

Phytomanagement de sols contaminés et/ou dégradés : de la sélection des assemblages plantes-microorganismes aux processus et fonctions écologiques sources de services écosystémiques

Les activités anthropiques à l'origine de la contamination des sols, locales ou diffuses, sont multiples : mines, métallurgie et fonderies, industries pétrolière, papetière, chimique et automobile, transport, électronique, traitement des bois et de surface, chauffage utilisant des combustibles fossiles, câbles, équipements électriques et batteries, construction et travaux publics, herbicides et pesticides, décharges et incinérateurs, armes et munitions, peintures, verre et cristallerie, etc. Dans l'Union Européenne (UE), les sites potentiellement contaminés (PCS) sont estimés à 2,5 millions, dont 127 000 sites contaminés (CS) et 58000 remédiés (Panagos et al. 2013). Dans la zone Sud-Ouest de l'Europe (Sudoe), l'Espagne a identifié 71202 PCS et 285 CS. La France a recensé 591 CS en Aquitaine, 84 en Auvergne, 63 en Poitou-Charentes, 176 en Midi Pyrénées et 96 en Languedoc Roussillon (MEDD 2016). La gestion des sites européens contaminés couterait près de 6 milliards euro/an. Le sol, ressource essentielle et non renouvelable, a des fonctions vitales dans la biosphère. Sa contamination, due à des substances chimiques en excès par rapport au fonds pédogéochimique, abaisse la capacité du sol à exercer des fonctions écologiques et générer des services écosystémiques (1) de support, (2) de régulation, (3) d'approvisionnement et (4) culturels. Elle peut nuire à la qualité de l'eau, la biodiversité structurelle et fonctionnelle des communautés végétales, animales et microbiennes, la régulation du cycle des éléments et des cycles de vie, la sûreté des aliments et la santé humaine, etc. Selon la Communauté Européenne, l'excès d'éléments traces (TE) d'origine anthropique est une des 8 principales menaces pour les sols européens (COM 2002, 179 final). Le besoin de conserver la biodiversité des sols et de protéger les processus et fonctions écologiques sources de services écosystémiques est clair; développer des technologies durables pour réhabiliter les sols contaminés est une priorité pour les législations nationales et européennes et la recherche : Stratégie de la biodiversité, UE Horizon 2020; 7^{ème} programme d'action pour l'environnement (7EAP); FAO Gestion durable des terres-biodiversité des sols; plan stratégique espagnol pour le patrimoine naturel et la biodiversité; programmes français (e.g. Mobilis Biodiversa) et de l'ADEME: Production, transformation et valorisation de la biomasse (GRAINE); plan stratégique portugais pour la nature et conservation de la biodiversité; programmes UE NATURA 2000 et MEDWET pour protéger in situ des écosystèmes, etc.

Des techniques de remédiations diverses et complémentaires : celles issues du génie civil, thermiques ou physico-chimiques (e.g. encapsulation, vitrification, excavation et décharge, lavage chimique, etc.) ont souvent une efficacité mais un fort impact environnemental, e.g. perte de la structure et des fonctions du sol, avec des coûts élevés (<http://www.upds.org/>; <http://www.ademe.fr/expertises/sols-pollues/passer-a-laction/depollution-sols>). Elles peuvent être adaptées aux petits CS mais pas aux très grands. Une alternative, le **phytomanagement**, i.e. combinaison à long terme de la production d'une biomasse végétale rentable avec des options douces de remédiations (GRO, gentle remediation options) diminuant graduellement les liens de pollution et rétablissant des fonctions écologiques sources de services écosystémiques, peut-être moins invasif, plus avantageux et durable. Sa mise en œuvre dépend de nombreux paramètres: contaminants, leur localisation, l'évaluation des risques, contraintes de temps, usages choisis dans les plans de gestion, valeurs des terres, etc.

En quoi le phytomanagement de terrains contaminés ou dégradés est-il une opportunité ? Il peut inverser les impacts de facteurs de stress abiotique sur la biodiversité et produire des cultures renouvelables pour la bioénergie, la chimie biosourcée et les écomatériaux. Ceci contribue aux objectifs de l'UE sur les énergies renouvelables (directive européenne 2009/28/CE) et réduit le détournement de terres agricoles pour produire des biocarburants. L'incorporation de matières organiques (bio)stabilisées dans les GRO participe aussi à l'économie circulaire.

