



**DOSSIER DE CANDIDATURE  
POUR THESE EN COTUTELLE  
POUR LA RENTREE 2023  
FINANCEMENT : BOURSE**

Dossier complété et revêtu des signatures à transmettre impérativement pour le :

**20 mars 2023 au plus tard,**

A la Direction de la Recherche et Valorisation

[secretariat.recherche@univ-littoral.fr](mailto:secretariat.recherche@univ-littoral.fr)

**Titre de la thèse :**

**BIODIVALO : Reconquête des sols contaminés grâce à l'exploitation de leurs biodiversités floristique et microbienne et au développement d'une filière de valorisation de la biomasse**

**Laboratoire d'accueil ULCO :** Unité de Chimie Environnementale et Interactions sur le Vivant (UCEIV)

**Directeur de thèse ULCO :** Anissa LOUNES – HADJ SAHRAOUI

Co-encadrants : F. CAZIER, A. VERDIN, J. FONTAINE

**Directeur de thèse Partenaire :** Mme Lamis CHALAK (Université Libanaise) / lamis.chalak@gmail.com

Co-encadrant : Mme Imane ABBAS (CNRS-L)

**Cofinancement : 50% fourni par ULCO et 50% fourni par Nature by Marc Beyrouthy**

**Si nouveau partenariat (absent ci-dessous) merci de nous indiquer l'université d'origine, le directeur de thèse, le laboratoire, ainsi que les conditions de financement du doctorant dans le pays d'origine**

**LIBAN – Université Libanaise (2 financements)**

Pour ce dispositif, merci d'indiquer en plus :

- le nom du codirecteur étranger et le laboratoire partenaire

- Thématique :

- (1) La qualité de l'air
- (2) Le milieu aquatique
- (3) L'obésité, la nutrition et les activités sportives,
- (4) Les énergies propres et renouvelables
- (5) La gestion et le traitement des déchets
- (6) L'urbanisme



**LIBAN – CNRS Libanais (4 financements)**

Pour ce dispositif, merci d'indiquer en plus :

- le nom du codirecteur étranger et le laboratoire partenaire

- Thématique :

- (1) La qualité de l'air
- (2) Le milieu aquatique
- (3) L'obésité, la nutrition et les activités sportives
- (4) Les énergies propres et renouvelables
- (5) La gestion et le traitement des déchets
- (6) L'urbanisme

**MAROC - Université Hassan II / HESTIM (UH2C) (4 financements)**

- Thématique :

- (1) Economie Gestion
- (2) Sciences et Technologies

**MAROC – Université Mohammed V (4 financements)**

- Thématique :

- (1) Environnement, Milieux Littoraux Marins
- (2) Sciences et technologie
- (3) Santé
- (4) Sciences Humaines et Sociales

**MAROC – Université Mohammed VI**

- Thématique :

- (1) Mathématiques Appliquées, Sciences de Données
- (2) Sciences de l'Ingénieur (informatique, traitement du signal et de l'industrie 4.0)
- (3) Ingénierie des systèmes complexes

**BELGIQUE - UCLOUVAIN – Université Catholique de Louvain (2 financements)**

- Thématique :

- (1) Economie Gestion

**CANADA – UQAR : Université du Québec à Rimouski ( 1 financement)**

- Thématique :

- (1) Sciences de la Mer



#### **\*LABORATOIRE D'ACCUEIL**

Nom du laboratoire d'accueil : Laboratoire de Production Végétale, Faculté d'Agronomie, l'Université Libanaise, Dekwaneh, Beirut, Liban

Nombre de HDR dans le laboratoire :

Nombre de thèses encadrées dans le laboratoire (rentrée 2022) : 4

Cotutelles en cours au sein du laboratoire : 1

Durée moyenne des thèses soutenues dans le laboratoire, sur la période 2018-2022 : 3 ans

#### **ENCADREMENT**

Nom, Prénom du directeur de laboratoire : Lamis Chalak

Nom, Prénom du directeur de thèse (si différent du directeur de laboratoire) :

Nombre de doctorats en préparation sous la direction du directeur de thèse : 1

Avis détaillé du directeur de thèse :

