes, avec ou sans apport du champignon. Les différentes structures du champignon sont observées grâce à des colorations, suivies d'observations au microscope optique.

Protocole d'observation des structures mycorhiziennes

Le protocole de coloration se fait en plusieurs étapes. Il est d'abord nécessaire de passer sous l'eau et nettoyer les racines afin d'éliminer le substrat (Figure n°28A).

La première étape est l'éclaircissement au bain-marie à 90 °C (Figure n°28B) consistant en un traitement par une solution potassique (KOH à 10 %) (Figure n°28C), pendant 15 minutes. Elle provoque une hydrolyse basique des cellules végétales (Figure n°28D) ce qui permet par la suite d'observer certaines structures pouvant être présentes dans ces cellules. Les racines sont ensuite rincées 10 minutes dans un bain d'eau claire puis sont placées au contact d'eau oxygénée (10 volumes) durant 5 minutes. L'immersion dans une eau oxygénée entraîne la dépigmentation et le blanchiment des tissus (Figure n°28E). L'étape suivante correspond à la coloration des contenus racinaires grâce au mélange d'encre bleue à 5 % dans du vinaigre blanc (Figure n°28F). L'acide acétique contenu dans le vinaigre blanc permet de fixer la couleur bleu. La dernière étape consiste en une décoloration permettant d'augmenter le contraste entre les différentes structures. Elle se fait en utilisant quelques gouttes de vinaigre blanc et de l'eau. Les racines peuvent être stockées dans la solution d'eau et de vinaigre dans un réfrigérateur avant d'être observées au microscope. Grâce à ce protocole de coloration des endomycorhizes, il est possible d'observer les filaments entre les cellules racinaires, les arbuscules ou encore les vésicules du champignon (Figure n°28G).

Il en est de même pour les plantes utilisées dans l'essai sur sol pollué.

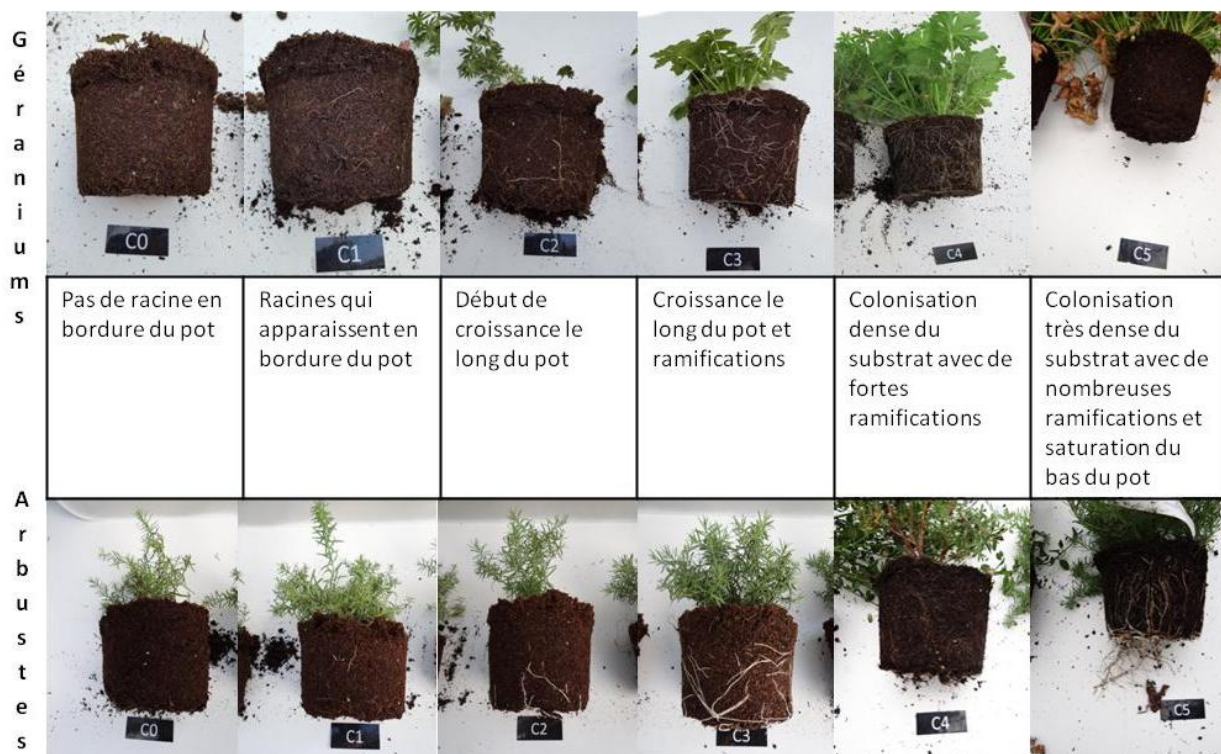


Figure n°29 : Classes d'enracinement des géraniums et des arbustes
(Sourzat, 2016, ASTREDHOR Sud-Ouest)

Tableau n°4 : Numéros donnés aux espèces, aux différentes parties de la plante, à la symbiose mycorhizienne et au plomb
(Sourzat, 2016)

Espèces	Numéro	Parties	Symbiose mycorhizienne	Plomb
G. sanguineum	1	R : racinaire A : aérienne	0 : non mycorhizé 1 : mycorhizé	0 : sans plomb 1 : avec plomb
G. x 'Rozanne'	2			
G. macrorrhizum	3			
G. x 'Cantabrigiense'	4			
P. fruticosa	5			
C. thrysiflorus	6			
G. juniperina	7			
G. lanigera 'Mount Tamboritha'	8			
G. rosmarinifolia 'Jenkinsii'	9			

Dosage du plomb

Pour l'essai sur perlite, après la récolte des différentes plantes, la partie racinaire est séparée de la partie aérienne. Les poids frais et les tailles sont mesurés pour les deux parties de la plante. Des sachets de perlite sont aussi récoltés. Chaque échantillon est séché au laboratoire AUREA de Blanquefort pour qu'ils puissent ensuite être analysés pour obtenir la teneur en plomb. Deux laboratoires effectuent les analyses des échantillons : le LIEC à Vandoeuvre-Lès-Nancy et AUREA à Blanquefort. Le dosage du plomb en laboratoire est effectué par la méthode de la spectrométrie à émission optique ICP (ICP-OES). Les plantes sont sélectionnées car cette méthode d'analyse est assez coûteuse.

Pour l'essai sur sol pollué, des échantillons de sol non pollué, de sol pollué et des mélanges 1/3 de terre végétale et 2/3 de sol, sont envoyés à AUREA afin de connaître la concentration exacte en plomb de ces différents sols. Même si au départ la concentration du Parc des Berges du Nord donnée par Bordeaux Métropole était connue, puisque déjà analysée (+/- 140 mg/kg). Ainsi, un échantillonnage du sol pollué est effectué. Trois points de prélèvement séparés par 3 mètres sont récupérés. L'objectif est de savoir s'il y a des différences en fonction des différents prélèvements. Par ces analyses, il est vérifié d'une part si le sol témoin est exempt de plomb et d'autre part si le sol pollué en contient suffisamment pour l'expérimentation. Dans le cas où le sol pollué ne présenterait pas assez de plomb, il pourrait être envisagé de le contaminer en rajoutant du Nitrate de Plomb.

Classifications racinaires

Des notations racinaires sont effectuées afin de comparer l'influence que peut avoir la symbiose mycorhizienne sur le développement de la racine. Ces notations sont réalisées tous les deux mois à partir du rempotage des plantes. Deux classes sont créées, une pour les plantes arbustives et une autre pour les géraniums. La Figure n°29 présente les différentes classes racinaires décrites.

4. Tests statistiques utilisés

Les analyses statistiques sont réalisées avec le logiciel RStudio®. La comparaison des classes racinaires, correspondant à une variable qualitative en fonction de deux facteurs qualitatifs que sont les espèces et la symbiose mycorhizienne, est effectuée par des tests du Chi2. Le but est de savoir si les espèces ou la symbiose mycorhizienne ont un impact sur la qualité du développement du système racinaire. La condition d'utilisation de ce test est remplie : l'effectif est supérieur à 5. Les différences observées au niveau des classes racinaires sont significatives en fonction d'un facteur si $p\text{-value} < 0,05$.

Afin de comparer les plantes entre elles et n'ayant pas de répétitions, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) est utilisée. Le premier objectif est de savoir s'il y a des liens entre les variables quantitatives qui sont le poids (frais et/ou sec), la taille et la concentration en plomb. Le deuxième objectif est de créer une topologie des individus c'est-à-dire de les représenter dans un plan afin de savoir s'ils sont proches ou éloignés. Le dernier objectif est de créer de nouvelles variables appelées composantes principales permettant de synthétiser l'information. Afin de faciliter la lecture sur le plan factoriel, une codification par numéros des plantes est créée et est présentée dans le Tableau n°4.

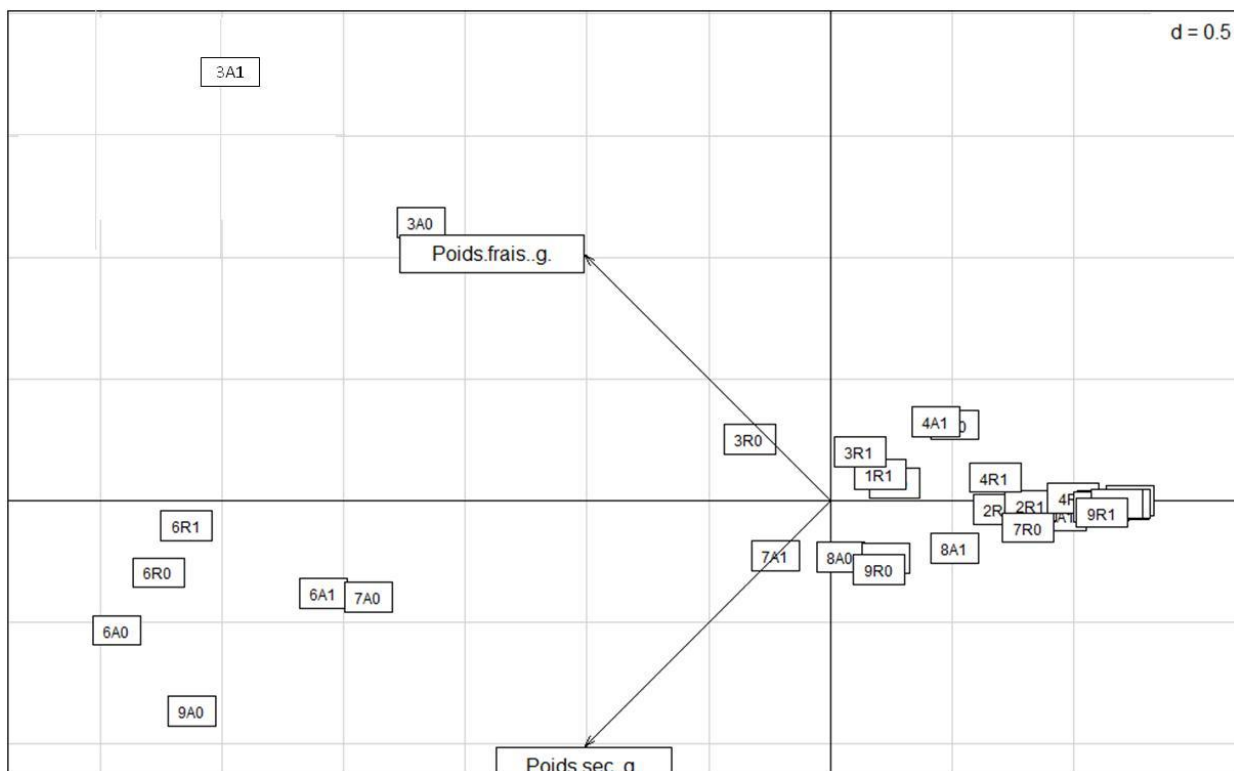


Figure n°30 : Plan factoriel des poids frais et des poids secs en fonction des espèces, des parties de la plante et de la symbiose mycorhizienne

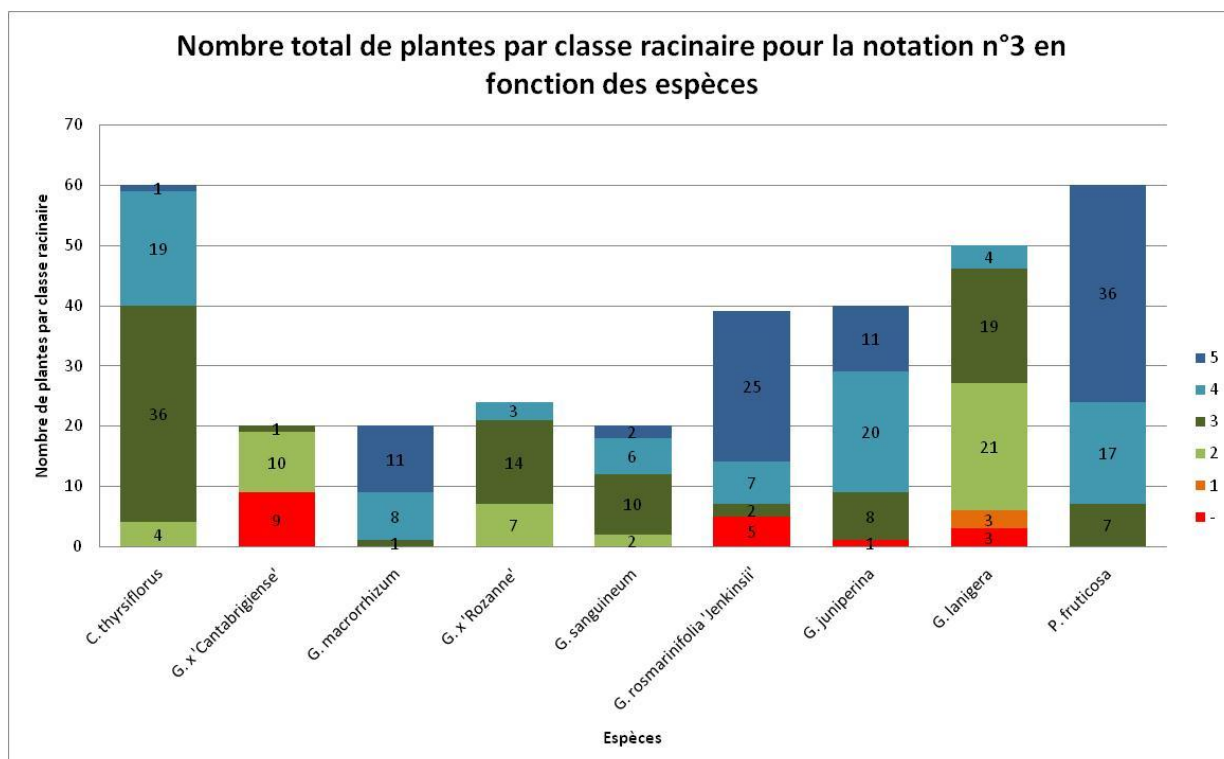


Figure n°31 : Graphique du nombre total de plantes par classe racinaire pour la notation n°3 en fonction des espèces de plantes

Résultats

1. Comparaison du développement et du comportement des plantes

1.1. Poids frais et poids secs sur support perlite avant inoculation au plomb

Une ACP est faite pour les poids frais et secs en fonction des espèces, des parties (racinaire ou aérienne) et de la symbiose mycorhizienne. Le plan F1F2 explique 100% de l'information (91,06% par l'axe F1 et 8,94% par l'axe F2) (Figure n°30). Grâce à cette ACP, des différences entre les espèces sont notées. En effet, le *Geranium macrorrhizum* ainsi que le *Ceanothus thyrsiflorus* seraient différents des autres espèces au niveau de leur poids. Sur la Figure n°30, le *G. macrorrhizum* (3R0=58g, 3A0=127,2g et 3A1=169g) est corrélé positivement au vecteur « Poids frais » alors que le *C. thyrsiflorus* (6R0=68,1g, 6R1=63,3g, 6A0=74,5g et 6A1=58,9g) est corrélé positivement au vecteur « Poids sec ». Les parties aériennes de *G. juniperina* (7A0=56,2g) et de *G. rosmarinifolia* 'Jenkinsii' (9A0=74,8g) non mycorhizés font partie du même groupe que les céanothes.