Les GRO englobent la stabilisation *in situ* (inactivation) et des techniques de phytoremédiation associant plantes et microorganismes (Vangronsveld et al 2009; Mench et al 2009, 2010; Kidd et al 2015). Pour les sites contaminés en TE, les GRO visent à diminuer leur pool labile (disponibilité environnementale) et concentrations dans les fractions rechargeant rapidement la solution du sol via (1) via leur exportation dans les parties végétales récoltées (phytoextraction) ou (2) leur rétention dans les systèmes racinaires de plantes à phénotype d'exclusion (phytostabilisation). Ces 2 types de GRO peuvent être optimisés par des amendements au sol et l'inoculation des plantes par des microorganismes (e.g. ecto- et endomycorhizes, plant-growth promoting bacteria, bactéries endophytes) (Sessicht et al 2013 ; Kidd et al 2015). Pour les sols agricoles contaminés en TE, la sûreté sanitaire des récoltes est améliorable en combinant l'inactivation des TE en excès et la phytoexclusion. La sélection des plantes (variabilité inter- et intra-spécifiques), les modes de culture améliorants et les interactions plantes-microorganismes peuvent accroître le succès du phytomanagement. Il peut améliorer la diversité microbienne, la séquestration du carbone, la migration des contaminants par l'eau et l'érosion, l'exposition de l'herbivorie, etc. Le phytomanagement est passé du laboratoire au déploiement en démonstration sur sites: projets Phytoagglo (Creil, INERIS 2013), Phytosed et Demophyto (Fresnes/Escaut, Bert et al 2012 ; INERIS 2013), Physafimm (Rive de Gier, Bouchardon et al 2014 ; Oustrière et al 2016), PhytoDEMO (St Médard d'Eyrans, INRA, Mench et al 2013), Pierrelaye (Foulon et al 2016), Phytener (ISA Lille, Douay et Bidar 2015). Les études à long terme sur la fonctionnalité, biodiversité structurelle et fonctionnelle, processus, fonctions écologiques, résilience (e.g. changements climatique et globaux) et services écosystémiques des sols contaminés sous phytomanagement progressent. Elles sont cruciales pour démontrer l'efficacité et durabilité du phytomanagement en tant que méthode de bioremédiation. La Chine, où au moins 16% des sols arables sont contaminés, a annoncé en 2016 un plan national pour leur remédiation incluant les GRO et le phytomanagement (<http://www.reuters.com/article/us-china-environment-soil-idUSKCN0YMOYO>).

Pourquoi le phytomanagement n'est-il pas souvent utilisé, malgré le savoir disponible ? De vastes zones de terres contaminées, laissées sans intervention à cause du coût des méthodes conventionnelles, pourraient être phytomanagées. Beaucoup de parties prenantes connaissent peu les avantages potentiels des GRO d'où leur faible utilisation. Elles sont à sélectionner et adapter à chaque zone d'un site, à valider en parcelles (en parallèle à la ou les meilleures autres techniques de remédiation disponibles) avant déploiement à la zone, et nécessitent ou non une (bio)surveillance.

Pour augmenter la sélection des GRO dans les études de faisabilité et les stratégies de remédiation, une option est de démontrer leur efficacité et limites dans des réseaux de sites contaminés, avec des parcelles non traitées, phytomanagées et de références dans les zones climatiques européennes (ou autres. A la suite des projets EU GREENLAND (<http://www.greenland-project.eu/>), TIMBRE (<http://www.timbre-project.eu/megasites-large-and-complex-contaminated-sites.html>) et du réseau CABERNET, http://ec.europa.eu/regional_policy/archive/conferences/sustainable-growth/doc/rfec_brownfield_en.pdf), 2 projets EU, PhytoSUDOE (<http://www.phytosudoe.eu/>) et INTENSE (www.nibio.no/en/prosjekter/intense), visent à démontrer sur sites le potentiel du phytomanagement pour gérer durablement des terrains contaminés/dégradés (zone Sudoe : Portugal, France et Espagne ; sols marginaux/contaminés pour la production de biomasse : France, Belgique, Espagne,