La pollution des sols par des intrants chimiques, industriels et domestiques présente des risques pour la production, à cause notamment de l'altération des sols et la perturbation de l'équilibre écologique. L'absence de systèmes d'évacuation et de traitement des eaux usées dans certaines régions de la Méditerranée pose un vrai problème en matière de protection de la santé de l'homme et de son environnement. C'est pourquoi, il devient impératif de développer des techniques de décontamination plus conformes aux enjeux du développement durable que les techniques conventionnelles. Ainsi la phytoremédiation présente les avantages d'être peu onéreuse et applicable aux traitements in situ des grandes surfaces de sols contaminés tout en présentant une bonne intégration paysagère. Le sujet de cette thèse propose d'introduire des plantes aromatiques et médicinales dans le processus de phytoremédiation comme un moyen pour l'assainissement des sols contaminés en éliminant les polluants afin de profiter des sites de restauration et de leur redonner un intérêt économique, social et environnemental tout en abaissant les coûts globaux de leur gestion et de leur requalification. De plus, plusieurs huiles essentielles issues d'une hydrodistillation de biomasse végétale cultivées dans des sites contaminés ont montré une absence de migration des polluants. L'étudiant étudiera le rôle du genre *Origanum*, *Salvia* et *Rosmarinus*, dans la conversion des sols contaminés par des agents polluants organiques et inorganiques, comme un remède biologique aux stratégies conventionnelles déjà utilisées.

*Prof. Lamis CHALAK*

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Lamis', is positioned below the printed name.

*Head of Plant Production Department*



### **Avis du directeur de thèse pour l'ULCO**

Au vu de son parcours et de ses résultats universitaires, Monsieur Nicolas Al Achkar correspond tout à fait au profil requis pour entamer un travail de recherche dans le cadre de la préparation de la thèse de doctorat proposée. Les connaissances et les compétences dont il dispose seront des atouts indéniables pour mener à bien cette thèse sur le phytomanagement des sols pollués. Il a un très bon niveau et montre un grand intérêt pour la thématique de recherche proposée. Toutes ces qualités font de lui un très bon candidat pour ces travaux de recherche. J'émet donc un avis favorable pour sa candidature à cette thèse de doctorat.

Pr Anissa LOUNES – HADJ SAHRAOUI

A blue ink signature is written over a circular official stamp. The stamp contains the text 'UCEIV' and 'EA 4492' in the center. The outer ring of the stamp contains the text 'Unité de Chimie Environnementale et Interactions sur le Vivant - Université de Lille'.

NATURE  
by Marc Beyrouthy

A QUI DE DROIT

Je soussigné, Dr. Marc Beyrouthy, atteste en tant que Directeur de l'entreprise Nature by Marc Beyrouthy, que l'entreprise se porte garante financière de Mr. Nicolas Georges Al Achkar pour la réalisation de sa thèse doctorale en cotutelle à l'Université du Littoral Côte d'Opale et l'Université Libanaise (EDST).

Une somme nette de 1000 Euros (mille euros) par mois lui sera versée sur six mois par an pour couvrir son séjour et travail de thèse au Liban.

Il est à noter que la durée de financement est de trois ans à partir de l'inscription de Mr. Al Achkar en thèse, et un contact sera signé entre l'entreprise Nature by Marc Beyrouthy et le doctorant juste après l'inscription en thèse.

Le sujet de thèse de Mr. Al Achkar s'intitule « Reconquête des sols contaminés grâce à la culture des PPAM et au développement d'une filière de production d'huiles essentielles ».

Tout en restant à votre disposition pour de plus amples informations, je vous prie, Madame, Monsieur, de bien vouloir accepter mes salutations les plus distinguées.