Les autres espèces de plantes se regroupent sous une seule zone qui présente les mêmes caractéristiques. La symbiose mycorhizienne et les différentes parties de la plante ne permettent pas la création de groupes bien distincts. En effet, la symbiose mycorhizienne n'a pas d'effet significatif sur les poids frais et les poids secs permettant la création de deux groupes bien distincts : les plantes « non mycorhizées » et les plantes « mycorhizées ». De plus, aucune différence significative n'est observée entre les parties racinaires et aériennes en fonction des poids frais et des poids secs. Cependant, certaines espèces se détachent des autres en fonction des poids secs et des poids frais comme par exemple le *G. macrorrhizum* et le *C. thyrsiflorus*. De plus, le *G. macrorrhizum* est à part des trois espèces de géraniums.

1.2. Classes racinaires

Trois notations de classes racinaires sont réalisées entre le rempotage des plantes et avant la mise en place de l'essai sur sol pollué. Le test du X^2 est utilisé pour comparer les classes racinaires en fonction des espèces et de la présence ou non de symbiose mycorhizienne sur chaque notation.

Les résultats obtenus pour les trois séries de notation montrent des différences significatives entre les espèces au niveau de leurs classes racinaires. En effet, les p-values pour les trois notations sont inférieures à $2,2 \cdot 10^{-6}$. Des différences significatives étant observées pour les trois notations, seuls les résultats de la troisième notation sont représentés (Figure n°31). Le facteur « espèces » n'a pas d'effet significatif sur les classes racinaires et sur le développement des racines des plantes.

Pour ce qui est de l'influence de la symbiose mycorhizienne, des différences significatives sont constatées au niveau des classes racinaires pour les deux premières notations. La première notation donne une p-value égale à 0,043 ($<0,05$) et la deuxième notation une p-value égale à 0,0015 ($<0,05$). Par contre, pour la troisième notation, aucune différence significative n'est observée (p-value=0,26 $>0,05$). Dans ce cas, seules la deuxième et la troisième notation sont représentées graphiquement (Figures n°32 et 33). L'apport de champignons mycorhiziens semble jouer un rôle sur le développement des racines uniquement lors des premiers mois après le rempotage.

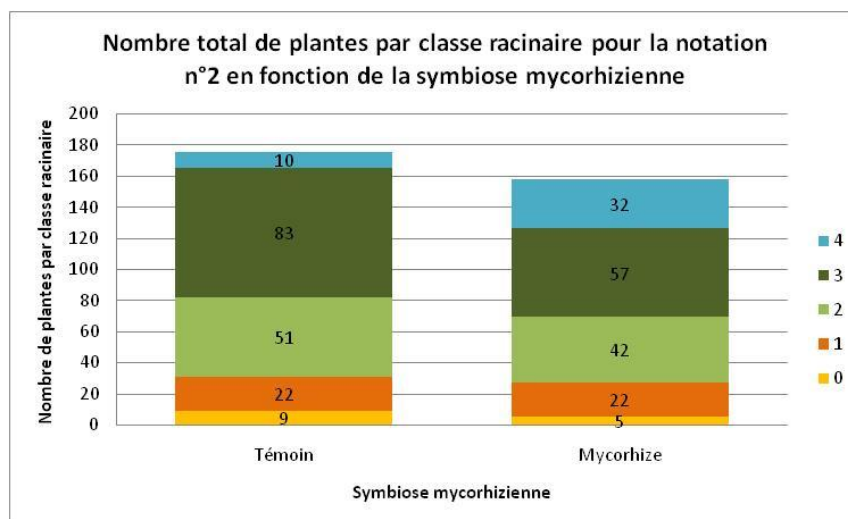


Figure n°32 : Graphique du nombre total de plantes par classe racinaire pour la notation n°2 en fonction de la symbiose mycorhizienne des plantes

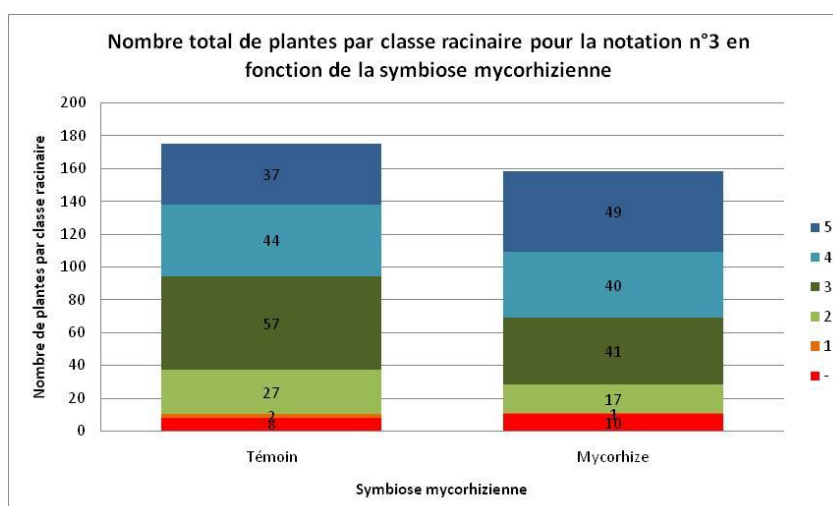


Figure n°33 : Graphique du nombre total de plantes par classe racinaire pour la notation n°3 en fonction de la symbiose mycorhizienne des plantes

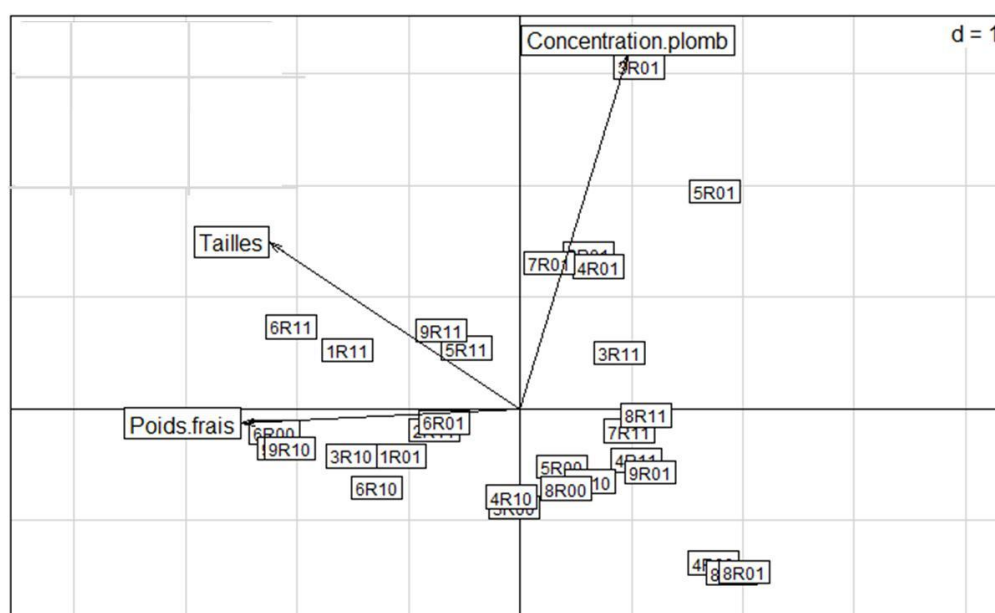


Figure n°34 : Plan factoriel des tailles, des poids frais et des concentrations en plomb en fonction de la partie racinaire des espèces, de la symbiose mycorhizienne et de la présence ou l'absence de plomb

2. Observations des plantes après inoculation au plomb

Les parties racinaires et les parties aériennes sont analysées séparément par des ACP en fonction du poids frais, de la taille et de la concentration en plomb retrouvée dans les plantes. En effet, il faut rappeler ici que seule la partie racinaire capte le plomb contrairement à la partie aérienne. Les processus de captation du plomb ne sont pas les mêmes entre ces deux parties.

2.1. Partie racinaire

Une ACP de la concentration en plomb, de la taille et du poids frais est effectuée en fonction des parties racinaires des plantes mycorhizées ou non. Le plan F1F2 explique 88,86% de l'information (54,54% par l'axe F1 et 34,32% par l'axe F2) (Figure n°34).

L'analyse de l'ACP montre que pour les parties racinaires, les tailles et les poids frais sont corrélés positivement alors que la concentration en plomb dans les parties racinaires n'est pas corrélée au poids frais ou à la taille.

Quatre espèces de plantes mycorhizées et en présence de plomb se détachent et sont corrélées positivement au vecteur « Tailles ». Il s'agit de *G. sanguineum* (1R11=57 cm), de *P. fruticosa* (5R11=57 cm), de *C. thyrsiflorus* (6R11=60 cm) et de *G. rosmarinifolia* 'Jenkinsii' (9R11=50 cm). Un autre groupe de cinq espèces de plantes non mycorhizées en présence de plomb est corrélé positivement au vecteur « Concentration en plomb ». Les cinq espèces sont *G. x 'Rozanne'* (2R01=354 mg/kg), *G. macrorrhizum* (3R01=671 mg/kg), *G. x 'Cantabrigiense'* (4R01=388 mg/kg), *P. fruticosa* (5R01=526 mg/kg) et *G. juniperina* (7R01=314 mg/kg) (Figure n°35). Cependant, outre les groupes décrits précédemment, aucun groupe pour les autres plantes bien distinct et homogène n'est observé en fonction du poids frais, de la taille et de la concentration en plomb.

A première vue, l'ajout de champignons mycorhiziens n'a pas d'influence sur la captation du plomb. En théorie, des concentrations équivalentes auraient dû être retrouvées dans les parties racinaires des plantes « non mycorhizées » et des plantes « mycorhizées ».

2.2. Partie aérienne

Une ACP de la concentration en plomb, de la taille et du poids frais est effectuée en fonction des parties aériennes des plantes mycorhizées ou non. Le plan F1F2 explique 79,11% de l'information (52,46% par l'axe F1 et 26,66% par l'axe F2) (Figure n°36).

L'analyse de l'ACP montre que pour les parties aériennes, la taille, le poids frais et la concentration en plomb ne sont aucunement corrélés. Le Tableau n°5 montre bien que les concentrations en plomb retrouvées sont supérieures dans les parties racinaires par rapport aux parties aériennes alors que les poids frais sont inférieurs pour les parties racinaires. Le fait que la concentration en plomb dans les parties aériennes est nettement inférieure à celle observée dans les parties racinaires corrobore les résultats obtenus par d'autres auteurs dans la bibliographie.

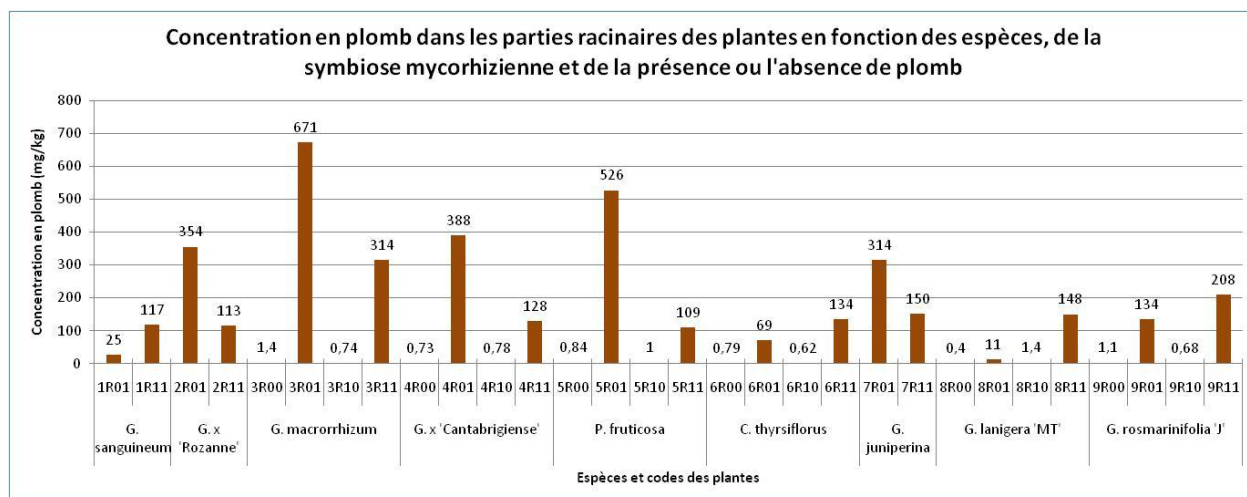


Figure n°35 : Graphique des concentrations en plomb dans les parties racinaires des espèces en fonction de la symbiose mycorhizienne et de la présence ou l'absence de plomb (cf. codes page 22)

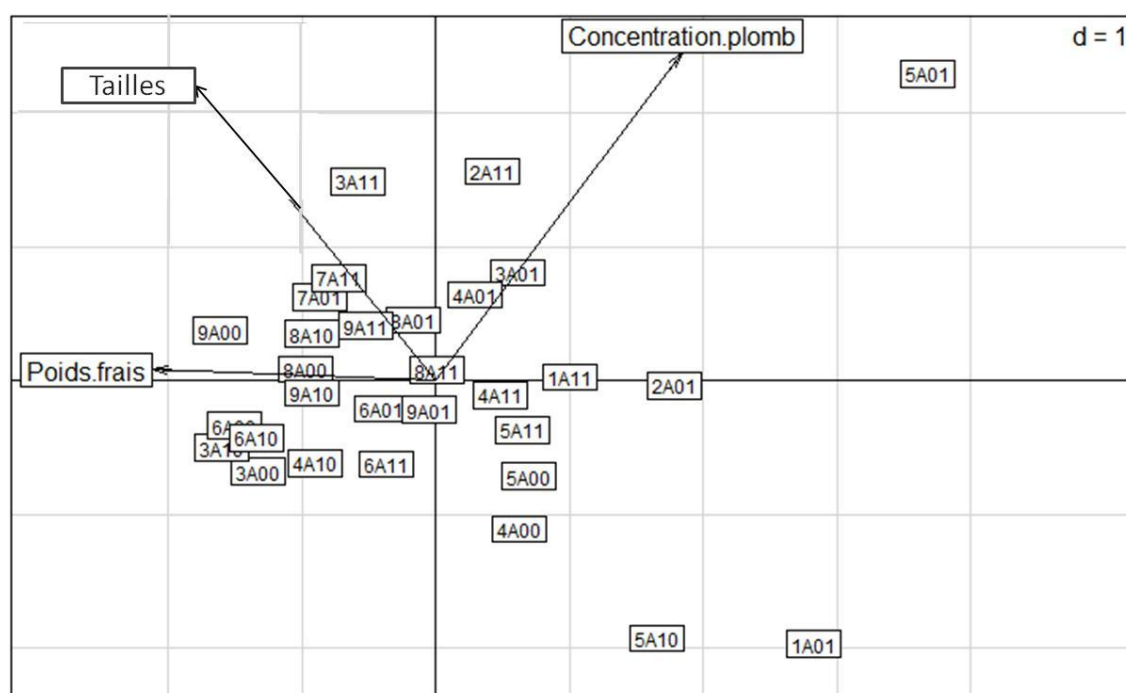


Figure n°36 : Plan factoriel des tailles, des poids frais et des concentrations en plomb en fonction de la partie aérienne des espèces, de la symbiose mycorhizienne et de la présence ou l'absence de plomb

