

## **Phytomanagement de sites contaminés en éléments traces : le réseau européen d'essais GREENLAND**

Michel Mench, Wolfgang Friesl-Hanl, Rolf Herzig, Jaco Vangronsveld, Petra Kidd, Valérie Bert, Felipe Macias, Ingo Muller, Ioannis Dimitriou, Grzegorz Siebielec, et al.

► **To cite this version:**

Michel Mench, Wolfgang Friesl-Hanl, Rolf Herzig, Jaco Vangronsveld, Petra Kidd, et al.. Phytomanagement de sites contaminés en éléments traces : le réseau européen d'essais GREENLAND. 3. Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, Nov 2014, Paris, France. ineris-01862485

**HAL Id: ineris-01862485**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01862485>**

Submitted on 27 Aug 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Phytomanagement de sites contaminés en éléments traces: le réseau européen d'essais GREENLAND

Michel MENCH<sup>1\*</sup>, Wolfgang FRIESEL-HANL<sup>6</sup>, Rolf HERZIG<sup>3</sup>, Jaco VANGRONVELD<sup>4</sup>, Petra KIDD<sup>5</sup>, Valérie BERT<sup>7</sup>, Felipe MACIAS<sup>8</sup>, Ingo MÜLLER<sup>9</sup>, Jioannis DIMITRIOU<sup>10</sup>, Grzegorz SIEBIELEC<sup>11</sup>, Giancarlo RENELLA<sup>12</sup>, Markus PUSCHENREITER<sup>13</sup>, Aliaksandr KOLBAS<sup>1,2</sup>, Lilian MARCHAND<sup>1</sup>, Nadège OUSTRIERE<sup>1</sup>, Eléna HEGO<sup>1</sup>, Jolien JANSSEN<sup>4</sup>, Vanessa ÁLVAREZ-LOPEZ<sup>5</sup> et Silke NEU<sup>9</sup>

<sup>1</sup> : UMR BIOGECO INRA 1202, Université de Bordeaux, Bat B2, 33405 Talence et INRA, 69 Route d'Arcachon, Cestas, France, (mensch@bordeaux.inra.fr)

<sup>2</sup> : Brest State University named after A.S. Pushkin, Brest, Belarus

<sup>3</sup> : Phytotech Foundation, Berne, Suisse

<sup>4</sup> : Universiteit Hasselt, Diepenbeek, Belgique

<sup>5</sup> : Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia, CSIC, Santiago de Compostela, Espagne

<sup>6</sup> : Austrian Institute of Technology GmbH, Tulln, Autriche

<sup>7</sup> : INERIS, Verneuil en Halatte, France

<sup>8</sup> : Tratamientos Ecológicos del Noroeste, Touro, Espagne

<sup>9</sup> : Saxon State Office for Environment, Agriculture and Geology, Freiberg, Allemagne

<sup>10</sup> : Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala, Suède

<sup>11</sup> : IUNG, Pulawy, Pologne

<sup>12</sup> : Università degli Studi di Firenze, Firenze, Italie

<sup>13</sup> : BOKU, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, Autriche

**Résumé :** On présente l'efficacité de solutions de phytomanagement installées à l'échelle de la parcelle dans le réseau européen EU FP7 GREENLAND, couplant la gestion de sols contaminés en éléments traces par des options de phytoremédiation, la production de biomasse végétale à usage non-alimentaire, et la restauration écologique de services écosystémiques. Les essais évaluent les performances de la production de biomasse couplée avec les options de phytoremédiation suivantes : in situ stabilisation/phytoexclusion (Arnoldstein, Autriche ; Piekary, Pologne ; Freiberg, Allemagne), phytostabilisation et phytostabilisation aidée (Biogeco et Phytosed, France ; Touro, Espagne), phytoextraction (Lommel, Belgique ; Bettwiesen Suisse ; Högbytorp, Suède ; Freiberg, Allemagne) et phytoextraction aidée (Biogeco et Phyttaglo, France ; Touro et Piedrafitia, Espagne). Trois exemples de phytomanagement sont illustrés.