Dr. Marc Beyrouthy



Marc Beyrouthy, PhD, HDR, Eng.  
Associate Professor  
Chairman - General Manager - NaturebyMarcBeyrouthy  
Anchor Nature - MTV Alive - MTV Lebanon  
Mobile : 00 961 3 826419  
marc.beyrouthy@gmail.com  
info@marcbeyrouthy.com  
Web: www.marcbeyrouthy.com



## PROJET DE THESE

### **Intitulé du projet de thèse :**

**BIODIVALO** : Reconquête des sols contaminés grâce à l'exploitation leurs biodiversités floristique et microbienne et au développement d'une filière de valorisation de la biomasse

### **Domaine scientifique :**

Phytomanagement des sols pollués

### **Résumé** (1/2 page maxi.) :

A l'heure de la transition énergétique et de l'économie circulaire, les demandes en biomasse végétale sont en forte progression. Exploiter les sites et sols pollués pour produire une phytomasse valorisable, sans entrer en compétition avec l'utilisation des sols agricoles à des fins alimentaires, représente un créneau de recherche émergent, innovant et complémentaire de la logique de réhabilitation des sols pollués en utilisant la capacité naturelle des plantes et de leur microbiote rhizosphérique dans la gestion des polluants. Mieux sélectionner les espèces végétales pour le phytomanagement en fonction des filières de valorisation locales pertinentes, est devenu un enjeu majeur. En effet, la valorisation de la biomasse permettrait d'abaisser les coûts globaux de la gestion de la pollution et de réappropriier ces sols, par ailleurs délaissés. Jusqu'à présent, les filières de valorisation en voie de développement ont concerné principalement les domaines de la bioénergie et de la production des biomatériaux. Ainsi, la présente thèse entre dans ce contexte général du phytomanagement des sols pollués et vise à exploiter les biodiversités floristiques et microbiennes qu'ils présentent, notamment la culture des plantes aromatiques et médicinales (PAM) dans une perspective de développement d'une filière innovante de valorisation de produits biosourcés, à haute valeur ajoutée, comme par exemple la production de métabolites secondaires tels que les huiles essentielles dont la demande mondiale est en constante augmentation. En effet, celles-ci peuvent être utilisées dans diverses industries non alimentaires (phytosanitaires, cosmétiques, pharmaceutiques) grâce aux nombreuses activités biologiques qu'elles présentent.



**Projet de thèse (5 pages maxi.) :**

***Le sujet de recherche choisi et son contexte scientifique***

La pollution des sols constitue un véritable problème de santé publique et de sécurité environnementale (Carré et al., 2017). De nombreux travaux ont démontré les effets néfastes des polluants sur la santé humaine et celle des autres composantes de l'environnement. Selon leur nature, les polluants peuvent migrer du sol vers les autres compartiments environnementaux et entrer en contact avec l'Homme par différentes voies d'expositions (consommation des eaux contaminées, des produits végétaux et animaux exposés à la pollution, inhalation des envols de poussières ou contact direct avec le sol pollué). Entre 5 et 10 millions de sites et sols pollués (SSP) sont actuellement répertoriés dans le monde ([www.siteremediation.com.au/contaminated-soil/contamination](http://www.siteremediation.com.au/contaminated-soil/contamination)) dont 2,5 millions se situent en Europe (Panagos et al., 2013) et 4142 en France ([www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr)). Au Liban, malgré l'absence à l'échelle nationale d'un inventaire officiel des SSP, il est avéré que de nombreux sites sont contaminés, dû principalement à l'irrigation des cultures avec des eaux polluée et à l'application intensive des intrants chimiques (fertilisants et pesticides) en agriculture, ainsi que les rejets industriels et domestiques, les dépôts des polluants atmosphériques émis par le trafic routier et les industries polluantes (El Alam, 2018). Parmi les polluants les plus fréquemment détectés figurent les éléments traces métalliques (ETM), les hydrocarbures totaux (HCT), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les polychlorobiphényles (PCB), principalement d'origine anthropique.

Ainsi, la réhabilitation des SSP est devenue une priorité, aussi bien pour les scientifiques que pour les pouvoirs publics. En France, la loi Grenelle II intègre la gestion et la remédiation des sites pollués dans ses dispositions, en soulignant dans son article 43 l'importance d'utiliser de préférence « les techniques de dépollution par les plantes », c'est-à-dire la phytoremédiation. Cette phytotechnologie est en effet plus conforme aux enjeux du développement durable que les techniques conventionnelles actuellement utilisées, principalement physico-chimiques tels que l'excavation et la désorption thermique, qui en dépit de leur rapidité, conduisent à l'altération des propriétés biologiques du sol. En plus d'être écologique, la phytoremédiation présente les avantages d'être moins onéreuse, mieux adaptée aux traitements in situ sur de grandes surfaces. En outre, contrairement aux méthodes classiques de traitements physico-chimiques, la phytoremédiation génère peu de perturbation du sol et présente une bonne intégration paysagère.