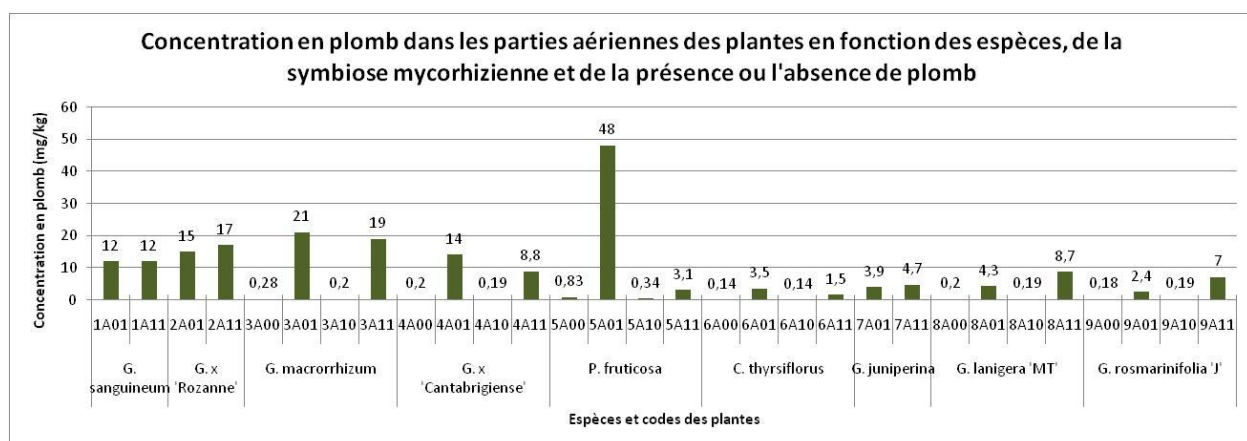


Figure n°37 : Graphique des concentrations en plomb dans les parties aériennes des espèces en fonction de la symbiose mycorhizienne et de la présence ou l'absence de plomb (cf. codes page 22)

Trois espèces de plantes mycorhizées ou non en présence de plomb forme un groupe corrélé positivement au vecteur « Concentration en plomb ». Il s'agit de *P. fruticosa* (5A01=48 mg/kg), *G. macrorrhizum* (3A01=21 mg/kg), *G. x 'Cantabrigiense'* (4A01=14 mg/kg) et de *G. x 'Rozanne'* mycorhizé (2A11=17 mg/kg) (Figure n°37). L'espèce *P. fruticosa* est corrélée négativement au vecteur « Taille » qu'elle soit mycorhizée ou non, ou en présence de plomb ou non avec des tailles variant de 30 à 45 cm. La partie aérienne de *G. sanguineum* non mycorhizé avec plomb est aussi corrélée négativement au vecteur « Taille » (1A01=20).

Comme pour les parties racinaires, aucun groupe homogène des autres plantes n'est formé en fonction des espèces ou de la symbiose mycorhizienne.

Au niveau des concentrations en plomb, il est constaté le même profil pour les parties racinaires et les parties aériennes. Les concentrations en plomb dans les différentes parties de la plante sont plus élevées pour des plantes « non mycorhizées » que pour des plantes « mycorhizées » (Tableau n°5).

Des résultats sur la concentration en plomb sont aussi obtenus par l'ASTREDHOR Grand-Est grâce à des ANOVA à deux facteurs : les variétés et la symbiose mycorhizienne. Lors de l'analyse, les parties aérienne et racinaire sont séparées. Seul le facteur « espèces » est ressorti avec des concentrations maximales en plomb plus élevées pour *Geranium endressii* 'Wargrave Pink' (0,335 mg/kg), *Geranium phaeum* 'Sandor' (0,259 mg/kg) et *Geranium himalayense* (0,204 mg/kg).

3. Observations microscopiques

Les observations microscopiques permettent de montrer que les plantes ayant subi un apport de champignons mycorhiziens lors du rempotage présentent toutes des filaments mycéliens. Cependant, il est surprenant d'observer des filaments sur les plantes n'ayant pas reçu de champignons mycorhiziens même si ces derniers restent en quantité très inférieure. Deux espèces se détachent des autres, les potentilles et les eucalyptus. En effet, de nombreux filaments, vésicules et arbuscules sont notés sur les racines de ces plantes. De ce fait, la contamination par le plomb n'altère pas la symbiose mycorhizienne. Les Figures n°38A et 38B présentent des filaments de champignons endomycorhiziens, la Figure n°38C des vésicules de *E. gundal* Clone 645, la Figure n°38D des arbuscules de *E. gundal* Clone 645, la Figure n°38E des vésicules de *P. fruticosa*, la Figure n°38F des arbuscules de *P. fruticosa*.

4. Analyse du plomb dans les supports de culture

4.1. Sur perlite

Aucune trace de plomb n'est obtenue dans la perlite non contaminée.

En présence de plantes, des concentrations variant de 115 à 399 mg de plomb par kg de perlite sèche sont mesurées après l'inoculation au plomb faite 2 mois avant le prélèvement (Tableau n°6). Aucune différence n'est constatée entre une perlite ayant ou non reçu des plantes biotisées.

Tableau n°5 : Minimums, moyennes et maximums des poids frais, des tailles, des concentrations en plomb en fonction des parties racinaire ou aérienne des plantes

	Partie racinaire			Partie aérienne		
	Poids frais (g)	Tailles (cm)	[plomb] (mg/kg)	Poids frais (g)	Tailles (cm)	[plomb] (mg/kg)
Minimum	5,5	24	0,4	8,1	20	0,14
Moyenne	49,59	43,2	130,78	136,05	45,6	6,966
Maximum	115,5	60	671	320,7	56	48

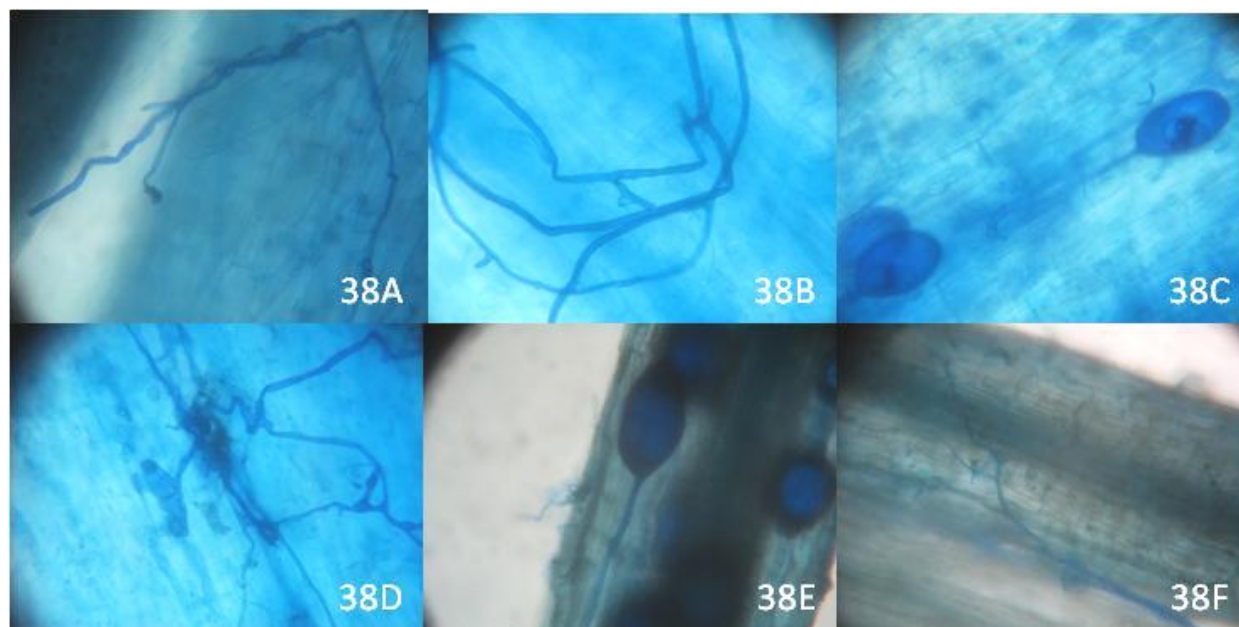


Figure n°38 : Photographies des observations microscopiques (x40) des racines pour déterminer l'état de la symbiose mycorhizienne (38A : Hyphe fongique, 38B : Hyphe fongique, 38C : Vésicules et hyphe fongique, 38D : Arbuscule fongique intra-cellulaire, 38E : Vésicules et hyphes fongiques et 38F : Arbuscule fongique)
(Sourzat, 2016, ASTREDHOR Sud-Ouest)

Tableau n°6 : Concentrations en plomb dans les perlites en fonction des espèces mises en place et de la symbiose mycorhizienne

Espèce	Symbiose mycorhizienne	Concentration en plomb (mg/kg)
<i>G. macrorrhizum</i>	Témoin non mycorhizé	140
<i>G. macrorrhizum</i>	Mycorhizé	177
<i>G. rosmarinifolia</i> 'Jenkinsii'	Témoin non mycorhizé	399
<i>G. rosmarinifolia</i> 'Jenkinsii'	Mycorhizé	115

4.2. Sur sol pollué

4.2.1. Dosage du plomb sur les trois prélèvements réalisés sur le site pollué

Lors des trois prélèvements réalisés, il est constaté des différences de teneurs en plomb. En effet, les valeurs varient de 99 mg/kg à 1300 mg/kg sur une surface de 20 m². Ce résultat est surprenant, mais peut être expliqué du fait de la présence de la décharge qui affleure au niveau de la zone de prélèvement la plus contaminée. Par ailleurs, six autres éléments-traces métalliques sont analysés. Il est constaté des doses très importantes de ces ETM (Annexes n°VI, VII et VIII).

Il faut signaler ici que le sol qui sert à notre expérimentation est constitué d'un mélange des trois zones de prélèvement et est en cours d'analyse afin d'avoir une concentration de la matrice expérimentale.

4.2.2. Dosage du plomb sur le prélèvement réalisé sur le site de la station

Pour rappel, il s'agit du sol témoin. Les analyses réalisées sur ce sol montrent des teneurs en plomb très faibles de l'ordre de 25 mg/kg. Pour ce qui est des autres ETM, les concentrations sont aussi très faibles (Annexe n°IX).

4.2.3. Analyse de terre des mélanges expérimentaux

Chaque type de sol est mélangé avec un tiers de terre végétale et ce sont ces mélanges qui sont analysés. Dans les deux cas, l'analyse permet de dire que chaque type de sol est composé de limons et de limons sableux donnant un même pH (6,9). Ces différents mélanges ont une teneur totale en azote faible, du phosphore et du potassium en quantités identiques. La matière organique dans les deux cas est élevée à très élevée. Ces différents éléments permettent de conclure que les matrices sol utilisées (pollué ou non) possèdent des caractéristiques assez proches (Annexes n°X et XI).

Discussion

1. Analyse de l'efficacité de la plante pour la phytoremédiation

1.1. Mise en place

1.1.1. Dispositif et support de culture

La mise en place des dispositifs expérimentaux est très simple grâce aux bacs lysimétriques.

La seule difficulté s'est produite lors de la préparation du sol pollué. En effet, ce sol possède une battance très élevée le rendant très dur lorsqu'il est sec d'où la nécessité de casser les mottes et de les trier avant d'implanter les plantes. Comme tout travail en agriculture, il sera nécessaire de travailler le sol pour la mise en place d'un procédé de phytoremédiation (travail mécanique, ajout de matières organiques, fertilisation et irrigation).

La limite des deux essais mis en place avec perlite ou avec sol pollué est que ces supports ne sont pas représentatifs d'un sol d'un site pollué où les concentrations en polluants peuvent varier à la surface et en profondeur du sol. A quelques distances, les plantes peuvent réagir différemment aux polluants en fonction de leur concentration.

L'objectif de l'essai reste en priorité de savoir si les plantes peuvent être candidates pour la phytoremédiation en résistant au sol pollué et si elles peuvent capter le plomb.



Figure n°39 : Photographies des symptômes provoqués par des ravageurs (39A : Symptômes provoqués par des cochenilles sur *C. thysiflorus*, 39B : *Pseudococcus sp.* (la cochenille farineuse), 39C : Symptômes provoqués par des thrips sur *G. sanguineum* et 39D : *Frankliniella occidentalis* (le thrips californien)
(Sourzat/ASTREDHOR Sud-Ouest, 2016, ASTREDHOR Sud-Ouest)

1.1.2. Préparation des plantes

La préparation et la sélection des plantes avant leur mise en place doivent être faites avec attention afin qu'elles puissent être assez développées et robustes pour une meilleure adaptation à des sols difficiles.

L'itinéraire de culture en serre doit être établi et permettre une production homogène des plantes pour le producteur.

1.2. Entretien

Pour qu'un procédé de phytoremédiation fonctionne, il ne suffit pas d'implanter des plantes et de les laisser se développer. Il est nécessaire de les entretenir avec un arrosage adapté aux conditions météorologiques, de leur apporter de l'engrais, d'éventuellement les tailler et de leur apporter des moyens de lutte contre les bioagresseurs.

En effet, pour l'essai sur perlite, de nombreuses plantes ont été perdues à cause de la présence de bioagresseurs, plus précisément des ravageurs ou des maladies. Les céanothos ont été très touchés par les cochenilles ce qui a nécessité des interventions en lutte chimique (Figures n°39A et n°39B). Les grandes populations de cochenilles ont limité l'efficacité et l'utilisation de produits phytopharmaceutiques. Dans leur développement, les géraniums ont été gênés par la présence d'oïdium et de thrips (Figures n°39C et 39D). Des moyens de lutte chimique ont été utilisés en conditions expérimentales en serre mais sur le terrain, les choix devront plus se tourner vers des méthodes biologiques plus respectueuses de l'environnement. Le but n'est pas non plus d'aggraver la qualité du sol par l'apport de produits phytosanitaires.

En préventif, afin d'éviter l'arrivée massive de bioagresseurs, l'état sanitaire des plantes devra être surveillé. L'apport de fertilisants et de matières organiques est nécessaire, il permet d'aider la plante à se mettre en place et à s'adapter face à un environnement pouvant être difficile, mais aussi d'épauler les différents processus de phytoremédiation : il s'agit de la phytoremédiation aidée (Selecdepol, 2013).

1.3. Efficacité des plantes à dépolluer

L'interprétation des résultats concernant la concentration en plomb dans les différentes parties des plantes est à relativiser. En effet, aucune répétition des échantillons n'est faite. Les résultats ne sont pas forcément représentatifs de la réalité et pour les prochains essais, il est nécessaire de prélever plusieurs échantillons par modalité.

1.3.1. Choix des plantes

Les plantes choisies pour l'expérimentation apparaissent intéressantes pour la phytoremédiation car aucun symptôme de phytotoxicité n'est observé. Des concentrations en plomb de l'ordre de la centaine de mg par kg de poids sec sont notées. Au niveau de l'efficacité des plantes dans la phytoremédiation, le procédé concerné par la dépollution du plomb pourrait être la phytostabilisation, plus que la rhizofiltration ou la phytoextraction.

Etant donné que le plomb a tendance à se fixer sur les parois cellulaires des racines, le déplacement du plomb dans la plante vers les parties aériennes reste faible. La concentration moyenne de plomb retrouvé dans les parties racinaires des plantes est de tout de même de 130,78 mg/kg de poids sec contre 6,966 mg/kg de poids sec pour les parties aériennes.

Pour savoir s'il s'agit d'un processus de phytostabilisation, il faudrait utiliser un autre procédé permettant de quantifier le plomb présent à l'extérieur et à l'intérieur de la racine.