Italie, Allemagne, Pologne et Norvège), rétablir des fonctions écologiques des sols et *in fine* proposer des usages/services écosystémiques pour ces sites remédiés en zones péri-urbaines, rurales ou naturelles. Ces réseaux d'essais couvrent des situations variées de sources de contamination et usages de terrain (i.e. contamination diffuse d'activité industrielles, friches industrielles péri-urbaines et zones urbaines, stériles miniers, trame verte, etc.), de conditions environnementales (type de sol, contaminants, intrants et exposition, etc.), d'espèces végétales et de GRO. La nature multidisciplinaire des projets accroît la collaboration, l'échange de connaissances et l'expertise sur la remédiation des sols. Ces projets sont ouverts sur les parties prenantes et porteurs d'enjeux dans chaque pays et région participante, pour permettre un transfert des résultats aux secteurs concernés, e.g. réglementation, industries et consultants, et autres régions.

Fronts de science - Optimiser les options de phytomanagement: nécessite une sélection adéquate de végétaux et microorganismes (souvent en conservant sur sites des ressources génétiques tolérantes aux contaminants) et de joindre des techniques agronomiques et d'ingénierie écologique au processus de remédiation. La proposition d'assemblages, de trajectoires et mode de gestion pour ces écosystèmes doit intégrer les paramètres des filtres abiotiques (conditions pédoclimatiques, ressource en eau et nutriments, etc.) et biotiques. Les cultures ligneuses (taillis à courte rotation, TCR) et annuelles à forte biomasse sont des candidats potentiels (Fig. 1 et 2). Des systèmes de culture sont à concevoir pour maintenir la matière organique du sol et améliorer la structure, l'activité biologique et la fertilité du sol (e.g. cultures de légumineuses). Incorporer des amendements organiques (composts, biochar) peut stimuler ces paramètres et la croissance des plantes en sols contaminés, sans oublier les effets non-intentionnels sur la mobilité de TE sous forme d'oxyanions. Une moindre dépendance aux engrains minéraux accroît la durabilité et rentabilité du système. Une bioaugmentation avec des micro-organismes associés aux végétaux (champignons mycorhiziens, rhizobactéries, bactéries et champignons endophytes) peut améliorer la croissance des plantes, réduire le stress et/ou modifier la mobilité des métaux/métalloïdes et leur absorption et accumulation par les plantes (Sessitsch et al 2013 ; Kidd et al 2015).

L'hétérogénéité des terrains contaminés peut induire une incertitude, e.g. moindre établissement ou performance des plantes à cause de la phytotoxicité des contaminants, du manque de nutriments, des maladies et ravageurs, etc. Des mesures correctives existent pour gérer les plantes et limiter ces incertitudes. Disposer d'un large choix d'espèces (cultivars ou populations) végétales et de microorganismes pour créer des assemblages permet de minimiser cette incertitude. Le changement climatique et les événements extrêmes, plus fréquents (vague de chaleur, sécheresse longue, pluie de type Cévenole, gel tardif, etc.) sont à intégrer dans les scénarios proposés pour atteindre les écosystèmes visés et leur complexité.

Les groupes de travail (WP) du projet PhytoSUDOE : son consortium comprend 10 partenaires (centres de R&D, universités et collectivités locales) et 4 modules de travaux: WP1: Caractérisation et évaluation des risques de sites contaminés/dégradés; mise en œuvre d'options de phytomanagement appropriées ; WP2: explorer les perspectives d'ingénierie écologique liées à la diversité fonctionnelle pour améliorer l'efficacité du phytomanagement ; WP3: caractériser et évaluer la biodiversité selon les options de phytomanagement ; WP4: récupération de fonctions écologiques liées aux services écosystémiques clés de sites phytomanagés. Le réseau PhytoSUDOE comporte 11 essais sur sites, de moyen et long terme, sur des zones contaminées ou dégradées de la région Interreg Sudoe. À certains sites, des options de phytomanagement ont été mises en œuvre et seront optimisées, tandis que sur d'autres le phytomanagement sera établi au cours de PhytoSUDOE. Les sites évaluent 3 GRO : stabilisation *in situ*, phytostabilisation aidée et phytoextraction.