Malgré cela, actuellement en France, il n'y a que 3% des opérations de gestion des SSP qui font appel aux phytotechnologies et ces aspects sont peu considérés au Liban. En effet, leur efficacité dépend de plusieurs facteurs dont les conditions pédo-climatiques, les propriétés physico-chimiques des polluants, leur concentration et leur biodisponibilité, la tolérance des espèces végétales aux polluants mais aussi du microbiote rhizosphérique (Tissut et al., 2006). De plus, les autres verrous qui limitent l'usage de la phytoremédiation sont le manque de retours d'expérience sur des



expérimentations à grande échelle sur le terrain (démonstrateurs) ainsi que sur la rentabilité socio-économique de ce mode de gestion.

Par ailleurs, on sait qu'à l'heure de la transition énergétique et de l'économie circulaire, les demandes en biomasse végétale sont en forte progression. Exploiter les sites et sols pollués pour produire une phytomasse valorisable, sans entrer en compétition avec l'utilisation des sols agricoles à des fins alimentaires, représente un créneau de recherche émergent, innovant et complémentaire de la logique de réhabilitation des sols pollués en utilisant la capacité naturelle des plantes et de leur microbiote rhizosphérique à immobiliser (phytostabilisation), extraire (phytoextraction) ou dégrader (phytorhizodégradation) les polluants. Cette approche intégrée de gestion des SSP ou phytomanagement, vise non seulement à atténuer les risques mais aussi à considérer les avantages socio-économiques, et écologiques que ces sites peuvent offrir. Mieux sélectionner les espèces végétales pour le phytomanagement en fonction des filières de valorisation locales pertinentes et des conditions pédo-climatiques, est devenu un enjeu majeur des projets qui se développent actuellement. En effet, la valorisation de la biomasse permettrait d'abaisser les coûts globaux de la gestion de la pollution et de valoriser l'usage de sols, par ailleurs délaissés. Cependant, le développement de ces filières de valorisation nécessite la mise en adéquation entre la nature de la production végétale, la quantité et la qualité de la biomasse produite (degré de contamination éventuelle) et l'accès à une filière de valorisation, à proximité du lieu de production conditionnant sa rentabilité.

Les filières de valorisation en voie de développement concernent principalement les domaines de la bioénergie et de la production des biomatériaux (Gerhardt et al., 2017; Ghosh and Singh, 2005). Plus récemment, des filières de valorisation de produits biosourcés, à hautes valeurs ajoutées, commencent à émerger, comme par exemple la culture des plantes aromatiques et médicinales (PAM) productrices de métabolites secondaires tels que les huiles essentielles dont la demande mondiale est en constante augmentation et devrait atteindre 5 mille milliards de dollars d'ici la fin de l'année 2050 (Verm et al., 2014). Pour répondre à cette demande, l'expansion de la culture des PAM vers les terrains contaminés pourrait être une véritable option d'autant plus que ces composés à haute valeur ajoutée peuvent être utilisés dans diverses industries non alimentaires (phytosanitaires, cosmétiques, pharmaceutiques).

Ainsi, la présente thèse entre dans ce contexte général du phytomanagement des sols pollués et vise à explorer les biodiversités floristiques et microbiennes qu'ils présentent, notamment la culture des PAM.