**Introduction :** Le phytomanagement de sols contaminés consiste à coupler des phytotechnologies conçues pour réduire les sources de contaminants et/ou les voies d'exposition des cibles biologiques, avec la production d'une biomasse végétale valorisée par des usages non-alimentaires et la restauration écologique de services écosystémiques [1, 2]. Ce paradigme se développe dans le contexte de redonner un usage aux zones marginales afin de ne pas changer l'usage des sols agricoles et la sécurité alimentaire des populations. Trois types de couvert végétal ont un potentiel pour le phytomanagement, i.e. des graminées pérennes à fort développement, des ligneux, et des cultures annuelles. Selon les éléments traces contaminant les sols, la présence ou non d'autres contaminants dont des xénobiotiques organiques, l'intensité et la variabilité spatiale de la contamination, le choix de l'assemblage de végétaux peut avoir potentiellement plusieurs actions simultanées sur les contaminants du sol et/ou voies d'exposition: e.g. pour un assemblage de peupliers, saules et graminées, la phytostabilisation du pool labile de Cu et Pb, la phytoextraction du pool labile de Zn et Cd, et la rhizodégradation de xénobiotiques organiques. Les performances des solutions de phytomanagement les plus prometteuses pour les sols contaminés en éléments traces (TECS), e.g. taillis à courte rotation et graminées (phytostabilisation et phytostabilisation aidée), taillis à courte rotation et cultures d'accumulateurs secondaires (phytoextraction, phytoextraction aidée et in situ stabilisation / phytoexclusion, sont évaluées dans un réseau européen de 14 grands essais sur le terrain, coordonnés dans le projet FP7 GREENLAND (<http://www.greenland-project.eu/>) (Tab. 1). L'efficacité est évaluée sur différents services écosystémiques dont la stabilité du couvert végétal, l'approvisionnement en biomasses valorisables (e.g. secteur énergétique, fibres et écomatériaux, panneaux de particules, huiles, huiles essentielles, chimie biosourcée, etc.) et la restauration de paramètres écologiques (e.g. habitat pour les communautés microbiennes et animales, filtration de l'eau, séquestration du carbone, grands cycles biogéochimiques). D'autres paramètres connexes sont évalués dont la résistance aux stress abiotiques et biotiques, l'influence des conditions climatiques, les sens de variation qualitatifs et quantitatifs des voies d'exposition. Les essais sur sites couvrent un large éventail de scénarios de

contamination et d'usages choisis dans le plan de gestion (e.g. sols agricoles contaminés par des retombées de poussières, contamination historique par des dépôts de déchets, de sédiments, de boues urbaines ou de résidus miniers, épandages de lixiviats de décharges, et friches post-industrielles) [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

**Matériel et méthodes :** L'essai d'Arnoldstein (Autriche) couple in situ stabilisation (amendements : GSF - boues de gravière et oxydes de Fe ; LP- poudre limoneuse) et phytoexclusion avec du maïs ou des graminées [5]. Le sol (Dystric Cambisols) est contaminé (mg/kg) par Pb (950), Zn (500), Cd (5), et dans une moindre mesure Cu et As. Deux cultivars de maïs (DieSamanta, Falkone) ont été cultivés en 2012 et 2013. Le site Biogeco est une friche ayant eu une activité de traitement du bois (France). Des assemblages de peuplier, saules et faux indigo, des graminées pérennes et des plantes accumulatrices secondaires (Cu) sont cultivées sur ses sols contaminés en Cu et Cu/HAPs [1]. Dans l'essai de phytomanagement basé sur la phytoextraction aidée, une rotation tournesol/tabac est évaluée pour la production d'huile, de bioéthanol et la chimie biosourcée. Trois mutants résistants aux métaux (Mutants 1, 2 et 3), une lignée parentale (IBL 04) et 2 cultivars (Salut, Energic) de tournesol ont été cultivés pour déterminer leur production de parties aériennes, le rendement en graines et les quantités de Cu phytoextraites. Dans les essais de phytomanagement avec taillis à rotation courte (TCR) et phytostabilisation aidée, 3 amendements du sol sont comparés par rapport au sol non traité (UNT): compost (OM, 5%), dolomie (DL, 0,2%), et combinaison de OM et DL (OMDL).