Le *G. macrorrhizum* se détache des autres espèces avec la concentration en plomb la plus élevée de 671 mg/kg de poids sec pour sa partie racinaire non mycorhizée et 314 mg/kg de poids sec pour sa partie racinaire mycorhizée.

Le *Ceanothus thyrsiflorus* a des poids secs plus élevés ainsi que les parties aériennes de *Grevillea juniperina* et de *Grevillea rosmarinifolia* 'Jenkinsii'. Ces plantes présenteraient donc plus de matière sèche que les autres plantes.

Malheureusement ces derniers captent beaucoup moins de plomb que les espèces du genre *Geranium*.

Cette observation est à prendre en considération dans le choix des espèces. Sur 1 m², il est possible de mettre plus de géraniums que de grévillées, rendant le procédé de phytoremédiation par les géraniums plus intéressant et rentable. Contrairement aux grévillées, la potentille reste une plante concurrentielle face aux géraniums. En effet, elle présente des concentrations en plomb élevées dans les parties racinaires et surtout dans les parties aériennes avec la concentration la plus haute de 48 mg/kg de poids sec.

Les variétés apparaissant comme les plus intéressantes au niveau du développement de leur système racinaire sont *G. rosmarinifolia* 'Jenkinsii', *G. juniperina* et *P. fruticosa* : ce sont toutes des arbustes.

Le choix des plantes est essentiel pour l'entreprise de dépollution mais aussi pour le producteur. En effet, un producteur ne va pas se spécialiser dans des plantes intéressantes pour la phytoremédiation si elles sont difficiles à produire.

Par ailleurs, il est indispensable de considérer la phytoremédiation comme un procédé de dépollution sur le long terme. En fonction du type et de la concentration du polluant, du type de sol et du climat du site pollué, toutes les plantes ne sont pas envisageables et les techniques de phytoremédiation ne seront pas les mêmes. En effet dans le cas d'un site pollué particulièrement au plomb, la technique de phytoremédiation concernée sera surtout la phytostabilisation. La phytostabilisation n'est intéressante que si le végétal reste en place. Pour cela, il est intéressant de travailler sur des espèces et des variétés présentant des qualités de résistance, esthétiques et paysagères.

Au contraire, la phytoextraction nécessite la récolte des plantes afin que lorsque la plante meurt, les polluants ne repartent pas dans le sol. L'objectif n'est pas de récolter la plante et de simplement la traiter, il serait plutôt de la valoriser. Les plantes choisies dans l'essai pourraient être utilisées dans d'autres domaines après la phytoextraction. L'étude faite à Toulouse utilise des pélargoniums odorants dans un objectif de fabrication d'huiles essentielles (Shahid *et al.*, 2011). Une autre valorisation possible est l'utilisation des plantes comme bois de chauffage. En effet, le FCBA a mis en place un projet utilisant des peupliers et des eucalyptus à proximité d'une station d'épuration pour qu'ils soient irrigués par les eaux usées. L'objectif est de mettre en place une technique de filtration des polluants. Le bois récolté est ensuite utilisé dans une chaudière expérimentale où des filtres gardent les polluants dans les cendres et permettent de libérer des émissions dans l'atmosphère avec des seuils très inférieurs aux seuils réglementaires (Gautry et Bailly, 2012).

Enfin un autre usage mais cette fois-ci concernant la récupération des ETM dans les plantes, il s'agit d'un travail fait sur *Thlaspi caerulescens* ayant la capacité de rhizofiltrer ou phytoextraire le zinc et le cadmium (Grisson *et al.*, 2010). Les feuilles récupérées sont déshydratées puis subissent des traitements thermiques et chimiques adaptés pour créer une solution brute de catalyseurs écologiques à partir des métaux extraits. Grâce à la récupération de ces structures catalytiques, il sera possible d'utiliser le processus de phytoextraction dans différentes applications comme la cosmétique, les produits pharmaceutiques ou encore des biopesticides. Une entreprise innovante appelée Stratoz est déjà intéressée par ces utilisations (Grisson, 2013).

1.3.2. Réflexion sur le support « perlite »

Est-ce que le support perlite utilisé lors de cette expérimentation est adapté pour étudier le processus de phytoremédiation ?

En effet lors d'une discussion avec Lilian Marchand, ce dernier a fait part d'une remarque au sujet du support de culture qu'est la perlite. La perlite aurait un fort pouvoir adsorbant des ETM ce qui la rendrait inintéressante dans des expérimentations concernant la phytoremédiation. En effet, elle empêcherait les métaux d'être biodisponibles pour les plantes. Une étude sur la phytoremédiation du cadmium par un eucalyptus a montré que 92% du Cd déposé en solution avaient été adsorbés par la perlite mais il resterait échangeable. Seulement 6% du Cd auraient été captés par les plantes et moins de 1% serait présent en solution (Pietrini *et al.*, 2015).

Cependant, il serait émis l'hypothèse que pendant la période où le Cd est adsorbé par la perlite, la plante aurait la possibilité de l'adsorber aussi grâce à la capacité du Cd à se concentrer dans les racines (Pietrini *et al.*, 2015).

Le choix de la perlite est peut-être inadapté pour cette expérimentation, mais il a été choisi comme un substrat inerte, idéal pour qu'il n'y ait pas d'influence de minéraux ou de nutriments. La perlite étant une roche volcanique siliceuse expansée, elle contient du silicium. Le problème est que le silicium est absorbé par les plantes et il a été démontré qu'il aurait plusieurs effets positifs directs et indirects sur la croissance et le développement de la plante. Le silicium améliorerait la tolérance de la plante à la toxicité des métaux comme l'aluminium, le bore, le cadmium, le manganèse, le zinc et le plomb. Dans le cas d'une étude, l'addition de silicium en élément nutritif dans une solution protège des plantules de coton contre un éventuel stress lié au plomb et diminue l'adsorption ainsi que l'accumulation du plomb dans la plante (Bharwana *et al.*, 2013). Le silicium pourrait donc renforcer les barrières physiques de la plante. Ces phénomènes pourraient expliquer le fait que les plantes n'aient pas eu de symptômes de phytotoxicité face au plomb. Les concentrations en plomb obtenus après analyse et la capacité des plantes à capter le plomb pourraient être sous-estimées. Cependant, des résultats intéressants sont obtenus lors de cet essai. Ces résultats seront infirmés ou confirmés dans l'essai « sol pollué » car normalement ce dernier doit permettre la biodisponibilité des ETM.

2. Analyse de l'efficacité des champignons mycorhiziens

Les observations microscopiques effectuées sur des racines de plantes biotisées ayant été en contact avec le plomb montrent que cet ETM n'altère pas le développement du champignon au sein de la racine. En effet, des structures mycorhiziennes sont observées au sein de la racine.

Les résultats obtenus avec les plantes biotisées montrent que ces dernières captent moins de plomb que les plantes témoins comme par exemple, le *G. x 'Rozanne'*, le *G. macrorrhizum* et la *P. fruticosa* qui ont des concentrations en plomb dans la plante moins élevées que lorsqu'elles sont biotisées. Etant donné que les échantillons n'ont pas été répétés, il n'est pas possible de savoir avec exactitude si la plante est réellement freinée par la présence du champignon lors de la dépollution d'un sol. Ce résultat est surprenant et ne concorde pas avec une étude faite sur le robinier faux-acacia. Les associations mycorhiziennes amélioreraient la tolérance de la plante face aux métaux lourds en lui apportant des éléments nutritifs et en jouant sur le devenir des métaux lourds dans la plante et dans le sol. Les plantes biotisées auraient de plus grandes concentrations de plomb dans les racines que les plantes non biotisées afin de protéger la partie aérienne d'éventuels dommages. Par ailleurs, les structures vésiculaires du champignon endomycorhizien seraient similaires à des vacuoles végétales et fongiques impliquées dans le stockage de composés toxiques. Il a été découvert que le nombre de vésicules augmenterait avec le stress lié à la concentration en plomb ce qui contribuerait à la rétention du plomb dans les racines. Le champignon endomycorhizien jouerait un rôle de filtration ou de séquestration du plomb (Yang *et al.*, 2016).

3. Attentes sur les futurs essais

3.1. Essai sur sol pollué

Dans un premier temps, l'essai mis en place sur sol pollué va permettre de savoir si les plantes sont toujours candidates pour la phytoremédiation. En effet, une liste de plantes résistantes et qui ont le plus capté de plomb pourra être établie. Pour cela, il est nécessaire de prélever plus d'échantillons de plantes permettant d'acquérir des résultats plus représentatifs de la réalité. Par ailleurs, par des analyses plus adaptées, il serait intéressant de savoir si la technique de dépollution concerne la phytostabilisation, la rhizofiltration ou la phytoextraction. Dans ce cas, il faut pouvoir analyser uniquement le plomb à l'intérieur de la plante. Une autre priorité serait de connaître la concentration de polluants dans l'eau interstitielle du sol ce qui permettrait de savoir quelle quantité de polluant est biodisponible pour la plante.

Dans un deuxième temps, suite aux résultats obtenus sur l'essai « perlite », il est nécessaire de vérifier l'intérêt des champignons endomycorhiziens arbusculaires apportés lors du rempotage et voir si les concentrations en plomb sont toujours plus importantes pour des plantes non biotisées. Dans ce cas, il est important de connaître quel rôle joue le champignon dans la dépollution du sol. En effet, il faudrait être sûr que la symbiose mycorhizienne ne soit pas un frein dans la dépollution ou que le résultat obtenu dans le cas de la perlite ne soit tout simplement pas représentatif de la réalité. Et enfin, est-ce que l'apport de champignons ectomycorhiziens associé à des champignons endomycorhiziens apportés lors de la plantation sur sol pollué peut conduire à un meilleur développement des plantes et à une meilleure capacité à capter les polluants ?

Dans un troisième temps, l'essai sur les plantes placées dans les bacs contenant le sol pollué en milieu extérieur peut permettre de donner un premier aperçu et des informations supplémentaires sur la réaction des plantes face à des conditions biotiques et abiotiques différentes de celles placées dans la serre.



Figure n°40 : Photographie de l'essai mis en place par Bordeaux Métropole
(Sourzat, Août 2016, sous le Pont Chaban-Delmas à Bordeaux)

3.2. Essai sur site pollué

En fonction des plantes choisies, cet essai permettra d'observer comment ces plantes réagissent face à d'éventuelles différences de concentration en polluants réparties de façon aléatoire sur le site pollué. Enfin, il sera possible de se rendre compte de la préparation et de l'entretien des plantes pour que le processus fonctionne puis de déterminer tous les coûts de la mise en place jusqu'à la fin du procédé de dépollution. Dans ce cas, une mise en application sur site pollué permettra l'utilisation d'un nombre plus important de plantes pour valider le procédé de dépollution.

4. Aspect social de la phytoremédiation

L'aspect social compte aussi beaucoup dans le choix et la réussite de cette technique de dépollution.

D'une part, aujourd'hui, les propriétaires préfèrent laisser des sites pollués en friche jusqu'à ce qu'ils soient forcés d'agir à cause de l'intervention d'une tierce personne. Il est essentiel que les propriétaires reconnaissent que leur site est pollué et qu'il nécessite une intervention extérieure.

Ce sujet reste délicat à aborder avec les exploitants car de nombreuses responsabilités et décisions sont en jeu. Il faudrait les sensibiliser face à ce problème et leur montrer que cette pollution peut entraîner des risques pour le monde vivant et l'environnement. Ils pensent seulement à l'investissement économique qu'une dépollution entrainerait et pas à une éventuelle valorisation de leur site.

D'autre part, les entreprises de dépollution doivent changer leur vision sur la phytoremédiation. La mise en place de cette technique à moindre coût ne devrait pas les freiner.

L'inintérêt des propriétaires et des entreprises de dépollution pour la phytoremédiation pourrait empêcher la valorisation d'espaces inoccupés en ville. Un exemple d'essai au Parc aux Angéliques à Bordeaux sur un site en friche industrielle a permis la mise en place d'une luzerne et de peupliers créant un espace végétalisé ouvert au public (Marchand *et al.*, 2015) (Figure n°40). Il est intéressant de voir que les friches industrielles peuvent être exploitées et utilisées par les habitants, non laissées à l'abandon et fermées au public.

Outre le manque d'essais, la phytoremédiation n'est encore que très peu utilisée comme une véritable technique de dépollution. Le manque d'informations, les coûts de mise en place encore mal déterminés et la durée du procédé sont des freins majeurs pour les entreprises de dépollution et les propriétaires de sites pollués.

Conclusion et perspectives

Les études sur les procédés de dépollution d'un sol contaminé, à l'aide de plantes ornementales associées ou non à des microorganismes sont longues, mais essentielles, pour que la phytoremédiation soit utilisée et efficace en conditions réelles.

Au regard des premiers résultats, les plantes choisies après une étude bibliographique, apparaissent être de bonnes candidates pour la phytoremédiation. Elles peuvent se développer sur un support contaminé au plomb et capter dans leurs parties aériennes et racinaires des concentrations de cet ETM de l'ordre de la dizaine à la centaine de mg/kg. A ce jour, *G. macrorrhizum* et *P. fruticosa* semblent être les plantes les plus adaptées à capter le plomb par rapport aux autres. Dans la globalité, les grévillées et les céanotes sont les moins intéressants car ils prélèvent moins de plomb et nécessitent une densité de plantation moindre par rapport aux géraniums.

La symbiose mycorhizienne n'a pas montré d'effet et d'intérêt significatifs sur le procédé de phytoremédiation. Contrairement à ce résultat, d'autres études ont confirmé leur utilité dans le développement et la croissance des plantes ainsi que dans la dépollution des sols. Pour l'essai sur sol pollué, il est vraiment nécessaire d'analyser plus précisément les racines en séparant les métaux situés à leur surface ou à l'intérieur. La difficulté de la phytoremédiation est qu'il faut prendre en compte toutes les caractéristiques d'un environnement : le climat, le sol, le type de polluant et leur quantité, la mise en place, l'entretien et le devenir des végétaux.

Les résultats de cette étude sont à interpréter avec recul car aucune répétition d'échantillons n'a été faite pour le dosage du plomb dans les plantes. De plus, le choix de la perlite comme support a pu aussi amené à sous-estimer les concentrations en plomb retrouvées dans les plantes. Les données risquent de ne pas être représentatives de la réalité.

La compilation de tous les résultats obtenus à partir des trois essais (sur perlite, sur sol pollué et sur site pollué) permettra de connaître les plantes les plus efficaces dans le processus de phytoremédiation. Par ailleurs, la présence et l'abondance de certaines espèces végétales sur des sites pollués identifiés peuvent donner des informations sur la possibilité qu'ont ces plantes à s'installer sur des lieux peu propices à leur développement et de ce fait d'en caractériser le peuplement végétal. De cette analyse, il est possible de faire émerger soit des plantes d'intérêt local (végétaux d'origine locale) soit de se rapprocher de ces familles botaniques et de trouver des espèces ornementales proches pouvant être utilisées dans la dépollution du sol. Cette prospection permettra d'exploiter certaines de ces plantes locales et de les multiplier pour dépolluer les sols.

A terme, une gamme de plantes spécialisées dans la phytoremédiation pourrait être proposée pour les producteurs et les paysagistes. Elle permettrait de valoriser leur production et de créer une nouvelle filière adaptée à cette technique de dépollution plus respectueuse de l'environnement et pourquoi pas la création d'activités nouvelles.