## ***L'état du sujet dans le laboratoire et l'équipe d'accueil***

L'équipe Interactions Plantes/champignons et Remédiation (IPCR) et Chimie et Toxicologie des Emissions Atmosphériques.... (CTEA) de l'UCEIV ainsi que le Centre Commun de Mesures (CCM) de l'ULCO possèdent des compétences reconnues dans la phytoremédiation assistée par différents amendements biologiques, organiques et minéraux, la valorisation de la biomasse végétale produite sur ces sols pollués, la caractérisation du microbiote et de son fonctionnement dans ces sols et le suivi de la toxicité et l'écotoxicité des sols pollués. Depuis une vingtaine d'année, ces équipes ont participé et porté différents programmes de recherche, visant à développer des méthodes innovantes de phytomanagement (CPER ALIBIOTECH, 2017 - 2022, CPER BiHautsEco De France : 2022 – 2027, HALLUIN 3R 1 et 2, 2012-2016, PHYTENER, 2009-2013 et EXTRA-Zn, 2019-2023 ; PIA ROUBAIX, 2021-2024 ; PHYTEO, 2017-2020, DEPHYTOP, 2021-2024). Plusieurs thèses ont été conduites dans le cadre de cette thématique : A. Verdin (2001-2004), D. Debiante (2007-2010), M. Calonne (2008-2012), I. Lenoir (2012-2015), H. Meglouli (2014-2017) ; I. El Alam (2015-2018), R. Raveau (2017-2020), A. Grignet (2018-2021) et J. Langrand (2020-2023). Ces travaux ont donné lieu à une centaine de publications (ORCID 0000-0001-8478-0128).

Une précédente collaboration entre l'UCEIV-ULCO et l'université libanaise a été réalisée dans le cadre de la thèse en cotutelle de Imad EL-ALAM (soutenue en 2018) sous la co-direction des Pr. R. CHAHINE et A. LOUNES – HADJ SAHRAOUI. Elle a porté sur la phytoremédiation d'un sol contaminé de la Bekaa (Liban). L'objectif de ce travail de thèse a consisté tout d'abord à caractériser le sol d'une parcelle expérimentale située à Marj-Bekaa puis à proposer un mode de gestion basé sur la phytoremédiation assistée par les champignons mycorhiziens.

Nos résultats ont montré que la parcelle expérimentale, située à Marj-Bekaa et directement irriguée par les eaux du Litani, était principalement contaminée par des ETM [Ni (88 mg.Kg<sup>-1</sup>), Cr (122 mg.Kg<sup>-1</sup>), V (170 mg.Kg<sup>-1</sup>) et Mn (551 mg.Kg<sup>-1</sup>)] et des alcanes (2.5 g.Kg<sup>-1</sup> du sol). Cette contamination a été à l'origine d'une cytotoxicité vis-à-vis des cellules pulmonaires et hépatiques et d'une écotoxicité révélée par la réduction des taux de germination des graines de plusieurs espèces végétales (blé, trèfle, luzerne, ray-grass et fétuque). La faisabilité de la phytoremédiation assistée par les champignons mycorhiziens à arbuscules du site expérimental de la Bekaa, a été testée à la fois en microcosmes et *in situ* en utilisant une plante aromatique productrice d'huiles essentielles, 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 huiles essentielles extraites à partir de sa biomasse aérienne. Par ailleurs, il a été constaté que la mycorhization a une influence sur la composition des huiles essentielles. Ces dernières présentent différentes activités biologiques (antifongique, antioxydante et anti-inflammatoire) et ce en présence et en absence des cyclodextrines, oligosaccharides cycliques qui complexent les huiles essentielles et augmentent leurs biodisponibilités.



## ***Le programme et l'échéancier de travail***

Ce projet de thèse s'inscrit dans le prolongement de la précédente thèse et vise à répondre aux objectifs suivants :

### **1. PROSPECTER ET CHOISIR LE SITE D'ETUDE**

Le choix du site d'étude dépendra de plusieurs critères dont (a) son historique, (b) ses paramètres physico-chimiques et de son niveau de pollution (c) ainsi que de sa biodiversité floristique et microbienne. C'est pourquoi, la caractérisation pédo-agronomique du sol ainsi que l'identification (nature : ETM et/ou polluants organiques tels que les HAP, les HCT et les PCB) et la quantification des polluants présents dans la rhizosphère (profondeur 20-30 cm) sont des étapes préalables indispensables avant toute mise en place d'une phytotechnologie.