**Tableau 1. Solutions de phytomanagement dans le réseau européen GREENLAND**

Assemblage de végétaux	Poacées, graminées pérennes (Phénotype d'exclusion)	Cultures annuelles Accumulateurs secondaires	Taillis à courte rotation (TCR) ou plantation (P)	Hyperaccumulateurs (pérennes ou annuels)
Retombées atmosphériques	Orge, Maïs (Cd/Zn) <sup>1</sup> Colza, blé, orge (As, Cd, Pb) <sup>14</sup> , Graminées (As, Cd, Pb) <sup>14</sup> et (Cd/Zn) <sup>1</sup>	Tabac, Tournesol, Colza, Chanvre, Maïs (Cd/Zn) <sup>2</sup>	TCR Peuplier, Saules (Cd/Zn) <sup>2</sup> TCR Peuplier, Saules (As, Pb, Cd, Zn) <sup>3</sup>	<i>Pteris vittata</i> (As) <sup>5</sup>
Retombées atmosphériques et dépôts de déchets		Tabac, Tournesol (Cd/Zn) <sup>10</sup>		
Traitement du bois <sup>7</sup>	Vétiver, Miscanthus <i>Agrostis</i> sp., <i>Dactylis glomerata</i> (Cu ; Cu/HAPs) <sup>7</sup>	Tabac, Tournesol (Cu) <sup>7</sup>	TCR Peuplier, Saules, Faux molle, <i>Cytisus stratus</i> P : peuplier, pin sylvestre (Cu, HAPs)	
Déchets miniers	<i>Agrostis</i> sp.	Tabac, Tournesol (Cd/Zn, Pb) <sup>6</sup> Tabac, Tournesol (Cu) <sup>4</sup>	<i>Salix smithiana</i> , <i>S. atrocinerea</i> in (monoculture & inter-cropping with <i>Alnus glutinosa</i> ), <i>Salix</i> cv. Tora (Cd/Zn, Pb) <sup>6</sup>	Assemblage <i>Noccaea ceauslescens</i> (Zn/Cd) <sup>6</sup> / <i>Lolium comiculum</i>
Crassier de métallurgie, friche industrielle	<i>Festuca rubra</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>F. arundinacea</i> , <i>F. ovina</i> , <i>Festulolium</i> , <i>Agrostis alba</i> , <i>Lolium perenne</i> , <i>A. canina</i> , <i>A. capillaris</i> , <i>Dactylis polygama</i> , <i>Deschampsia caespitosa</i> , <i>Puccinella distans</i> (Pb, Zn, Cd) <sup>12</sup>		<i>Salix viminalis</i> <sup>9</sup>	
Régilage de sédiments			Saules (Inger, Tordis), <i>Deschampsia caespitosa</i> (Cd, Zn) <sup>8</sup>	
Epanchage de boues/percolats de décharge			Saules, Peuplier (Cd,Zn) <sup>11, 13</sup>	
			Saules, Peuplier (Cu, Pb) <sup>11, 13</sup>	

1 : Arnoldstein (Autriche) [5]; 2 : Lommel/Balen (Belgique) [4]; 3 : Freiberg – Halsbrücke (Allemagne), 4 : Touro (Espagne) 5 : Reppel (Belgique/France), 6 : Piedrafita (Espagne) ; 7 : Biogeco (France) [1]; 8 Fresnes sur Escault Phytosed (France) ; 9 : Phyttaglo (France) ; 10 : Bettwiesen (Suisse) [3]; 11 : Högbypörp (Suède) ; 12 : Piekary Śląskie (Pologne) [9]; 13 : French trial (Suède) ; 14 : Freiberg – Hilbersdorf (Allemagne)

■ In situ stabilisation/phytoexclusion; ■■■■ Phytoextraction (aidée) ; □ : Phytostabilisation (aidée)  
hachures : phytostabilisation aidée et rhizodégradation de xénobiotiques organiques

**Résultats et discussion :** on illustre 3 solutions de phytomanagement

### Phytomanagement / phytoextraction aidée par des cultures annuelles d'accumulateurs secondaires :

On présente des données pour le site Biogéco et les tournesols. La mortalité, la hauteur des tiges, les masses fraîches (MF) et sèches (MS) des parties aériennes et des capitules, et la distribution du Cu dans les organes des plantes ont été déterminées selon les génotypes de tournesol et l'exposition croissante au Cu. Tous les tournesols ont survécu et se sont développés même aux fortes teneurs en Cu dans le sol. Le rendement des parties aériennes varie entre 3-15 Mg DW ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (avec 2 exceptions à 30) selon les génotypes, les traitements du sol, et l'exposition au Cu (Fig. 1a). Il est maximum pour tous les génotypes dans les parcelles OMDL (amendement : compost et dolomie) aux concentrations intermédiaires en Cu dans le sol (239-518 mg Cu kg<sup>-1</sup>). La biomasse MS des parties aériennes affecte négativement leur concentration