Références bibliographiques

1. Bibliographie

- Arshad M. et al. (2008). A field study of lead phytoextraction by various scented Pelargonium cultivars. *Chemosphere*, 71(11):2187-2192.
- Bainard L. D., Klironomos J. N. et Gordon A. M. (2011). The mycorrhizal status and colonization of 26 tree species growing in urban and rural environments. *Mycorrhiza*, 21:91-96.
- Baize D. (2006). Tout ce qu'il faut savoir. In: Les Elements Traces Métalliques (ETM) dans les sols. Poitiers, pp. 1-28.
- Ben Ghnaya et al. (2006). Phytoremédiation : apport de la sélection in vitro pour l'obtention de Colza (*Brassica napus* L.) tolérant aux métaux toxiques. *Geo-Eco-Trop*, 30.2:69-86.
- Bert V. (2012). Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués: Etat de l'art et guide de mise en oeuvre. EDP Sciences, ADEME, Paris, 86 p.
- Bert V. et al. (2014). Sumatecs : Gestion durable des sols contaminés par les éléments traces : état de l'art et besoins de recherche. In: Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, Paris, octobre 2009, pp. NC.
- Bharwana SA et al. (2013). Alleviation of Lead Toxicity by Silicon is Related to Elevated Photosynthesis, Antioxidant Enzymes Suppressed Lead Uptake and Oxidative Stress in Cotton. *Journal of Bioremediation et Biodegradation*, 4(4):187.
- Cadière F. (2012). Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et des eaux souterraines pollués en France. Angers : ADEME, 2010. 114 p. Rapport final.
- Cecchi M. (2008). Devenir du plomb dans le système sol-plante, Cas d'un sol contaminé par une usine de recyclage du plomb et de deux plantes potagères (Fève et Tomate). Doctorat Sciences Ecologiques Vétérinaires Agronomiques et Bioingénieries, INP, Toulouse, 214 p.
- Centre National De La Recherche Scientifique. Utilisation de certaines plantes accumulatrices de manganèse pour la mise en œuvre de réactions de chimie organique. France, WO2014016509 A1. 30/01/2014.
- Chaney R. L. et al. (1997). Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 8(3):279-284.
- Colombano S. et al. (2010). Quelles techniques pour quels traitements – Analyse coûts-bénéfices. BRGM. 399 p. Rapport final BRGM/RP – 58609 – FR.
- Dadrasnia A., Shahsavari N. et Emenike C. U. (2013). Remediation of Contaminated Sites. In: Hydrocarbon. Kutcherov V. et Kolesnikov A., Physical and Theoretical Chemistry, Intech, pp.65-82.
- Daniel V. N., Nanven N. D. et Daniang I. E. (2012). The Potentials of *Eucalyptus camaldulensis* for the Phytextraction of Six Heavy Metals in Tin – mined Soils of Bakin Ladi L.G.A. of Plateau State, Nigeria. *International Journal of Engineering Research and Application*, 2(2):346-349.

- Echevarria G. et al. (2012). Phytoextraction des éléments en traces métalliques par les plantes hyperaccumulatrices (As, Cd, Ni et Zn). In: Phytotechnologies appliquées aux sites pollués. ADEME, Paris, pp. 12-17.
- Evangelou M. W.H. et al. (2015). Phytomanagement : Phytoremediation and the Production of Biomass for Economic Revenue on Contaminated Land. *Phytoremediation : Management of Environmental Contaminants*, 1:115-131.
- Fortin J. A., Plenchette C. et Piché Y. (2008). Les mycorhizes : La nouvelle révolution verte. Editions Multimondes, Québec, 138 p.
- Garbaye J. (2013). La symbiose mycorhizienne : Une association entre les plantes et les champignons. Editions Quae, Synthèses, Nancy, 251 p.
- Gautry J.-Y. et Bailly A. (2012). Phytoremédiation et phytoépuration : de nouvelles perspectives pour les taillis à courts rotations. FCBA INFO, Champs-sur-Marne. 15 p.
- Gomes M. P. (2012). Anatomical characteristics and nutrient uptake and distribution associated with the Cd-phytoremediation capacity of *Eucalyptus camaldulenses* Dehn. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(3):481-495.
- Grisson C. (2013). Quand la phytoextraction donne naissance à des éco-catalyseurs. *Green News Techno*, 118:5.
- Grisson C. et al. (2010). *Thlaspi caerulescens*, un indicateur de la pollution du sol ?. *L'actualité chimique*, 340:27-32.
- Hamel C. et Plenchette C. (2007). Extraradical Arbuscular Mycorrhizal Mycelia : Shadowy Figures in the Soil. In: *Mycorrhizae in Crop Production*. The Haworth Food & Agricultural Products Press Inc, New-York, 319 p.
- Hildebrandt U., Regvar M. et Bothe H. (2007). Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. *Phytochemistry*, 68(1):139-146.
- Jadia C. D. et Fulekar M. H. (2009). Phytoremediation of heavy metals : Recent techniques. *African Journal of Biotechnology*, 8(6):921-928.
- Jaffré et al. (1976). *Sebertia acuminata* : A Hyperaccumulator of Nickel from New Caledonia. *Science*, 193(4253):579-580.
- Küpper H. et al. (2001). Cellular compartmentation of nickel in the hyperaccumulators *Alyssum lesbiacum*, *Alyssum bertolonii* and *Thlaspi goesingense*. *Journal of Experimentation Botany*, 52(365):2291-2300.
- Langlois A. (2012). Mycorhization et micor-organismes : leurs rôles dans la biotisation des substrats en horticulture ornementale. In: 4^e journée scientifique du grand réseau de recherche VASI, Mont-Saint-Aignan, octobre 2012, pp.1-3.
- Laperche V. et al. (2004). Guide méthodologique du plomb, appliqué à la gestion des sites et sols pollués. Orléans (FR) : BRGM. 136p. Rapport d'études n° BRGM/RP-52881-FR.
- Lesquel E. (2009). La phytoremédiation, un procédé prometteur. *La Gazette*, 7 décembre 2009:42-44.

- Mahdiah M, Yazdani M. et Mahdiah S. (2013). The high potential of *Pelargonium roseum* plant for phytoremediation of heavy metals. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(9):7877-7881.
- Marchand L. et al. (2015). Plant responses to a phytomanaged urban technosol contaminated by trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(4):3120-3135.
- Moreau S. (2013). Basol: un panorama des sites et sols pollués, ou potentiellement pollués, nécessitant une action des pouvoirs publics. La Défense (FR) : Commissariat général au développement durable. 40 p. Rapport d'études n°97.
- Morel J.-L. (2012). Phytoremédiation des sols contaminés. In: La chimie et la nature. Amouroux J. ed., EDP Sciences, Les Ulis, pp. 157-185.
- Morel P., Poncet L. et Rivière L.-M. (2000). Perlite. In: Les supports de cultures horticoles. Inra, Paris, pp. 70-71.
- Pietrini F. et al. (2015). Phytoremediation of cadmium polluted waters by a eucalypt hybrid clone : a mesocosm study. In: e-proceedings of the 6th European Bioremediation Conference Chania, Crete, Greece, 29 juin-2 juillet 2015, pp. 238-241.
- Qiu R. et al. (2006). Zinc hyperaccumulation and uptake by *Potentilla griffithii* Hook. *International Journal of Phytoremediation*, 8(4):299-310.
- Rabier J. et al. (2007). Characterization of Metal Tolerance and Accumulation in *Grevillea exul* VAR Exul. *International Journal of Phytoremediation*, 9:419-435.
- Sameera O. B. (2008). Contribution of Mycorrhizae in Phytoremediation of Lead Contaminated Soils by *Eucalyptus rostrata* Plants. *World Applied Sciences Journal*, 5(4):490-498.
- Sarma H. (2011). Metal Hyperaccumulation in Plants : A Review Focusing on Phytoremediation Technology. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4(2):118-138.
- Shahid M. et al. (2011). Long-term field metal extraction by *Pelargonium* : phytoextraction efficiency in relation to plant maturity. *International Journal of Phytoremediation*, 14:493-505.
- Strullu-Derrien C. et Strullu D.-G. (2007). Mycorrhization of fossil and living plants. *Comptes Rendus Palevol*, 6(6-7):483-494.
- Tremel-Schaub A. et Feix I. (2005). Contamination des sols : Transferts des sols vers les plantes. ADEME Editions, EDP Sciences, Angers, 148 p.
- Van de Maele P. (2011). Le savoir-faire français dans le domaine de la dépollution des sols et des eaux souterraines. ADEME, Paris, 16 p.
- Van der Ent A. et al. (2013). Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements : Facts and fiction. *Plant Soil*, 362:319-334.
- Yang Y. et al. (2016). The roles of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in phytoremediation and tree-herb interactions in Pb contaminated soil. *Scientific Reports*, 6(20469):14.
- Young S. et al. (2015). A handbook for developers, builders and project applicants. Hayward (USA): Cleanwater Program, 135 p. C.3 Stormwater Technical Guidance.

2. Sitographie

Agence Nationale De La Recherche (2006). Suivi-bilan. http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/resumes-des-projets-finances/?tx_solr%5Bq%5D=phytorem%C3%A9diation (consulté le 24/05/2016)

ASTREDHOR (2016). Stations d'expérimentation. <http://www.astredhor.fr/stations-d-experimentation-420.html> (consulté le 30/08/2016)

ASTREDHOR Sud-Ouest (2016). Présentation du GIE Fleurs et Plantes du Sud-Ouest. <http://www.giefleursetplantes.fr/Groupement/Presentation-GIE-fleurs-plantes-sud-ouest.html> (consulté le 25/05/2016)

Basol (2012). FAQ. <http://basol.developpement-durable.gouv.fr/faq.htm> (consulté le 17/05/2016)

Basol (2012). Recherche cartographique. <http://basol.developpement-durable.gouv.fr/recherche.php> (consulté le 18/05/2016)

Centre National de Ressources Textiles et Lexicales (2012). Lysimètre. <http://www.cnrtl.fr/definition/lysim%C3%A8tre> (consulté le 30/08/2016)

Larousse (2016). Dictionnaires de Français. <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais> (consulté le 29/08/2016)

Selecdepol (2013). Données comparatives. <http://www.selecdepol.fr/donnees-comparatives> (consulté le 18/05/2016)

Selecdepol (2013). Phytoremédiation. <http://www.selecdepol.fr/fiches-techniques/phytoremediation> (consulté le 18/05/2016)

ANNEXES

Annexe n°I : Liste non exhaustive des principaux projets recensés en France (Bert, 2012)

Nom du projet	Structures concernées	Lieux	Année	Types de phytoremédiation	Polluant(s)	Plante(s)	Noms des participants
Ingecotech	Cnrs (CEFE) Stratoz	Saint-Laurent-le-Minier dans le Gar	2000	Phytoextraction	Zinc et Cadmium	<i>Thlapsi caerulescens</i> <i>Anthyllis vulneraria</i> <i>Armeria arenaria</i> <i>Arenaria aggregata</i>	Claude Grison José Escarré Jacques Biton
Phytener	ISA Lille	Noyelles-Godault et Auby	2009	Phytostabilisation aidée ou non Phytoextraction	Plomb, Cadmium et Zinc	<i>Robinia pseudoacacia</i> <i>Alnus glutinosa</i> <i>Quercus robur</i> <i>Acer pseudoplatanus</i> <i>Salix alba</i> <i>Miscanthus x giganteus</i>	Francis Douay Géraldine Bidar
DéPlassMétaux	Valgo Ecolab (ECSECO)	Graulhet dans le Tarn	2011	Phytoextraction	ETM	<i>Pelargonium capitatum</i> cultivars Attar of Roses, Atomic Snowflake et Clorinda	Muhammad Arshad Jérôme Silvestre Michel Kaemmerer Maritxu Guïresse
PHYTOSTAB	Inéris	Lallaing	2007	Phytostabilisation aidée	Cadmium, Plomb, Zinc et Cuivre	<i>Festuca rubra</i> <i>Deschampsia cespitosa</i>	Valérie Bert
OPHYTO	Inéris CAC	Creil	2013	Phytoextraction	ETM	<i>Arabidopsis halleri</i> <i>Calamagrostis epigejos</i>	Valérie Bert Hervé Coudière
Dioxines	UCEIV ULCO	Halluin	2010	Phytodégradation	Dioxines et Furanes	Ray-grass, trèfle, luzerne	
Borifer.fib	INRA Bordeaux Métropole	Bordeaux	2013	Phytoextraction	Zinc, Plomb et Cadmium	/	Michel Mench Lilian Marchand Eric Pesme
Vendin	Retia (Total)	Vendin-le-Vieil	2002	Phytoremédiation (Phytodégradation)	HAP, Phénols et BTEX	Saules	Alain Perez Nadia Origo Stanislas Whicherek Micheline Hotyat
Phytopop	FCBA	Bessancourt Leforest	2007	Phytostabilisation Phytoextraction	Plomb, Cadmium, Zinc et Mercure	Peupliers (14 cultivars)	Jean-Yves Gautry Alain Bailly
Difpolmine/ Phytoperf	ADEME IRH Environnement	La Combe du Saut	2000	Phytostabilisation aidée	Arsenic, Plomb et Cuivre	Poacées, Herbacées et dicotylédones	Jean-Luc Bouchardon
Physafimm	ADEME ENSM-SE	Châteauneuf	2009	Phytostabilisation aidée	ETM	Poacées, Herbacées et dicotylédones	Jean-Luc Bouchardon

Annexe n°II : Liste des substrats et des fertilisants utilisés pour chaque espèce de plante pour l'essai sur perlite (Sourzat, 2016)

		Essai « perlite »			
Genres	Espèces	Rempotage	Substrat	Fertilisation	Dosage
<i>Geranium</i>	<i>sanguineum</i>	Semaine 30, 2015	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Multicote 6 mois (18-6-12+ Micronutriments)	2,5 g/L
<i>Geranium</i>	<i>x 'Rozanne'</i>	Semaine 30, 2015	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Multicote 6 mois (18-6-12+ Micronutriments)	2,5 g/L
<i>Geranium</i>	<i>macrorrhizum</i>	Semaine 30, 2015	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Multicote 6 mois (18-6-12+ Micronutriments)	2,5 g/L
<i>Geranium</i>	<i>x 'Cantabrigiense'</i>	Semaine 30, 2015	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Multicote 6 mois (18-6-12+ Micronutriments)	2,5 g/L
<i>Potentilla</i>	<i>fruticosa</i> 'Goldfinger'	Semaine 30, 2015	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Multicote 6 mois (18-6-12+ Micronutriments)	2,5 g/L
<i>Ceanothus</i>	<i>thyrsiflorus</i> 'Skylark'	Semaine 23, 2015	Substrat STAR pierre ponce	Basacote Plus (16-8-12+2MgO+OE)	3 g/L
<i>Grevillea</i>	<i>juniperina</i>	Semaine 23, 2015	Substrat STAR pierre ponce	Basacote Plus (16-8-12+2MgO+OE)	3 g/L
<i>Grevillea</i>	<i>lanigera</i> 'Mount Tamboritha'	Semaine 23, 2015	Substrat STAR pierre ponce	Basacote Plus (16-8-12+2MgO+OE)	2 g/L
<i>Grevillea</i>	<i>rosmarinifolia</i> 'Jenkinsii'	Semaine 23, 2015	Substrat STAR pierre ponce	Basacote Plus (16-8-12+2MgO+OE)	3 g/L
<i>Eucalyptus</i>	<i>gundal</i> Clone 208	/	/	/	/
<i>Eucalyptus</i>	<i>gundal</i> Clone 645	/	/	/	/

Annexe n°III : Liste des substrats et des fertilisants utilisés pour chaque espèce de plante pour l'essai sur sol pollué (Sourzat, 2016)