- a. Historique des sites prospectés
- b. Caractérisations physico-chimiques des sites prospectés
- c. Caractérisation de la biodiversité floristique et microbienne
  - Suite au choix du site d'étude, il est envisagé de réaliser des inventaires floristiques (phytosociologique) (quand le site est naturellement végétalisé).
  - Quantification de la biomasse et de l'activité microbiennes du sol pollué ainsi que la caractérisation moléculaire du microbiote tellurique

### **2. CHOISIR LES ESPECES VEGETALES A UTILISER**

Le choix des espèces végétales à étudier/utilisées est basé sur plusieurs critères :

- a. Croissance et production de biomasse : évaluation des paramètres de croissance
- b. Capacités phytoremédiatrices (phytostabilisation, phytoextraction, phytorhizodégradation) : suivi de la teneur des polluants dans le sol et leur éventuel transfert dans les parties aériennes des plantes étudiées.

### **3. SUIVRE LA TOXICITE ET L'ECOTOXICITE DES SOLS**

L'impact de la pollution du sol sur l'Homme, les végétaux et la viabilité microbienne sera étudié en utilisant des :

- a. Tests de cytotoxicité :
  - Evaluation *in vitro* de l'intégrité/la perméabilité membranaire via le test de la LDH (Lactate DésHydrogénase),
  - Evaluation *in vitro* de la viabilité cellulaire à l'aide du test de la DHm (DésHydrogénase mitochondriale)Ces tests de cytotoxicité seront réalisés sur des cellules digestives (HepG2) et/ou épithéliales pulmonaires humaines (Beas-2B).



#### b. Tests d'écotoxicité

- Dosages des marqueurs lipidiques (AGPL, acides gras associés aux phospholipides) spécifiques des différents groupes microbiens (bactéries, champignons saprotrophes, champignons mycorhiziens à arbuscules). Les marqueurs lipidiques sont utilisés pour la détection et la quantification de la microflore tellurique. Parmi ces marqueurs, le C16: 1 $\omega$ 5 associé aux phospholipides (PL) est utilisé comme marqueur des CMA, l'ergostérol et le C18: 2 $\omega$ 6,9 associé aux PL comme marqueurs des champignons saprotrophes et ectomycorhiziens, et les acides gras associés aux PL: i15 :0, a15 :0, i16 :0, i17 :0, a17 :0, cy17 :0, C18 :1 $\omega$  7 et cy19 :0 pour mesurer la biomasse bactérienne.
- D'autres tests d'écotoxicité tels que la germination des graines de la laitue et du ray-grass, l'élongation racinaire ainsi que la mesure du malondialdéhyde (marqueur de peroxydation lipidique) pourront également être mesurés.
- Enfin, la toxicité environnementale des sols sera évaluée sur la photobactérie *Aliivibrio fischeri* à l'aide du kit BioTox™ LumoPlate™ Ultimate Matrix.

#### 4. DEVELOPPER UNE FILIERE DE VALORISATION DE LA BIOMASSE

Parmi, les filières de valorisation de la biomasse visées, la culture des PAM pour produire des molécules à haute valeur ajoutée (huiles essentielles et/ou autres extraits) sera à privilégier.

- Production des semences et de la biomasse (expérimentations en serre et *in situ*)
  - Distillation des huiles essentielles (par hydrodistillation Clevenger) et purification des autres extraits
  - Etude de la composition chimique des huiles essentielles (GC-MS)
  - Contrôle de la qualité des huiles essentielles : dosage des polluants
  - Etude de différentes activités biologiques des huiles essentielles
    - anti-bactériennes
    - anti-fongiques
    - herbicides et anti-germinatives
    - insecticides
    - anti-inflammatoires
- **Echéancier de travail**

	Année 1		Année 2		Année 3	
	SEMESTRE 1	SEMESTRE 2	SEMESTRE 1	SEMESTRE 2	SEMESTRE 1	SEMESTRE 2
VEILLE BIBLIOGRAPHIQUE						
PROSPECTER ET CHOISIR LE SITE D'ETUDE						
CHOISIR LES ESPECES VEGETALES A UTILISER						
SUIVRE LA TOXICITE ET L'ECOTOXICITE DES SOLS						
DEVELOPPER UNE FILIERE DE VALORISATION DE LA BIOMASSE						
VALORISATION DES RESULTATS : REDACTION DE PUBLICATIONS						
REDACTION DE LA THESE						
	LIBAN	FRANCE	LIBAN	FRANCE	FRANCE	LIBAN

### **Les retombées scientifiques et économiques attendues**

La gestion durable des SSP en utilisant le phytomanagement est un enjeu important pour la reconversion et l'aménagement pérenne et responsable du territoire. La reconquête de ces espaces dégradés délaissés passe non seulement par la réhabilitation de ces parcelles pour satisfaire les normes sanitaires et environnementales mais également par la viabilité écologique et économique du mode de gestion proposé.