en Cu. Aux fortes concentrations du sol en Cu (753-1140 mg kg<sup>-1</sup>), les concentrations en Cu les plus élevées dans les parties aériennes (62-80 mg Cu/kg DW) sont obtenues avec les tournesols Salut, IBL04, M1 et M2 sur le sol OMDL. Aux teneurs du sol plus faibles en Cu, les concentrations en Cu des parties aériennes sont similaires pour les génotypes, avec cependant 2 valeurs plus élevées pour le mutant M1. Les concentrations en Cu dans les parties aériennes sont corrélées positivement avec celles en Al, Fe, B, Mg et Na et négativement avec celles en P. Les concentrations en Cu des organes végétaux décroissent selon l'ordre: racines > feuilles > inflorescence (contenant capsules et graines) > tige. L'exportation de Cu par les parties aériennes (en g Cu ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup>) varie en général de 15 (Mutant 2 pour le sol contrôle) à 140 (Mutant 2 pour des blocs #3) (Fig. 2b). Dans 2 parcelles des quantités supérieures sont atteintes (i.e. en g Cu ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup>, 170 pour IBL04 et 260 pour le mutant M2). Aux fortes concentrations en Cu dans le sol, dans 3 parcelles OMDL sur 4, les mutants M1 et M2 accumulent plus de Cu dans la biomasse aérienne que la lignée parentale et les 2 variétés commerciales.

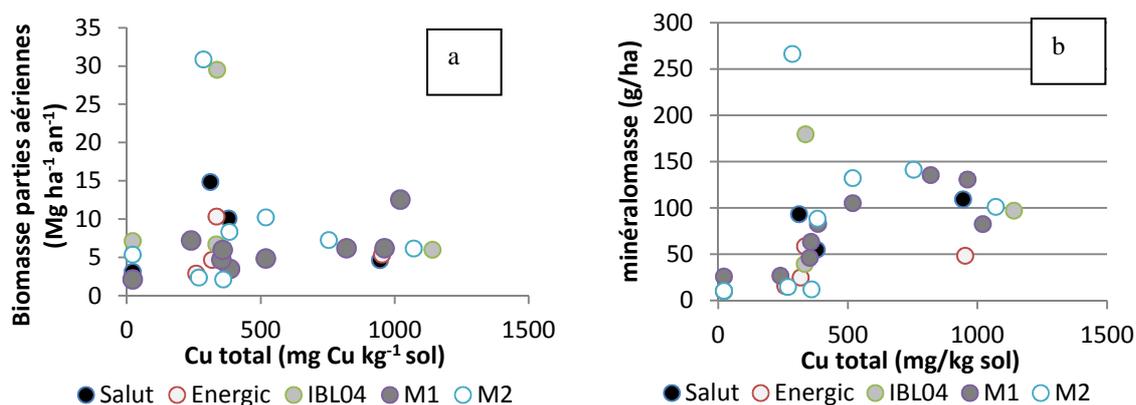


Figure. 1. (a) Biomasses (MS) et (b) minéralomasses des parties aériennes de tournesol selon les génotypes et la concentration en Cu total du sol (0-25 cm)

**Phytomanagement – Phytostabilisation aidée :** La comparaison des modalités sur le site Biogeco après 5 ans de phytomanagement basé sur la phytostabilisation aidée et un assemblage de ligneux en taillis à courte rotation et des graminées met en évidence des différences entre les sols non amendés et ceux avec un mode de gestion couplé à l'apport d'amendements et l'inoculation des arbres par des ectomycorhizes. L'efficacité des amendements pour limiter la concentration totale en Cu dans la solution du sol est : DL > OMDL > OM, mais la concentration en cations Cu<sup>2+</sup> est certainement moindre dans OMDL et OM, comme l'indique indirectement un biotest avec le haricot. Pour restaurer un couvert végétal, l'ordre d'efficacité est: OMDL > OM > DL.