Les options de phytomanagement sont sélectionnées par l'évaluation des risques, la caractérisation du site, le guide des meilleures pratiques (cf Greenland) et des outils d'aide à la décision pour appliquer les GRO sur site. Le WP2 conçoit et développe des stratégies pour améliorer la fonctionnalité des sols, la productivité des plantes, l'offre et la qualité des habitats pour les organismes, en utilisant des inoculants microbiens et cultures intercalaires. Le WP3 caractérise la diversité phylogénétique et fonctionnelle des communautés d'organismes des sols en lien avec les options de phytomanagement, (en comparaison aux sols contaminés non traités et sols de référence non contaminés). La possibilité de services écosystémiques est évaluée dans le WP4.

En établissant les mêmes options de phytomanagement à plusieurs sites du territoire Sudoe, on recherche leur transfert potentiel vers d'autres sites Sudoe et au-delà. Des indicateurs de la santé des écosystèmes pour les sols phytomanagés sont recherchés. Les parcelles expérimentales seront maintenues après la fin du projet et un plan de communication permettra un transfert aux parties prenantes et grand public.

PhytoSUDOE réunit des experts dans les domaines de l'écologie microbienne, écologie et écophysiologie végétale, agronomie, géologie et sciences du sol, aménagement du paysage et évaluation des risques. Des activités de diffusion et de communication sont prévues pour cibler trois groupes d'intervenants à l'échelle transnationale : (1) la communauté scientifique; (2) les parties prenantes et les utilisateurs finaux, y compris les politiques et les décideurs, et (3) le grand public. La Mairie de Vitoria-Gasteiz, le Département de l'Environnement et de la Santé publique (Espagne) et l'Institut National de l'Energie et de Géologie (Portugal) sont des partenaires actifs. Les autres partenaires associés sont :

Administration : Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras, Xunta de Galicia (ES) ; Dept Parcs & Jardins, Site Parc aux Angéliques de Bordeaux Métropole (FR). *Entreprises et industries* : Lyonnet SA (société de traitement du bois), St Médard d'Eyrans (FR) ; Florentaise (producteur de biochars), Labouheyre (FR); EDM - Société de développement minier (PT) ; ENUSA Industrias Avanzadas, S.A. (ES) ; GEOALCALI (ES). *Consultants en environnement* : Ceban (ES) ; Arcadis (Labège, FR); Tereo (Cenon, FR).

Grâce à l'engagement des parties prenantes, des données qualitatives et quantitatives sur la biodiversité seront fournies et utilisées pour conseiller les décideurs politiques (rétroactions), développer des lignes directrices transnationales pour la protection des sols et la remédiation des écosystèmes. Les journées techniques permettront aux intervenants des régions et pays d'échanger des retours d'expériences et des résultats du projet entre eux.

PhytoSUDOE complète les déclarations politiques et des plans nationaux et régionaux.

Espagne : El Plan Estratégico del Patrimonio Natural y la Biodiversidad 2011-2017 (Real Decreto 1274/2011) ; Plan Estratégico de Conservación Vegetal 2014-2020. Stratégies nationales / régionales d'innovation pour la spécialisation intelligente (RIS3) –Politique de Cohésion 2014-2020 ; le ministère du Développement économique et de la compétitivité du Gouvernement Basque veut améliorer la recherche et la technologie qui sont une opportunité pour la compétitivité et le développement.

