

Résumé

Phytoremédiation d'un sol contaminé de la Bekaa (Liban) : valorisation de la biomasse par production d'huiles essentielles à activités biologiques

Situé au sein de la plaine de la Bekaa au Liban, le fleuve du Litani est sujet à divers rejets agricoles, industriels, domestiques et urbain. Lors de l'irrigation des parcelles agricoles, les eaux du fleuve contaminent le sol et les cultures présentant ainsi un risque pour la santé de l'Homme et l'environnement. Parmi les méthodes de remédiation émergentes et en adéquation avec le développement durable figure la phytoremédiation assistée par les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA). Cependant, la rentabilité de ce mode de gestion constitue l'un des principaux freins à son développement et la valorisation de produits biosourcés, à hautes valeurs ajoutées, issus de la biomasse végétale produite sur ces sols contaminés permettrait d'abaisser les coûts globaux de gestion et de requalification de ces sols pollués. Parmi les filières de valorisation éco-innovantes, la culture de plantes à parfums aromatiques et médicinales (PPAM) productrices d'huiles essentielles (HE) à activités biologiques peut être suggérée comme une option prometteuse. Ainsi, l'objectif de ce travail de thèse a consisté tout d'abord à caractériser le sol d'une parcelle expérimentale située à Marj-Bekaa et directement irriguée par les eaux du Litani, puis à proposer un mode de gestion basé sur la production d'HE pouvant répondre ainsi aux attentes environnementales, économiques et sociales.

Nos résultats montrent que la parcelle expérimentale, située à Marj-Bekaa et directement irriguée par les eaux du Litani, est principalement contaminée par des éléments traces métalliques [Ni (88 mg.Kg⁻¹), Cr (122 mg.Kg⁻¹), V (170 mg.Kg⁻¹) et Mn (551 mg.Kg⁻¹)] et des polluants organiques [les alcanes (2.5 g.Kg⁻¹ du sol)]. Cette contamination est à l'origine d'une (1) cytotoxicité vis-à-vis des cellules pulmonaires et hépatiques mise en évidence grâce au dosage de deux activités enzymatiques, la lactate déshydrogénase et la désydhrogénase mitochondriale mais aussi d'une (2) écotoxicité révélée par la réduction (i) des taux de germination des graines (blé, trèfle, luzerne, ray-grass et féтуque), (ii) de la biomasse microbienne du sol [bactéries Gram-positives et Gram-négatives, champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA), champignons saprotrophes et ectomycorhiziens], (iii) de l'abondance et de la diversité des spores de CMA et (iv) de la richesse et de la diversité végétales. Cependant, toutes les plantes indigènes étaient mycorhizées. C'est pourquoi, la faisabilité de la phytoremédiation assistée par les CMA du site expérimental de la Bekaa, a été testée à la fois en microcosmes et *in situ* en utilisant une plante aromatique productrice d'HE, l'origan (*Origanum syriacum* L.). Nos résultats ont montré que non seulement l'origan possède un potentiel de dissipation des alcanes mais en plus cette plante ne transfère pas ces polluants dans les HE extraites à partir de sa biomasse aérienne. Par ailleurs, il a été constaté que la mycorhization a une influence sur la composition des HE. En outre, notre étude a permis l'évaluation de diverses activités biologiques (antifongique, antioxydante et anti-inflammatoire) d'une gamme d'HE extraites de différentes espèces végétales dont l'origan et ce en présence et en absence des cyclodextrines (HP-β-CD), oligosaccharides cycliques qui complexent les HE et augmentent leurs biodisponibilités.

Mots-clés : pollution du sol - toxicité - écotoxicité - *Origanum syriacum* - champignons mycorhiziens à arbuscules - phytoremédiation - huiles essentielles - activités biologiques

Abstract

Phytoremediation of a polluted soil in the Bekaa valley (Lebanon): valorization of the biomass by producing essential oil with biological activities

Located in the Bekaa valley in Lebanon, the Litani River is exposed to agricultural, industrial, domestic and urban wastewaters. Through the irrigation of agricultural soils, the river's water contributes to soil and culture contamination and represents a risk for human health and environment. Amongst the emergent sustainable remediation methods, there is arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) assisted-phytoremediation. However, one of the limitations in using phytoremediation as a depollution method is its socio-economic profitability. Among the eco-innovative valorization processes with high profitability, the cultivation of aromatic and medicinal plants producing essential oils (EO) with biological activities has been suggested as a promising option. Thus, this thesis work aims firstly at characterizing the soil of an experimental site located at Marj-Bekaa and directly irrigated by the Litani's water and secondly at proposing a mode of management of the contaminated soil based on the production of EO that can meet environmental, economic and social expectations.

Our findings showed that the soil sampled in Marj-Bekaa is mainly contaminated by metal trace elements [Ni (88 mg.Kg⁻¹), Cr (122 mg.Kg⁻¹), V (170 mg.Kg⁻¹) and Mn (551 mg.Kg⁻¹)] and alkanes (2.5 g.Kg⁻¹ of soil). This contamination is causing (i) cytotoxicity against both bronchial and hepatic human cells revealed by the evaluation of two enzyme activities, extracellular lactate dehydrogenase and mitochondrial dehydrogenase, as well as (2) ecotoxicity pointed out by the reduction of (i) seed germination (wheat, clover, alfalfa, ryegrass and tall fescue), (ii) soil microbial biomass [Gram-positive and Gram-negative bacteria, arbuscular mycorrhizal fungal (AMF), ectomycorrhizal and saprotrophic fungi], (iii) abundance and diversity of AMF spores as well as (iv) the plant diversity and richness.

The AMF-assisted phytoremediation of the Bekaa experimental site was evaluated both in microcosms and in *in situ* experiments using an aromatic plant producing EO, oregano (*Origanum syriacum* L.). Our results revealed that oregano plants possess an alkane's dissipation potential and no pollutant transfer is detected in EO. Moreover, the mycorrhization modified the EO composition.

On the other hand, our study evaluated several biological (antifungal, antioxidant and anti-inflammatory) activities of a range of EO extracted from many plant species including oregano, in the presence and the absence of cyclodextrines (HP-β-CD), cyclic oligosaccharides that encapsulate EO and enhance their bioavailabilities.

Keywords: soil pollution - toxicity - ecotoxicity - *Origanum syriacum* - arbuscular mycorrhizal fungi - phytoremediation - essential oils - biological activities

Soutenue à Hadath au Liban, le 30 Janvier 2018 devant la commission d'examen :

Mme. Anissa Lounès-Hadj Sahraoui, Professeur, Université du Littoral Côte d'Opale Directrice de thèse
Mr. Ramez Chahine, Professeur, Université Libanaise.....Directeur de thèse
Mr. Anthony Verdin, Ingénieur de recherche, Université du Littoral Côte d'Opale Co-encadrant de thèse
Mr. Hassane Makhoulouf, Professeur, Université Libanaise..... Co-encadrant de thèse
Mr. Michel-Pierre Faucon, Enseignant chercheur, Institut Polytechnique de La Salle Rapporteur
Mr. Jihad Attieh, Professeur, Université Balamand..... Rapporteur
Mr. Stéphane Firmin, Enseignant chercheur, Institut Polytechnique de La Salle..... Examineur
Mr. Marc El-Beyrouthy, Professeur associé, Université de Saint-Esprit de Kaslik Examineur
Mr. Joël Fontaine, Maître de conférences, HDR, Université du Littoral Côte d'Opale Membre invité