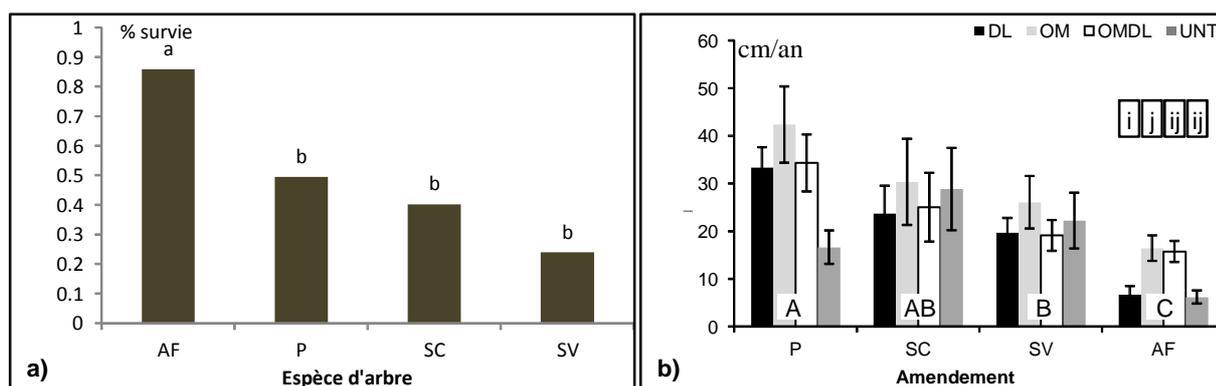
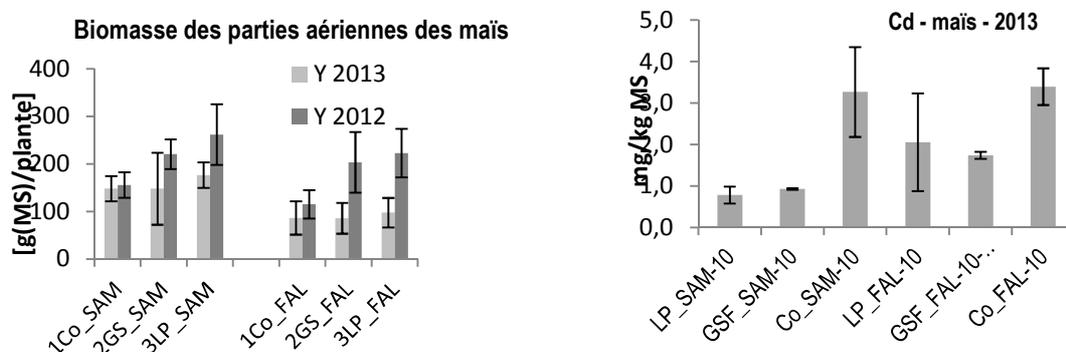


Figure. 2. (a) taux de survie (%) des espèces implantées sur les sols contaminés. (b) variation de l'accroissement en hauteur des peupliers (*P. nigra*, P), des saules (*S. caprea*, SC ; *S. viminalis*, SV) et des faux-indigo (*Amorpha fruticosa*, AF) selon les amendements. Les barres verticales représentent les erreurs standards. Les majuscules correspondent aux différences entre espèces, (i, j) les différences entre amendements DL, OM, OMDL et UNT.

*Amorpha fruticosa* (faux indigo) a le taux de survie le plus important sur l'ensemble des parcelles. Le taux de survie du peuplier noir et des saules augmente avec la mycorhization. *Populus nigra* a la croissance la plus importante, suivi de *S. caprea*. La croissance des arbres est plus faible dans DL par rapport à OM. Le ionome des feuilles des arbres dépend des essais, de l'espèce considérée et de la mycorhization initiale. Globalement la concentration foliaire en Cu des peupliers et saules reste faible (7 à 35 mg/kg MS) confirmant leur phénotype d'exclusion pour cet élément.

**In situ stabilisation/phytoexclusion :** En 2012, les biomasses des parties aériennes du maïs sont plus élevées dans les parcelles dont le sol a été amendé par GSF et LP par rapport au sol non amendé (Fig. 3a). L'influence des 2 amendements et du cultivar sur la biomasse est statistiquement similaire. En 2013, les biomasses sont plus faibles à cause du printemps froid et humide. En 2013 pour le cultivar de maïs DieSamanta, les concentrations foliaires en Cd sont diminuées par les traitements GSF et LP (Fig. 3b). Pour Falkone, seul le traitement GSF a abaissé la concentration foliaire en Cd. Les traitements GSF et LP ont réduit les concentrations foliaires en Pb et Zn pour les deux cultivars, avec un effet maximal pour Pb et DieSamanta dans le traitement LP et pour Zn avec Falkone dans le traitement GSF.