		Essai « sol pollué »			
Genres	Espèces	Rempotage	Substrat	Fertilisation	Dosage
<i>Geranium</i>	<i>sanguineum</i>	Semaine 13, 2016	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Basacote Native 6 mois (14-3-19+2MgO)	3 g/L
<i>Geranium</i>	<i>x 'Rozanne'</i>	Semaine 13, 2016	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Basacote Native 6 mois (14-3-19+2MgO)	3 g/L
<i>Geranium</i>	<i>macrorrhizum</i>	Semaine 13, 2016	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Basacote Native 6 mois (14-3-19+2MgO)	3 g/L
<i>Geranium</i>	<i>x 'Cantabrigiense'</i>	Semaine 13, 2016	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Basacote Native 6 mois (14-3-19+2MgO)	3 g/L
<i>Potentilla</i>	<i>fruticosa 'Goldfinger'</i>	Semaine 10, 2016	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Basacote Native 6 mois (14-3-19+2MgO)	3 g/L
<i>Ceanothus</i>	<i>thyrsiflorus 'Skylark'</i>	Semaine 10, 2016	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Basacote Native 6 mois (14-3-19+2MgO)	3 g/L
<i>Grevillea</i>	<i>juniperina</i>	Semaine 10, 2016	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Basacote Native 6 mois (14-3-19+2MgO)	3 g/L
<i>Grevillea</i>	<i>lanigera 'Mount Tamboritha'</i>	Semaine 10, 2016	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Basacote Native 6 mois (14-3-19+2MgO)	3 g/L
<i>Grevillea</i>	<i>rosmarinifolia 'Jenkinsii'</i>	Semaine 10, 2016	Premier Tech Faliénor « Dipla »	Basacote Native 6 mois (14-3-19+2MgO)	3 g/L
<i>Eucalyptus</i>	<i>gundal</i> Clone 208	Semaine 31, 2016	Premier Tech Faliénor « SUB »	Nutricote total T140 (18-6-8)	5 g/L
<i>Eucalyptus</i>	<i>gundal</i> Clone 645	Semaine 31, 2016	Premier Tech Faliénor « SUB »	Nutricote total T140 (18-6-8)	5 g/L

Annexe n°IV : Tableau de toutes les personnes contactées durant le stage (Sourzat, 2016)

Noms	Statut ou thématique de travail	Structure	Mail/téléphone	Infos
Raphaël CHANELIERE	Chargé de mission, correspondant sites pollués	ADEME Aquitaine	raphael.chanelliere@ademe.fr	Envoi mail le 21/04/2016 et réponse le 26/04/2016. Pas de collaboration/débouchés mais contacts *
Afif ABOU AKAR	Responsables sites et sols pollués	BRGM Aquitaine	a.abouakar@brgm.fr	Envoi mail le 21/04/2016 et réponse le 22/04/2016. Pas de collaborations mais contacts *
*Ioannis IGNATIADIS	Travail sur dépollution par les plantes Chef de projet	BRGM Orléans	i.ignatiadis@brgm.fr	Envoi mail le 22/04/2016 et réponse le 27/04/2016. A recontacter si besoin de parler de ses essais.
*Murielle SCALISI	Assistante de direction Eau, Environnement et Ecotechnologies	BRGM Orléans	m.scalisi@brgm.fr	Envoi mail le 03/05/2016 et réponse le 09/05/2016. Pas de collaboration mais contacts *
*Philippe BATAILLARD	Responsable Scientifique du Programmes « Remédiation des Dites et Sols Pollués »	BRGM Orléans	p.bataillard@brgm.fr	Envoi mail le 09/05/2016 et réponse le 09/05/2016. Envoi d'un tableau de contacts d'acteurs de la phytoremédiation.
*Didier MARGOT	Chargé de mission planification urbaine – requalification des friches polluées	ADEME Angers	didier.margot@ademe.fr	Envoi mail le 09/06/2016.
*Eric PESME	Directeur adjoint, chef du service Expertise, Biodiversité et Génie écologique Direction des Espaces Verts	Bordeaux Métropole	epesme@bordeaux-metropole.fr	Envoi mail le 09/06/2016 et réponse le 16/06/2016 Collaboration et contact *
*Lilian MARCHAND	Ingénieur d'étude Bordeaux Métropole	Bordeaux Métropole	lmarchan@bordeaux.inra.fr	Envoi mail le 17/06/2016 et réponse le 17/06/2016. Collaboration.
Patrice GUINAUDEAU	Thématiques Sites et Sols pollués	DREAL Aquitaine	patrice.guinaudeau@developpement-durable.gouv.fr	Envoi le 20/06/2016 et réponse le 21/06/2016. Pas de collaboration mais conseils sur sites et contact intéressant pour un site de l'ADBM.
*Lionel SIBRAC	Sous la direction de Mr Pesme	Bordeaux Métropole		Appels téléphoniques pour organiser le prélèvement du sol.
*Gilles MATHIEU	Sous la direction de Mr Sibrac	Bordeaux Métropole		Appels téléphoniques pour organiser le prélèvement du sol.
*Frédéric WARTEL	Collègue de Mr Mathieu	Bordeaux Métropole	fwartel@bordeaux.inra.fr	Rendez-vous le 01.08.2016 pour prélèvements des échantillons de sol pollué.
Alain BAILLY	Pôle Sylviculture Avancée	FCBA Cestas	alain.bailly@fcba.fr	Envoi le 17/06/2016 et réponse le 04/07/2016 Proposition d'autres contacts du FCBA.

Tableau de notations pour un suivi des plantes ornementales après application de Plomb

Date :

Espèces	Modalités	R	T	L	B	F	P
<i>Geranium sanguineum</i>	Témoin						
<i>Geranium sanguineum</i>	Mycorhize						
<i>Geranium x 'Rozanne'</i>	Témoin						
<i>Geranium x 'Rozanne'</i>	Mycorhize						
<i>Geranium macrorrhizum</i>	Témoin						
<i>Geranium macrorrhizum</i>	Mycorhize						
<i>Geranium x 'Cantabrigiense'</i>	Témoin						
<i>Geranium x 'Cantabrigiense'</i>	Mycorhize						
<i>Potentilla fruticosa</i>	Témoin						
<i>Potentilla fruticosa</i>	Mycorhize						
<i>Ceanothus thyrsiflorus</i>	Témoin						
<i>Ceanothus thyrsiflorus</i>	Mycorhize						
<i>Grevillea juniperina</i>	Témoin						
<i>Grevillea juniperina</i>	Mycorhize						
<i>Grevillea lanigera</i> 'Mount Tamboritha'	Témoin						
<i>Grevillea lanigera</i> 'Mount Tamboritha'	Mycorhize						
<i>Grevillea rosmarinifolia</i> 'Jenkinsii'	Témoin						
<i>Grevillea rosmarinifolia</i> 'Jenkinsii'	Mycorhize						

Noter dans chaque case en fonction de chaque organe, l'intensité des symptômes suivis des symptômes observés s'ils sont présents :

- Symptômes observés = MC : changement de coloration; NE : nécrose; DE : déformation; MV : modification du cycle de développement de la plante (ralenti ou accéléré); DO : disparition d'organes; MO : mort de la plante

- Organes touchés = R : racine ; T : tige ; L : feuille ; B : bouton floral fermé ; F : fleur/pétales ; P : toute la plante

- Intensité des symptômes = 0 : aucun dégât ; 1 : dégâts légers, visibles facilement, sans conséquence inacceptable ; 2 : dégâts prononcés avec conséquences probables à anticiper ; 3 : dégâts très significatifs, avec perte avérée de la production

Annexe n°VI : Analyse du premier prélèvement de sol pollué (feuille recto-verso)



Vos résultats d'analyses
TERRE

DEMANDEUR / PRESCRIPTEUR

PARCELLE

Référence	REF 1
Surface	
X/Long	Y/Lat
Coordonnées GPS	

DESTINATAIRE

GIE FLEURS & PLANTES DU SUD-OUEST

DEOGRATIAS

Site INRA 71, rue Edouard Bourleaux

CS 20 33882

CARACTÉRISTIQUES DU SOL

Type de sol	Argile		
Densité apparente (T/m ³)	1,50	Potentiel racinaire	
Masse de sol (T/ha)	4 500	Sol humide	NON
Profondeur de prélèvement (cm)		Sol drainé humide	NON
Couleur	Marron	Travail du sol difficile	NON



N° RAPPORT

SENL16027843

Date de réception	02/08/2016
Début d'analyse	02/08/2016
Début d'interprétation	23/08/2016
Date d'édition	26/08/2016

ÉTAT PHYSIQUE

Granulométrie (pour mille)

Argiles (< 2 µm) :
 Limons fins (2 à 20 µm) :
 Limons grossiers (20 à 50 µm) :
 Sables fins (50 à 200 µm) :
 Sables grossiers (200 à 2000 µm) :

ÉTAT HUMIQUE

Matières organiques (g/kg)*		58,0	26 / 30	Elevé
* MO=carb.org × 1.72				
Souhaitable				
Azote total ¹ (g/kg) :		3,20		
Rapport C/N		10,5	7,5 / 12	Satisfaisant
Décomposition de la MO:	Rapide	Lente	Souhaitable	

Estimation du coefficient k2 :

Stock en matières organiques (MO) :

Stock minimal souhaitable en MO :

Estimation des pertes annuelles en MO:

Estimation de l'azote minéralisable :

Potentiel Biologique : 55 / Faible



Les résultats d'analyses sont rendus sur terre fine sèche
 Les déterminations identifiées par le symbole Φ sont couvertes par l'accréditation.

Le rapport ne concerne que les objets soumis à l'essai. Le rapport d'essai ne doit pas être reproduit partiellement sans l'approbation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il comporte 2 pages. L'accréditation du COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation ; les commentaires ne sont pas couverts par l'accréditation Cofrac ; ils ne tiennent pas compte du calcul des incertitudes, disponibles sur le site Internet du laboratoire (www.aurea.eu), rubrique "Qualité".

AUREA - ZI Chef de baie - 1 rue champplain - 17074 La Rochelle Cedex 09 - Tél. 01 44 31 40 40 Fax 01 44 31 40 41 - contact@aurea.eu - www.aurea.eu

1/2

Version Régiliert - Aurea - 2016.3

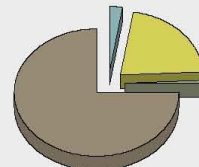


STATUT ACIDO-BASIQUE

pH eau [°]	7,0
pH KCl [°]	
Calcaire total (g/kg)	3
Calcaire Actif (g/kg)	
CaO [°] (g/kg)	6,09
CEC [°] Metson (cmol+/kg)	22,8

Taux d'occupation de la CEC (%)

K/CEC : 3,3
Mg/CEC : 27,6
Na/CEC : < 1
Ca/CEC : 95,4



Taux de saturation S/CEC (%) *

Actuel : > 100
Optimal : > 90

* S = Somme des cations échangeables

MILIEUX NUTRITIF ET ENVIRONNEMENTAL

Eléments majeurs assimilables ou échangeables

Eléments	Seuils d'impasse		Situation vis à vis de la culture	
	L1	L2		
P ₂ O ₅ [°] (g/kg) - Méthode Joret Hébert	0,037	0,170	0,260	Pouvoir fixateur du sol : Stratégie de fertilisation : Fertilisation nécessaire
K ₂ O [°] (g/kg)		0,190	0,331	Pouvoir fixateur du sol : Stratégie de fertilisation : Impasse possible
MgO [°] (g/kg)		0,129	0,249	Stratégie de fertilisation : Impasse possible

Oligo-éléments (mg/kg)

Cuivre EDTA [°]				Risque de toxicité
Zinc EDTA [°]				
Manganèse EDTA [°]				
Fer EDTA [°]				
Bore soluble	0,5	1,1	3,0	Risque de carence

Autres résultats

Sodium (Na ₂ O g/kg)	0,05	Souhaitable
Rapport K ₂ O/MgO	0,28	< 0,100 1,33 / 1,79

Eléments traces métalliques totaux

Valeurs limites réglementaires selon le tableau 2 de l'annexe 1 de l'arrêté du 8 janvier 1998

	Teneur (mg/kg)	Valeur limite réglementaire	Appr.
Cadmium (Cd) [°]	0,46	2	OK
Chrome (Cr) [°]	58,00	150	OK
Cuivre (Cu) [°]	41,00	100	OK
Mercurie (Hg)	0,310	1	OK
Nickel (Ni) [°]	41,00	50	OK
Plomb (Pb) [°]	130,00	100	Sup.
Zinc (Zn) [°]	200,00	300	OK
Sélénium (Se)			
Aluminium (Al)			
Arsenic (As)			
Bore (B)			
Fer (Fe)			
Cobalt (Co)			
Manganèse (Mn)			
Molybdène (Mo)			

Normes utilisées : Humidité résiduelle : NF ISO 11465 / pH : NF ISO 10390 / Calcaire total : NF ISO 10693 / Calcaire actif : NF X 31-106 / Granulométrie : X 31-107 / Cations échangeables : méthode interne selon NF X 31-108 / Carbone organique : NF ISO 14235 / Azote total : NF ISO 13878 / Conductivité électrique : NF ISO 11265 / Phosphore Dyer : NF X 31-160 / Phosphore Joret-Hébert : NF X 31-161 / Phosphore Olsen : NF ISO 11263 / Cuivre, manganèse et zinc : NF X 31-120 / Bore : NF X 31-122 / CEC : NF X 31-130 / Mise en solution métaux lourds : I17TER10 / Dosage métaux lourds : NF EN ISO 11885 / IPC : FD X 31-146 / Eléments extraits au DTPA : NF X 31-121.

L'ingénieur agronome : Sébastien KALT

[Signature]

2/2

Annexe n°VII : Analyse du deuxième prélèvement de sol pollué (feuille recto-verso)



Vos résultats d'analyses
TERRE

DEMANDEUR / PRESCRIPTEUR

PARCELLE

Référence	REF 2
Surface	
X/Long	Y/Lat
Coordonnées GPS	

DESTINATAIRE

GIE FLEURS & PLANTES DU SUD-OUEST

DEOGRATIAS

Site INRA 71, rue Edouard Bourleaux

CS 20 33882

CARACTÉRISTIQUES DU SOL

Type de sol	Argile		
Densité apparente (T/m ³)	1,25	Potenti racinaire	
Masse de sol (T/ha)	3 800	Sol humide	NON
Profondeur de prélèvement (cm)		Sol drainé humide	NON
Couleur	Marron	Travail du sol difficile	NON



N° RAPPORT

SENL16027844

Date de réception	02/08/2016
Début d'analyse	02/08/2016
Début d'interprétation	23/08/2016
Date d'édition	26/08/2016

ÉTAT PHYSIQUE

Granulométrie (pour mille)

Argiles (< 2 µm) :
 Limons fins (2 à 20 µm) :
 Limons grossiers (20 à 50 µm) :
 Sables fins (50 à 200 µm) :
 Sables grossiers (200 à 2000 µm) :

ÉTAT HUMIQUE

Matières organiques (g/kg)*		45,8	25 / 30	Elevé
* MO=carb.org × 1.72				
Souhaitable				
Azote total ³ (g/kg) :	2,50			
Rapport C/N		10,6	7,5 / 12	Satisfaisant
Décomposition de la MO:	Rapide	Lente	Souhaitable	

Estimation du coefficient k2 :

Stock en matières organiques (MO) :

Stock minimal souhaitable en MO :

Estimation des pertes annuelles en MO:

Estimation de l'azote minéralisable :

Potentiel Biologique : 55 / Faible



Les résultats d'analyses sont rendus sur terre fine sèche
 Les déterminations identifiées par le symbole Φ sont couvertes par l'accréditation.

Le rapport ne concerne que les objets soumis à l'essai. Le rapport d'essai ne doit pas être reproduit partiellement sans l'approbation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il comporte 2 pages. L'accréditation du COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation ; les commentaires ne sont pas couverts par l'accréditation Cofrac ; ils ne tiennent pas compte du calcul des incertitudes, disponibles sur le site Internet du laboratoire (www.aurea.eu), rubrique "Qualité".