Ce projet a pour ambition *in-fine* de fournir des livrables méthodologiques (exemple : outil d'aide à la décision, OAD) transférables à de nombreux sites pollués à l'échelle nationale et internationale. Il devrait permettre de déboucher sur une valorisation éco-innovante de la biomasse produite sur des SSP pour répondre aux besoins émergents des industriels et gestionnaires de SSP, tout en s'intégrant dans la stratégie nationale de développement durable. Il permettra également de capitaliser des connaissances sur les aspects techniques, scientifiques, environnementaux et de renforcer les retours d'expérience sur le phytomanagement des SSP. Les résultats de ce projet bénéficieront directement à la zone d'étude au Liban et pourront être étendus voire répliqués à des situations que connaissent d'autres collectivités au niveau national et international. Par conséquent, il pourra aisément être transposé à d'autres territoires et ainsi élargir l'ensemble des gisements mobilisables.



De plus, le plan Ecophyto et la révision de la directive Européenne sur les substances phytopharmaceutiques incitent les agriculteurs à limiter les usages de pesticides en raison de leur caractère avéré de toxicité et d'écotoxicité. Ainsi, l'étude des propriétés «biopesticides» des huiles essentielles ou d'autres molécules extraites à partir de la biomasse produite sur sols contaminés, répond à cet enjeu de production intégrée et permettra également de mener une réflexion globale sur le développement et la valorisation de produits finaux issus de la filière.

### ***Les collaborations prévues et une liste de 10 publications maximum portant directement sur le sujet***

En plus des compétences de l'équipe IPCR (A. Lounès – Hadj Sahraoui et J. Fontaine) et CTEA (A. Verdin) de l'UCEIV à l'ULCO en France et .....au Liban, cette thèse s'appuiera également sur le savoir-faire du centre commun de mesure de notre université dirigé par F. Cazier.

#### Liste de 10 publications portant directement sur le sujet

- RAVEAU, R.; FONTAINE, J.; SOLTANI, A.; MADIOUNI BEN JEMAA, J.; LARUELLE, F.; LOUNÈS-HADJ SAHRAOUI, A. In Vitro Potential of Clary Sage and Coriander Essential Oils as Crop Protection and Post-Harvest Decay Control Products. *Foods* 2022, 11, 312. <https://doi.org/10.3390/foods11030312>
- A. GRIGNET, A. LOUNÈS-HADJ SAHRAOUI, S. TEILLAUD, J. FONTAINE, A. PAPIN, V. BERT PHYTOEXTRACTION OF ZN AND Cd with *Arabidopsis halleri*: a focus on fertilization and biological amendment as a means of increasing biomass and Cd and Zn concentrations. *Environ Sci Pollut Res* (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17256-1>
- RAVEAU, R.; FONTAINE, J.; VERDIN, A.; MISTRULLI, L.; LARUELLE, F.; FOURMENTIN, S.; LOUNÈS-HADJ SAHRAOUI, A. Chemical Composition, Antioxidant and Anti-Inflammatory Activities of Clary Sage and Coriander Essential Oils Produced on Polluted and Amended Soils-Phytomanagement Approach. *Molecules* 2021, 26, 5321. <https://doi.org/10.3390/molecules26175321>
- R. RAVEAU, FONTAINE, J., BERT, V., PERLEIN, A., TISSERANT, B., FERRANT, P., LOUNES-HADJ SAHRAOUI, A., 2021. *In situ* cultivation of aromatic plant species for the phytomanagement of an aged-trace element polluted soil: plant biomass improvement options and techno-economic assessment of the essential oil production channel. *Sci. Total Environ.* 147944. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.147944.
- RAVEAU, R., LOUNES-HADJ SAHRAOUI, A., HIJRI, M., FONTAINE, J., 2021. Clary sage cultivation and mycorrhizal inoculation influence the rhizosphere fungal community of an aged trace-element polluted soil. *Microorganisms* 9, 1333. doi:10.3390/microorganisms9061333.
- PERLEIN, A., ZDANEVITCH, I., GAUCHER, R., ROBINSON, B., PAPIN, A., LOUNES-HADJ SAHRAOUI, A., BERT, V. 2021. Phytomanagement of a metal(loid)-contaminated agricultural site using aromatic and medicinal plants to produce essential oils: analysis of the metal(loid) fate in the value chain. *Environmental Science and Pollution Research*. doi.org/10.1007/s11356-021-15045-4
- R. RAVEAU, J. FONTAINE, M. HIJRI AND A. LOUNES-HADJ SAHRAOUI (2020). The culture of clary sage shaped the rhizospheric bacterial communities more strongly than mycorrhizal inoculation in the trace element-contaminated soil -a two-year monitoring field trial. *Frontiers in Microbiology* 11. 10.3389/fmicb.2020.586050 (IF 4.235)
- R. RAVEAU, J. FONTAINE AND A. LOUNES-HADJ SAHRAOUI (2020). Essential Oils as Potential Alternative Biocontrol Products against Plant Pathogens and Weeds: A Review. *Foods* 9, 365. <https://doi.org/10.3390/foods9030365> (IF 4.092)
- I. EL-ALAM, R. RAVEAU, J. FONTAINE, A. VERDIN, F. LARUELLE, S. FOURMENTIN, R. CHAHINE, H. MAKHLOUF AND A. LOUNES-HADJ SAHRAOUI (2020). Antifungal and Phytotoxic Activities of Essential Oils: In Vitro Assays and Their Potential Use in Crop Protection. *Agronomy* 10, 825.