**Figure 3. (a) Biomasse et (b) concentration en Cd des parties aériennes du maïs produit à Arnoldstein en 2012 et 2013 (Co= sol non amendé, GS = boues de gravière et Fe, LP = poudre de limon, SAM = Maïs cv. DieSAMANTA, FAL = Maïs cv. FALKONE)**

**Conclusion :** La validation du phytomanagement en parcelles sur site (à moyen et long termes) est une nécessité absolue avant l'implantation de modalités de gestion sur l'ensemble des zones d'un site, selon la variabilité spatiale des relations sources-voies d'exposition-cibles et les usages choisis.

## Références

- [1] Kolbas, A., Mench, M., Herzig, R., Nehnevajova, E., Bes, C.M. (2011). Copper phytoextraction in tandem with oilseed production using commercial cultivars and mutant lines of sunflower. *International Journal Phytoremediation* 13 Suppl 1, 55-76.
- [2] Witters, N., Van Slycken, S., Weyens, N., Thewys, T., Meers, E., Tack, F., Vangronsveld J. (2012). Phytoremediation, a sustainable remediation technology? II: Economic assessment of CO<sub>2</sub> abatement through the use of phytoremediation crops for renewable energy production. *Biomass and Bioenergy*, 39, 470-477.
- [3] Herzig, R., Nehnevajova, E., Pfister, C., Schwitzguébel, J.P., Ricci, A., Keller, C. (2013). Feasibility of labile Zn phytoextraction using enhanced tobacco and sunflower: results of five- and one-year field scale experiments in Switzerland. *International Journal of Phytoremediation*, 16, 735-754
- [4] Van Slycken, S., Witters, N., Meiresonne, L., Meers, E., Ruttens, A., Van Peteghem, P., Weyens, N., Tack, FMG, Vangronsveld, J. (2013). Field evaluation of willow under short rotation coppice for phytomanagement of metal-polluted agricultural soils. *International Journal of Phytoremediation*, 15, 7, 677-689.
- [5] Friesl-Hanl, W., Waldner, G., Horak, O., Platzer, K., Gerzabek, M.H. (2013). Risk Assessment and remediation of a Cd, Pb, and Zn contaminated grassland, 12<sup>th</sup> International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements (ICOBTE), June 16<sup>th</sup>- 20<sup>th</sup>, Athens, Georgia, USA
- [6] Dimitriou, I., Rosenqvist, H., Berndes, G. (2011). Slow expansion and low yields of willow short rotation coppice in Sweden; implications for future strategies. *Biomass and Bioenergy*, 35, 4613-4618.
- [7] Van Slycken, S., Witters, N., Meers, E., Peene, A., Michels, E., Adriaensen, K., Ruttens, A., Vangronsveld, J., Du Laing, G., Thewys, T., Tack, F.M.G. (2013). Safe use of metal contaminated agricultural land by cultivation of energy maize (*Zea mays*). *Environmental Pollution*, 178: 375-380.
- [8] Ruttens, A., Boulet, J., Weyens, N., Smeets, K., Adriaensen, K., Meers, E., Van Slycken, S., Tack F., Meiresonne, L., Thewys, T., Witters, N., Carleer, R., Dupae, J., Vangronsveld, J. (2011). Short rotation coppice culture of willow and poplar as energy crops on metal contaminated agricultural soils. *International Journal of Phytoremediation*, 13, 194-207.
- [9] Stuczynski, T., Siebielec, G., Daniels, W., McCarty, G., Chaney, R. (2007). Biological aspects of metal waste reclamation with biosolids. *Journal of Environmental Quality*, 36, 1154-1162

## Remerciements

Les travaux sur la plate-forme de phytoremédiation Biogeco ont été soutenus par l'ADEME, Départ. des friches urbaines et sites pollués, Angers, France (Mme F. Cadière), l'Université de Bordeaux 1, Département des Relations Internationale via le programme Erasmus Mundus Lot 6 de la Commission Européenne et les Actions COST 859 et FA905. Les travaux du réseau Greenland sont soutenu par la Commission Européenne (7<sup>th</sup> Framework Programme for Research, FP7-KBBE-266124, GREENLAND).