AUREA - ZI Chef de baie - 1 rue champplain - 17074 La Rochelle Cedex 09 - Tél. 01 44 31 40 40 Fax 01 44 31 40 41 - contact@aurea.eu - www.aurea.eu

Version Régiliert - Aurea - 2016.3

1/2

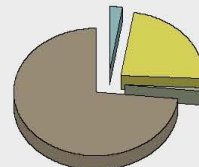


STATUT ACIDO-BASIQUE

pH eau [°]	7,0
pH KCl [°]	
Calcaire total (g/kg)	3
Calcaire Actif (g/kg)	
CaO [°] (g/kg)	5,68
CEC [°] Metson (cmol+/kg)	22,1

Taux d'occupation de la CEC (%)

K/CEC : 3,1
Mg/CEC : 29,4
Na/CEC : < 1
Ca/CEC : 91,8



Taux de saturation S/CEC (%) *

Actuel : > 100
Optimal : > 90

* S = Somme des cations échangeables

MILIEUX NUTRITIF ET ENVIRONNEMENTAL

Eléments majeurs assimilables ou échangeables

Eléments	Seuils d'impasse		Situation vis à vis de la culture	
	L1	L2		
P ₂ O ₅ [°] (g/kg) - Méthode Joret Hébert	< 0,020	0,170	0,260	Pouvoir fixateur du sol : Stratégie de fertilisation : Fertilisation nécessaire
K ₂ O [°] (g/kg)	0,187	0,325	0,326	Pouvoir fixateur du sol : Stratégie de fertilisation : Impasse possible
MgO [°] (g/kg)	0,127	0,244	1,31	Stratégie de fertilisation : Impasse possible

Oligo-éléments (mg/kg)

Cuivre EDTA [°]			
Zinc EDTA [°]			
Manganèse EDTA [°]			
Fer EDTA [°]			
Bore soluble	0,5	1,5	3,0

Autres résultats

Sodium (Na ₂ O g/kg)	0,05	< 0,100
Rapport K ₂ O/MgO	0,25	1,33 / 1,77

Eléments traces métalliques totaux

Valeurs limites réglementaires selon le tableau 2 de l'annexe 1 de l'arrêté du 8 janvier 1998

	Teneur (mg/kg)	Valeur limite réglementaire	Appr.
Cadmium (Cd) [°]	0,34	2	OK
Chrome (Cr) [°]	56,00	150	OK
Cuivre (Cu) [°]	38,00	100	OK
Mercuré (Hg)	0,140	1	OK
Nickel (Ni) [°]	40,00	50	OK
Plomb (Pb) [°]	99,00	100	OK
Zinc (Zn) [°]	170,00	300	OK
Sélénium (Se)			
Aluminium (Al)			
Arsenic (As)			
Bore (B)			
Fer (Fe)			
Cobalt (Co)			
Manganèse (Mn)			
Molybdène (Mo)			

Normes utilisées : Humidité résiduelle : NF ISO 11465 / pH : NF ISO 10390 / Calcaire total : NF ISO 10693 / Calcaire actif : NF X 31-106 / Granulométrie : X 31-107 / Cations échangeables : méthode interne selon NF X 31-108 / Carbone organique : NF ISO 14235 / Azote total : NF ISO 13878 / Conductivité électrique : NF ISO 11265 / Phosphore Dyer : NF X 31-160 / Phosphore Joret-Hébert : NF X 31-161 / Phosphore Olsen : NF ISO 11263 / Cuivre, manganèse et zinc : NF X 31-120 / Bore : NF X 31-122 / CEC : NF X 31-130 / Mise en solution métaux lourds : I17TER10 / Dosage métaux lourds : NF EN ISO 11885 / IPC : FD X 31-146 / Eléments extraits au DTPA : NF X 31-121.

L'ingénieur agronome : Sébastien KALT

[Signature]

2/2

Annexe n°VIII : Analyse du troisième prélèvement de sol pollué (feuille recto-verso)



Vos résultats d'analyses
TERRE

DEMANDEUR / PRESCRIPTEUR

PARCELLE

Référence	REF 3		
Surface			
X/Long		Y/Lat	
Coordonnées GPS			

DESTINATAIRE

GIE FLEURS & PLANTES DU SUD-OUEST

DEOGRATIAS

Site INRA 71, rue Edouard Bourleaux

CS 20 33882

CARACTÉRISTIQUES DU SOL

Type de sol	Sols argilo-calcaires		
Densité apparente (T/m ³)	1,25	Potentiel racinaire	
Masse de sol (T/ha)	3 800	Sol humide	NON
Profondeur de prélèvement (cm)		Sol drainé humide	NON
Couleur		Travail du sol difficile	NON



N° RAPPORT

SENL16027845

Date de réception	02/08/2016
Début d'analyse	02/08/2016
Début d'interprétation	26/08/2016
Date d'édition	26/08/2016

ÉTAT PHYSIQUE

Granulométrie (pour mille)

Argiles (< 2 µm) :
 Limons fins (2 à 20 µm) :
 Limons grossiers (20 à 50 µm) :
 Sables fins (50 à 200 µm) :
 Sables grossiers (200 à 2000 µm) :

ÉTAT HUMIQUE

Matières organiques (g/kg)*		130,5	20 / 30	Elevé
* MO=carb.org × 1.72				
Souhaitable				
Azote total ³ (g/kg) :	4,50			
Rapport C/N		16,9	7,5 / 16	Elevé
Décomposition de la MO:	Rapide	Lente	Souhaitable	

Estimation du coefficient k2 :

Stock en matières organiques (MO) :

Stock minimal souhaitable en MO :

Estimation des pertes annuelles en MO:

Estimation de l'azote minéralisable :

Potentiel Biologique : 40 / Faible



Les résultats d'analyses sont rendus sur terre fine sèche
 Les déterminations identifiées par le symbole Φ sont couvertes par l'accréditation.

Le rapport ne concerne que les objets soumis à essai. Le rapport d'essai ne doit pas être reproduit partiellement sans l'approbation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il comporte 2 pages. L'accréditation du COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation ; les commentaires ne sont pas couverts par l'accréditation Cofrac ; ils ne tiennent pas compte du calcul des incertitudes, disponibles sur le site Internet du laboratoire (www.aurea.eu), rubrique "Qualité".

AUREA - ZI Chef de baie - 1 rue champplain - 17074 La Rochelle Cedex 09 - Tél. 01 44 31 40 40 Fax 01 44 31 40 41 - contact@aurea.eu - www.aurea.eu

1/2

Version Régiliert - Aurea - 2015.3



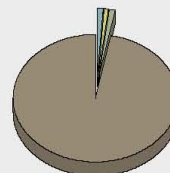


STATUT ACIDO-BASIQUE

pH eau [°]				8,0
pH KCl [°]				
Calcaire total (g/kg)		26		
Calcaire Actif (g/kg)				
CaO [°] (g/kg)			10,60	
CEC [°] Metson (cmol+/kg)				16,6

Taux d'occupation de la CEC (%)

K/CEC : 2,0
Mg/CEC : 6,7
Na/CEC : < 1
Ca/CEC : > 100



Taux de saturation S/CEC (%) *

Actuel : > 100
Optimal : > 100

* S = Somme des cations échangeables

MILIEUX NUTRITIF ET ENVIRONNEMENTAL

Eléments majeurs assimilables ou échangeables

Eléments	Seuils d'impasse		Situation vis à vis de la culture	
	L1	L2		
P ₂ O ₅ [°] (g/kg) - Méthode Joret Hébert			0,32	Pouvoir fixateur du sol : Stratégie de fertilisation : Impasse possible
K ₂ O [°] (g/kg)			0,155	Pouvoir fixateur du sol : Stratégie de fertilisation : Fertilisation nécessaire
MgO [°] (g/kg)			0,22	Stratégie de fertilisation : Impasse possible

Oligo-éléments (mg/kg)

Cuivre EDTA [°]				
Zinc EDTA [°]				
Manganèse EDTA [°]				
Fer EDTA [°]				
Bore soluble	0,6	0,7	4,0	

Autres résultats

Sodium (Na ₂ O g/kg)		0,03		Souhaitable
Rapport K ₂ O/MgO		0,70		1,32 / 1,66

Eléments traces métalliques totaux

Valeurs limites réglementaires selon le tableau 2 de l'annexe 1 de l'arrêté du 8 janvier 1998

	Teneur (mg/kg)	Valeur limite réglementaire	Appr.
Cadmium (Cd) [°]	6,10	2	Sup.
Chrome (Cr) [°]	150,00	150	OK
Cuivre (Cu) [°]	810,00	100	Sup.
Mercuré (Hg)	4,200	1	Sup.
Nickel (Ni) [°]	85,00	50	Sup.
Plomb (Pb) [°]	1 300,00	100	Sup.
Zinc (Zn) [°]	2 200,00	300	Sup.
Sélénium (Se)			
Aluminium (Al)			
Arsenic (As)			
Bore (B)			
Fer (Fe)			
Cobalt (Co)			
Manganèse (Mn)			
Molybdène (Mo)			

Normes utilisées : Humidité résiduelle : NF ISO 11465 / pH : NF ISO 10390 / Calcaire total : NF ISO 10633 / Calcaire actif : NF X 31-106 / Granulométrie : X 31-107 / Cations échangeables : méthode interne selon NF X 31-108 / Carbone organique : NF ISO 14235 / Azote total : NF ISO 13878 / Conductivité électrique : NF ISO 11265 / Phosphore Dyer : NF X 31-160 / Phosphore Joret-Hébert : NF X 31-161 / Phosphore Olsen : NF ISO 11263 / Cuivre, manganèse et zinc : NF X 31-120 / Bore : NF X 31-122 / CEC : NF X 31-130 / Mise en solution métaux lourds : I17TER10 / Dosage métaux lourds : NF EN ISO 11885 / IPC : FD X 31-146 / Eléments extraits au DTPA : NF X 31-121.

L'ingénieur agronome : Sébastien KALT

[Signature]

2/2

Annexe n°IX : Analyse du prélèvement du sol de la station (feuille recto-verso)



Vos résultats d'analyses
TERRE

DEMANDEUR / PRESCRIPTEUR

PARCELLE

Référence	TERRE GIE TEMOIN		
Surface	Prélevée le : 01/08/2016		
X/Long		Y/Lat	
Coordonnées GPS			

DESTINATAIRE

GIE FLEURS & PLANTES DU SUD-OUEST

DEOGRATIAS

Site INRA 71, rue Edouard Bourleaux

CS 20 33882

CARACTÉRISTIQUES DU SOL

Type de sol	Sables		
Densité apparente (T/m ³)	1,60	Potentiel racinaire	
Masse de sol (T/ha)	4 800	Sol humide	NON
Profondeur de prélèvement (cm)		Sol drainé humide	NON
Couleur		Travail du sol difficile	NON



N° RAPPORT

SENL16028062

Date de réception	11/08/2016
Début d'analyse	11/08/2016
Début d'interprétation	26/08/2016
Date d'édition	26/08/2016

ÉTAT PHYSIQUE

Granulométrie (pour mille)

Argiles (< 2 µm) :
 Limons fins (2 à 20 µm) :
 Limons grossiers (20 à 50 µm) :
 Sables fins (50 à 200 µm) :
 Sables grossiers (200 à 2000 µm) :

ÉTAT HUMIQUE

Matières organiques (g/kg)*		27,0	23 / 27	Elevé
-----------------------------	--	------	---------	-------

* MO=carb.org × 1.72

Souhaitable

Azote total³(g/kg) : **0,89**

Rapport C/N		17,6	7,5 / 12	Elevé
-------------	--	------	----------	-------

Décomposition de la MO: Rapide Lente Souhaitable

Estimation du coefficient k2 :

Stock en matières organiques (MO) :

Stock minimal souhaitable en MO :

Estimation des pertes annuelles en MO:

Estimation de l'azote minéralisable :

Potentiel Biologique : 96 / Correct



Les résultats d'analyses sont rendus sur terre fine sèche
 Les déterminations identifiées par le symbole Φ sont couvertes par l'accréditation.

Le rapport ne concerne que les objets soumis à l'essai. Le rapport d'essai ne doit pas être reproduit partiellement sans l'approbation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il comporte 2 pages. L'accréditation du COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation ; les commentaires ne sont pas couverts par l'accréditation Cofrac ; ils ne tiennent pas compte du calcul des incertitudes, disponibles sur le site Internet du laboratoire (www.aurea.eu), rubrique "Qualité".

AUREA - ZI Chef de baie - 1 rue champplain - 17074 La Rochelle Cedex 09 - Tél. 01 44 31 40 40 Fax 01 44 31 40 41 - contact@aurea.eu - www.aurea.eu

1/2

Version Régiliert - Aurea - 2016.3

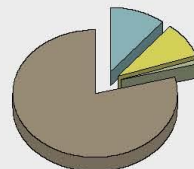


STATUT ACIDO-BASIQUE

pH eau [°]	6,3
pH KCl [°]	
Calcaire total (g/kg)	0
Calcaire Actif (g/kg)	
CaO [°] (g/kg)	1,07
CEC [°] Metson (cmolH/kg)	4,2

Taux d'occupation de la CEC (%)

K/CEC : 12,4
Mg/CEC : 10,2
Na/CEC : 1,5
Ca/CEC : 91,0



Taux de saturation S/CEC (%) *

Actuel : > 100
Optimal : > 78

* S = Somme des cations échangeables

MILIEUX NUTRITIF ET ENVIRONNEMENTAL

Eléments majeurs assimilables ou échangeables

Eléments	Seuils d'impasse		Situation vis à vis de la culture	
	L1	L2		
P ₂ O ₅ [°] (g/kg) - Méthode Joret Hébert	0,052	0,130	0,160	Pouvoir fixateur du sol : Stratégie de fertilisation : Fertilisation nécessaire
K ₂ O [°] (g/kg)		0,075	0,098	0,246 Pouvoir fixateur du sol : Stratégie de fertilisation : Impasse possible
MgO [°] (g/kg)		0,061	0,084	0,08 Stratégie de fertilisation : Impasse possible

Oligo-éléments (mg/kg)

Cuivre EDTA[°]

Zinc EDTA[°]

Manganèse EDTA[°]

Fer EDTA[°]

Bore soluble

Autres résultats

Sodium (Na ₂ O g/kg)	0,02	Souhaitable
Rapport K ₂ O/MgO	2,86	< 0,100 1,16 / 1,25

Eléments traces métalliques totaux

Valeurs limites réglementaires selon le tableau 2 de l'annexe 1 de l'arrêté du 8 janvier 1998

Teneur (mg/kg)	Valeur limite réglementaire	Appr.
Cadmium (Cd) [°]	0,09	2 OK
Chrome (Cr) [°]	9,10	150 OK
Cuivre (Cu) [°]	38,00	100 OK
Mercurie (Hg)	0,080	1 OK
Nickel (Ni) [°]	4,40	50 OK
Plomb (Pb) [°]	25,00	100 OK
Zinc (Zn) [°]	36,00	300 OK
Sélénium (Se)		
Aluminium (Al)		
Arsenic (As)		
Bore (B)		
Fer (Fe)		
Cobalt (Co)		
Manganèse (Mn)		
Molybdène (Mo)		