France : (et régions SUDOE comme l'Aquitaine) le 3^{ème} Plan Environnement - Santé (PNSE3, 2015-2019) aborde le rôle des expositions environnementales dans plusieurs maladies en croissance, les actions pour une meilleure qualité de l'environnement et la réduction des risques liés aux sols contaminés. D'autres programmes français sur le thème sont: Mobilis (Biodiversa) est un cadre pour modéliser les relations entre changement d'usage du sol, changement climatique et les habitats pour les oiseaux ; INDICS: indicateurs participatifs de la biodiversité des sols et des services écosystémiques ; ToPoBiov : Tolérance aux polluants au sein de la diversité végétale de sites contaminés. UNION Biodiv : évaluation sociologique et écologique de la biodiversité d'une friche

industrielle urbaine en reconversion; Biotrophe : influence de la biodiversité sur le transfert des contaminants dans la chaîne alimentaire ; RESBIOFONC évaluation et propositions de méthodes de gestion favorisant la restauration d'une biodiversité fonctionnelle en lien avec le changement d'usage des terres ; ORDYNORD (FRB); DEMOphyto et Phytoagglo (Ademe/INERIS) ; GESSOL, etc.

Portugal : La stratégie de recherche et d'innovation (2014-2020) y compris l'action IV (ressources naturelles et environnement) qui appuie les recherches visant à réhabiliter les sols et valoriser des systèmes et technologies pour améliorer la protection de la biodiversité des sols.

Le projet PhytoSUDOE complète et bénéficie des résultats d'autres projets européens en cours : PHYTO2ENERGY (FP7 - en cours jusqu'en 2018) qui développe et valide des options de phytomanagement avec des cultures énergétiques, mais n'évalue pas les avantages de la biodiversité ou de la fonctionnalité du sol en liens avec les services écosystémiques.

ERA-NET cofund FACCE SURPLUS (Agriculture, changement climatique et sécurité alimentaire) : Le projet INTENSE vise à reconvertir des terres marginales et polluées pour une production agricole durable à travers l'Europe, en se concentrant sur le développement de systèmes liés à la transformation de biomasses en énergie et nouveaux produits. Le projet MISCOMAR est dédié à produire du Miscanthus sur les terres contaminées et marginales. AGRONICKEL développe le phytomining du Ni sur les terrains Ultramafic en Europe. BioC4 intègre la production de Miscanthus et la synthèse biologique d'iso-butanol.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1 Phytomanagement d'un ancien site de préservation de bois (contamination du sol en Cu) : (a) décompactage de l'horizon de surface ; et en année 9 (b) taillis à courte rotation de peupliers et saules, (c) assemblage de graminées et (d) cultures annuelles (rotation tournesol – tabac).

Réseau des écotoxicologues de l'INRA

Fiche thématique N°9 - juin 2017



(a)



(b)

Fig. 2 Phytomanagement d'un ancien site de préservation de bois (contamination du sol en Cu ; année 9) : (a) *Miscanthus x giganteus* et (b) vetiver

Contacts

Michel Mench

UMR 1202 BIOGECO INRA, Université de Bordeaux, Bat B2, Allée G. St-Hilaire, 33615 Pessac cedex, France



Pour en savoir plus

To subscribe to the newsletters: [phitosudoe@gmail.com](mailto:phytosudoe@gmail.com), <http://www.phytosudoe.eu/>

PhytoSUDOE (Demonstration of the improvement in soil biodiversity, functionality and ecosystem services through phytomanagement in contaminated and degraded soils within the Interreg Sudoe; SOE1/P5/E0189)

INTENSE project (ANR-15-SUSF-0007-06; <http://faccesurplus.org/research-projects/intense/>; www.nibio.no/en/prosjekter/intense)