- <https://doi.org/10.3390/agronomy10060825> (IF 2.603)
- H MEGLOULI, J FONTAINE, F CHANGEY, M MAGNIN-ROBERT, B TISSERANT, M HIJRI, A LOUNES-HADJ SAHRAOUI. Aided phytoremediation to clean up dioxins/furans-aged contaminated soil: correlation between microbial communities and pollutant dissipation. *Microorganisms* 2019, 7(11), 523; <https://doi.org/10.3390/microorganisms7110523> (IF 4.167)
  - EL-ALAM, I.; ZGHEIB, R.; IRITI, M.; EL BEYROUTHY, M.; HATTOUNY, P.; VERDIN, A.; FONTAINE, J.; CHAHINE, R.; LOUNÈS-HADJ SAHRAOUI, A.; MAKHLOUF, H *Origanum syriacum* Essential Oil Chemical Polymorphism According to Soil Type. *Foods* 8 (90), 2-11 (IF 4.092)
  - H. MEGLOULI, A. LOUNES-HADJ SAHRAOUI, M. MAGNIN-ROBERT, B. TISSERANT, M. HIJRI, J. FONTAINE. (2018) Arbuscular mycorrhizal inoculum sources influence bacterial, archaeal, and fungal communities' structures of historically dioxin/furan-contaminated soil but not the pollutant dissipation rate. *Mycorrhiza* 28 (2018) 635-650. (IF 3,17)
  - I. EL-ALAM, A. VERDIN, J. FONTAINE, R. CHAHINE, H. MAKHLOUF, A. LOUNES-HADJ SAHRAOUI. (2018) *Ecotoxicity evaluation and human risk assessment of an agricultural polluted soil. Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190:738. (IF 1,804)
  - I. LENOIR, A. LOUNÈS-HADJ SAHRAOUI, F. LARUELLE, Y. DALPE, J. FONTAINE (2016) Arbuscular mycorrhizal wheat inoculation promotes alkane and polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation: microcosm experiment on aged-contaminated soil. *Environ. Pollut.*, 213, 549-560, (IF 4,839)
  - I. LENOIR, A. LOUNÈS-HADJ SAHRAOUI, J. FONTAINE (2016) Arbuscular mycorrhizal fungal-assisted phytoremediation of persistent organic pollutant-contaminated soils, *Eur. J. Soil Sci.*, 67 (5), 624-640, (IF 3,425)