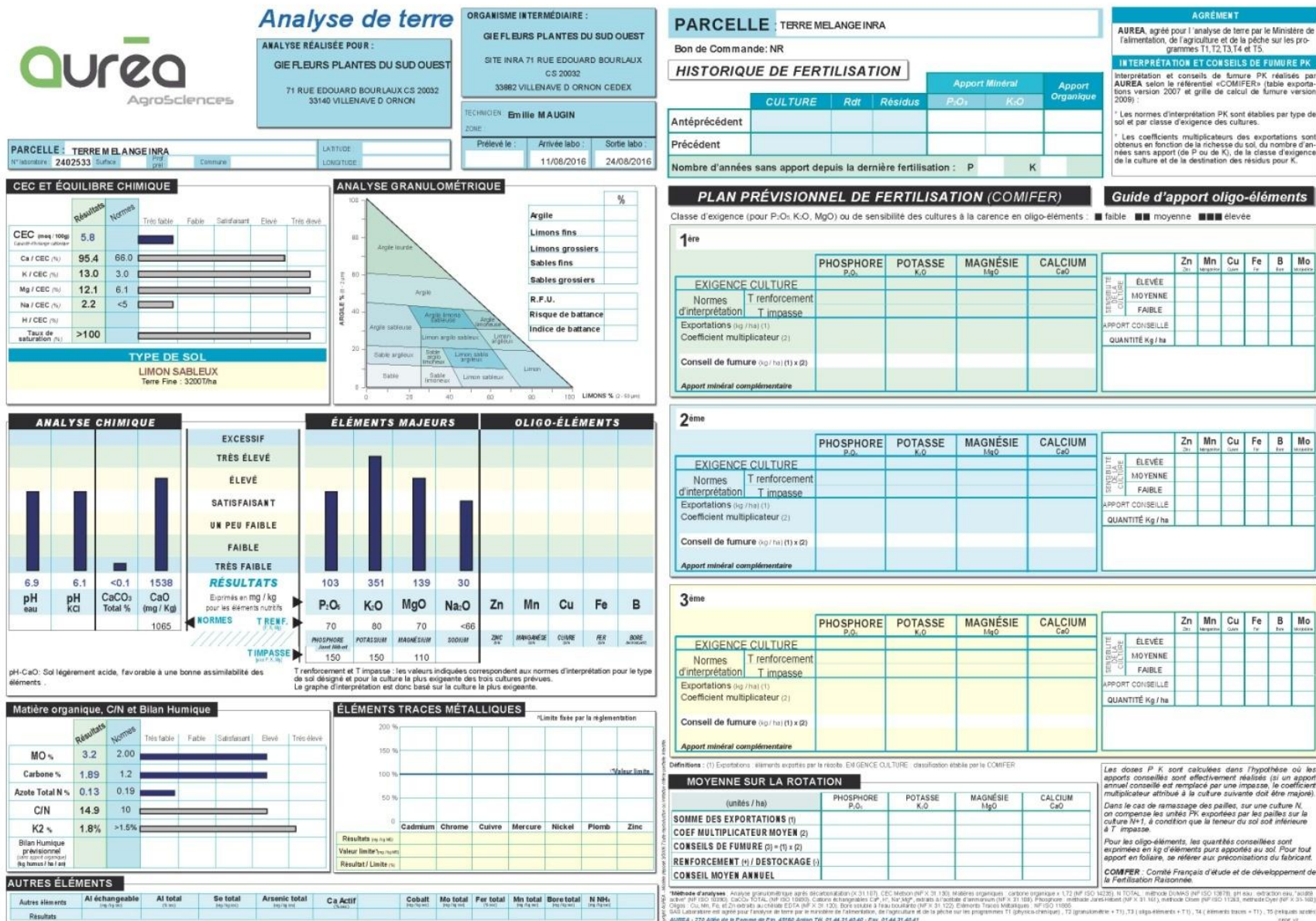
Normes utilisées : Humidité résiduelle : NF ISO 11465 / pH : NF ISO 10390 / Calcaire total : NF ISO 10633 / Calcaire actif : NF X 31-106 / Granulométrie : X 31-107 / Cations échangeables : méthode interne selon NF X 31-103 / Carbone organique : NF ISO 14235 / Azote total : NF ISO 13878 / Conductivité électrique : NF ISO 11265 / Phosphore Dyer : NF X 31-160 / Phosphore Joret-Hébert : NF X 31-161 / Phosphore Olsen : NF ISO 11263 / Cuivre, manganèse et zinc : NF X 31-120 / Bore : NF X 31-122 / CEC : NF X 31-130 / CEC : NF X 31-130 / Mise en solution métaux lourds : I17TER10 / Dosage métaux lourds : NF EN ISO 11885 / IPC : FD X 31-146 / Eléments extraits au DTPA : NF X 31-121.

L'ingénieur agronome : Sébastien KALT

[Signature]

2/2

Annexe n°X : Analyse de terre du mélange de sol de la station et de terre végétale



PARCELLE : TERRE MELANGE INRA
Bon de Commande: NR
HISTORIQUE DE FERTILISATION

CULTURE	Rdt	Résidus	Apport Minéral	Apport Organique
Antécédent				
Précédent				

Nombre d'années sans apport depuis la dernière fertilisation : P K

PLAN PRÉVISIONNEL DE FERTILISATION (COMIFER)
Classe d'exigence (pour P₂O₅, K₂O, MgO) ou de sensibilité des cultures à la carence en oligo-éléments : ■ faible ■■ moyenne ■■■ élevée

1ère

EXIGENCE CULTURE	PHOSPHORE P ₂ O ₅	POTASSE K ₂ O	MAGNÉSIE MgO	CALCIUM CaO
Normes d'interprétation				
T renforcement				
T impasse				
Exportations (kg/ha) (1)				
Coefficient multiplicateur (2)				
Conseil de fumure (kg/ha) (1) x (2)				
Apport minéral complémentaire				

SENSIBILITÉ CULTURE	Zn	Mn	Cu	Fe	B	Mo
ELEVÉE						
MOYENNE						
FAIBLE						
APPORT CONSEILLÉ						
QUANTITÉ Kg/ha						

2ème

EXIGENCE CULTURE	PHOSPHORE P ₂ O ₅	POTASSE K ₂ O	MAGNÉSIE MgO	CALCIUM CaO
Normes d'interprétation				
T renforcement				
T impasse				
Exportations (kg/ha) (1)				
Coefficient multiplicateur (2)				
Conseil de fumure (kg/ha) (1) x (2)				
Apport minéral complémentaire				

SENSIBILITÉ CULTURE	Zn	Mn	Cu	Fe	B	Mo
ELEVÉE						
MOYENNE						
FAIBLE						
APPORT CONSEILLÉ						
QUANTITÉ Kg/ha						

3ème

EXIGENCE CULTURE	PHOSPHORE P ₂ O ₅	POTASSE K ₂ O	MAGNÉSIE MgO	CALCIUM CaO
Normes d'interprétation				
T renforcement				
T impasse				
Exportations (kg/ha) (1)				
Coefficient multiplicateur (2)				
Conseil de fumure (kg/ha) (1) x (2)				
Apport minéral complémentaire				

SENSIBILITÉ CULTURE	Zn	Mn	Cu	Fe	B	Mo
ELEVÉE						
MOYENNE						
FAIBLE						
APPORT CONSEILLÉ						
QUANTITÉ Kg/ha						

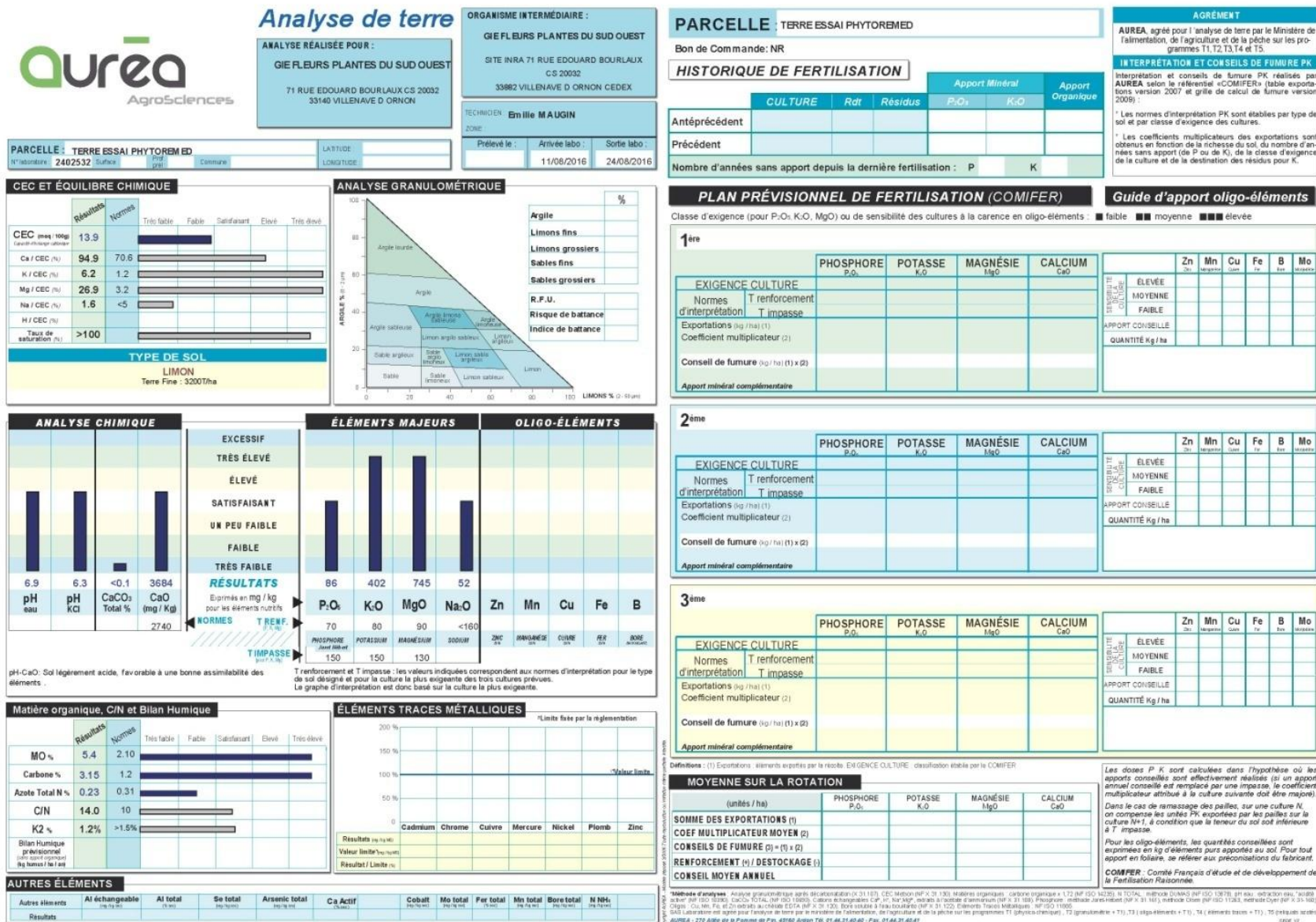
MOYENNE SUR LA ROTATION


(unités / ha)	PHOSPHORE P ₂ O ₅	POTASSE K ₂ O	MAGNÉSIE MgO	CALCIUM CaO
SOMME DES EXPORTATIONS (1)				
COEF MULTIPLICATEUR MOYEN (2)				
CONSEILS DE FUMURE (3) = (1) x (2)				
RENFORCEMENT (4) / DESTOCKAGE (1)				
CONSEIL MOYEN ANNUEL				

DEFINITIONS : (1) Exportations, éléments exportés par la récolte. EXIGENCE CULTURE, classification établie par le COMIFER.
(2) Coefficient multiplicateur attribué à la culture suivante (voir tableau ci-dessous).
(3) Dans le cas de ramassage des pailles, sur une culture N, on compense les unités PK exportées par les pailles sur la culture N+1, à condition que la teneur du sol soit inférieure à T impasse.
(4) Pour les oligo-éléments, les quantités conseillées sont exprimées en kg d'éléments purs apportés au sol. Pour tout apport en foliaire, se référer aux préconisations du fabricant.
COMIFER : Comité Français d'étude et de développement de la Fertilisation Raisonnée.

Méthodes d'analyses : Analyse granulométrique après décarbonatation (X 31 107). CEC Méthode (NF X 31 100). Matières organiques : carbone organique x 1,72 (NF ISO 10393). N TOTAL : méthode Dumas (NF ISO 13878). pH eau : extraction eau "sédiments" (NF ISO 10393). CaCO₃ Total : NF ISO 10393. Culture de bioassais C₃ : NF ISO 10393. Méthode de dosage du phosphore : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Phosphore : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du potassium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du magnésium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sodium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du fer : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du bore : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du chrome : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du nickel : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du plomb : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du molybdène : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du sélénium : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cobalt : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du manganèse : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cuivre : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du zinc : méthode colorimétrique (NF X 31 100). Méthode de dosage du cadmium : méthode colorimétrique (NF X 31 10

Annexe n°XI : Analyse de terre du mélange de sol pollué et de terre végétale



		Diplôme / Mention : Master 2 professionnel Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV) Parcours : Productions Végétales Spécialisées Option IC : Filières de l'Horticulture et Végétal Urbain
Auteur(s) : Mlle Marie SOURZAT Date de naissance : 24/07/1992		Organisme d'accueil : ASTREDHOR Sud-Ouest – GIE Fleurs et Plantes
Nb pages : 36 Annexes : 6		Adresse : 71, Avenue Edouard Bourlaux, CS20032 33882 Villenave d'Ornon cedex
Année de soutenance : 2016		Maître de stage : Mr Jean-Marc DEOGRATIAS
Titre français : Evaluation d'un procédé de dépollution des sols contaminés par du plomb, à l'aide de plantes ornementales associées à des microorganismes : approche de la phytoremédiation Titre anglais : Evaluation of a remediation process of soils contaminated by lead, with ornamental plants associated with microorganisms : phytoremediation approach		
Résumé : En France, le nombre de sites et sols pollués ou potentiellement pollués référencés s'élève à plus de 6000. La situation est très préoccupante notamment car les polluants ont toujours un risque de se retrouver dans la chaîne alimentaire des êtres vivants. De nombreuses techniques de dépollution sont appliquées mais elles sont très coûteuses et affectent les sols. Cependant, il existe une méthode plus respectueuse de l'environnement, utilisant des plantes pour dépolluer les sols : la phytoremédiation. La phytoremédiation regroupe un ensemble de techniques qui sont : la phytostabilisation, la rhizofiltration, la phytoextraction, la phytodégradation, la phytovolatilisation et la phytostimulation. Dans cette étude, la capacité de plantes ornementales associées à des microorganismes est évaluée à deux échelles d'étude : sur de la perlite avec inoculation au plomb et sur sol d'un site pollué. L'objectif est de savoir si les plantes sont candidates pour la phytoremédiation c'est-à-dire si elles résistent face à des sols contaminés et si elles peuvent participer à leur dépollution. Les plantes apparaissant comme potentiellement efficaces pourront être implantées directement sur un site réellement pollué. A terme, une gamme de plantes adaptées à la phytoremédiation pourra être proposée aux producteurs horticoles afin qu'ils puissent valoriser leur production et se spécialiser dans une nouvelle filière de production végétale. Bien qu'encore préliminaires, les résultats montrent que certaines plantes étudiées ont la capacité de capter le plomb.		
Abstract : In France, the number of polluted or potentially polluted sites referenced amounts to more than 6000. The situation is very worrying especially because the pollutants still a risk of ending up in the food chain of living beings. Many techniques of depollution are applied, but they are very expensive and affect soils. However, there is a more respectful way for the environment, using plants to clean up soil: phytoremediation. Phytoremediation is a set of techniques that are: phytostabilisation, rhizofiltration, phytoextraction, phytodegradation, phytovolatilisation and phytostimulation. In this study, the ability of ornamental plants associated with microorganisms is assessed at two levels of study: on perlite with lead inoculation and on polluted soil. The goal is to know whether the plants are candidates for phytoremediation that means if they resist facing the contaminated soil and if they can participate in its cleanup. The plants appearing as potentially effective can be implanted directly on a really polluted site. Eventually, a range of suitable plants for phytoremediation will be proposed to horticultural producers so that they can develop their production and specialize in a new plant production sector. Although still preliminary, the results show that some plants studied have the ability to uptake the lead.		
Mots-clés : phytostabilisation, pollution, métaux, mycorhize, paysage Key Words : phytostabilisation, pollution, metals, mycorrhiza, landscape		