Réseau des écotoxicologues de l'INRA

Fiche thématique N°9 - juin 2017



Bibliographie citée

- Bert V., Hadj-Sahraoui A., Leyval C., Fontaine J., Ouvrard S., 2012. Les Phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués. Ademe, EDP sciences. <http://www.ineris.fr/centredoc/phytotechnologies-ademe-2013-1463054029.pdf>
- Bert V., 2016 Les phytotechnologies dans l'aménagement des sites pollués http://parcsinfo.seine-saint-denis.fr/IMG/pdf/RT/2016/V_BERT.pdf
- Bouchardon J.L., Faure O., Espagnol G., Moutte J., Guy B., Mimoun D., Graillot D., Paran F., Croze V., Athénol J.D., Ferrando B., Boisson J., Perret S., Hitmi A., Verney P., Moussard Gauthier C., Ledoit G., Goupil P., Sac C., Oustrière N., Marchand L., Kolbas A., Mench M., 2014 – PHYSAFIMM: la phytostabilisation, méthodologie applicable aux friches industrielles, métallurgiques et minières, Rapport final. ADEME, pp 158.
- COM 2002, 179. final Communication from the Commission to the Council and the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Towards a thematic strategy for soil protection. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52006DC0231>
- Douay F., Bidar G., 2015. PHYTENER : développement de la phytostabilisation sur des sols contaminés par des métaux à des fins énergétiques. Viabilité écologique, intérêt social et bilan économique. Note de synthèse. ADEME, ISA. <http://www.ademe.fr/phytener-developpement-phytotabilisation-sols-contamines-metaux-a-fins-energetiques>
- Foulon J., Zappelini C., Durand A., Valot B.; Blaudez D., Chalot M., 2016. Impact of poplar-based phytomanagement on soil properties and microbial communities in a metal-contaminated site. FEMS Microbiology Ecology Advance Access published July 31. https://www.researchgate.net/profile/Durand_Alexis/publication/305786572_Impact_of_poplar-based_phytomanagement_on_soil_properties_and_microbial_communities_in_a_metal-contaminated_site/links/57bb124208ae9fdf82ef015d.pdf?origin=publication_list
- INERIS, 2013. Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires. Démarque intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées. Impact des activités humaines sur les milieux et la santé, DRC - 12 - 125929 - 13162B. <http://www.ineris.fr/centredoc/drc-guiders-2013-v4d-complet-lienscompact-1378197912.pdf>
- Kidd P., Mench M., Álvarez-López V., Bert V., Dimitriou I., Fries-Hanl W., Herzig R., Janssen J.O., Kolbas A., Müller I., Neu S., Renella G., Ruttens A., Vangronsveld J., Puschenreiter M. 2015. Agronomic practices for improving gentle remediation of trace-element-contaminated soils. Int J Phytorem 17, 1005–1037.
- Mench M., Schwitzguébel J.P., Schröder P., Bert V., Gawronski S., Gupta S., 2009. Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: contaminant uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety. Environ Sci Pollut Res 16, 876–900.
- Mench M., Kolbas A., Marchand L., Bes C., Atziria A., Ooustrière N., Hego E., Sureau M.C., Nibaudeaul M., Rousseau F., Laffontas C., Kolbas N., Herzig R., Motelica-Heino M., Hattab N., Pang M., Puschenreiter M., 2013. Solutions de phytoremédiation et pilotes de démonstration sur la plate-forme de phytoremédiation BIOGECO (PHYTODEMO). Rapport final, ADEME 09 72 C0076 / INRA 22000460, Ademe, 131 p.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Base de données Basol sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif, 2015. Available at http://basol.developpement-durable.gouv.fr/tableaux/home.htm#localisation_sites.
- Nsanganwiama F., Waterlot C., Louvel B., Pourrut B., Douay F., 2016. Metal, nutrient and biomass accumulation during the growing cycle of Miscanthus established on metal-contaminated soils, J Plant Nutrition Soil Science 179, 257–269.
- Oustrière N., Marchand L., Bouchardon J.L., Faure O., Moutte J., Mench M., 2016 Aided phytostabilization of a trace element-contaminated technosol developed on steel mill wastes. Journal Hazardous Material 320, 458–468.
- Panagos P., Van Liedekerke M., Yigini Y., Montana L., 2013. Contaminated sites in Europe: Review of the current situation based on data collected through a European network», Journal Environment Public Health, Article ID 158764, 11 pages.
- Sessitsch A., Kuffner M., Kidd P., Vangronsveld J., Wenzel W.W., Fallmann K., Puschenreiter M., 2013. The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils», Soil Biology Biochemistry 60, 182–194.
- Van der Perk M., 2013. Soil and water contamination, 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton.
- Vangronsveld J., Herzig R., Weyens N., Boulet J., Adriaensen K., Ruttens A., Thewys T., Vassilev A., Meers E., Nehnevajova E., Van der Lelie D., Mench M., 2009. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. Environ Sci Pollut Res 16, 765–794.