



HAL
open science

Produire des huiles essentielles sur sols pollués - Phyteo : étude de faisabilité d'une filière éco-innovante de reconversion

Anissa Lounès - Hadj Sahraoui, Fontaine Joël

► To cite this version:

Anissa Lounès - Hadj Sahraoui, Fontaine Joël. Produire des huiles essentielles sur sols pollués - Phyteo : étude de faisabilité d'une filière éco-innovante de reconversion. ADEME. 2021, 81 p. hal-04760770

HAL Id: hal-04760770

<https://hal.science/hal-04760770v1>

Submitted on 6 Nov 2024

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.

Produire des huiles essentielles sur sols pollués

PhytEO : étude de faisabilité d'une
filière éco-innovante de reconversion

RAPPORT FINAL

Jun
2021



EXPERTISES

REMERCIEMENTS

Nous remercions tout d'abord l'ensemble des membres du comité de pilotage et du consortium de recherche

Membres du comité de pilotage

Francis Douay (Junia ISA)
Brett Robinson (Canterbury University, NZ)

Membres du consortium PhytEO :

Anissa LOUNES – HADJ SAHRAOUI, Joël FONTAINE, Robin RAVEAU, Frédéric LARUELLE, Benoit TISSERANT, Natacha FACON (ULCO, Unité chimie environnementale et interaction sur le vivant (UCEIV) - équipe Interactions Plantes- Champignons et Remédiation (IPCR)) ; Anthony VERDIN (ULCO – UCEIV - équipe Chimie et Toxicologie des Emissions Atmosphériques (CTEA)); Sophie FOURMENTIN (ULCO – UCEIV - équipe, équipe Chimie Supramoléculaire (CS)).

Hervé FLANQUART, Philippe CHAGNON, Audrey PELLETIER (ULCO, Laboratoire Territoires, Villes, Environnement et Société (TVES))

INERIS : Valérie BERT, Alexandre PERLEIN, Isabelle ZDANEVITCH, Rodolphe GAUCHER, Fabrice RICHEZ, Samuel TEILLAUD (Direction Sites et Territoires, Unité Technologies Propres et Economie Circulaire (TPEC) ; Arnaud PAPIN, Yohann BAILLON (Direction Milieux et Biodiversité, Unité méthodes ANALYTIQUES et développements pour l'Environnement (ANAE))

Patrice et Adrien FERRANT, Société FERRANT PHE (PME, partenaire privé producteur d'huiles essentielles)

M. DUPEUBLE, Direction Régionale de l'Alimentation, l'Agriculture et la Forêt Hauts de France (DRAAF)

Fabien DUTERTRE (Chambre d'Agriculture du Nord-Pas de Calais)

Romain VION (Association « Agriculture enjeux de territoire »)

CITATION DE CE RAPPORT

Anissa LOUNES – HADJ SAHRAOUI, Joël FONTAINE. 2021. Produire des huiles essentielles sur sols pollués - Phyteo : étude de faisabilité d'une filière éco-innovante de reconversion. **81 pages.**

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1772C0020

Projet de recherche coordonné par : LOUNES- HADJ SAHRAOUI Anissa
Appel à projet de recherche : Graine 2016

Coordination technique - ADEME : CADIERE Frédérique
Direction/Service : Villes et Territoires Durables / Friches Urbaines et Sites Pollués

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	6
1. CONTEXTE GENERAL, PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DU PROJET ...	7
2. METHODOLOGIE	11
2.1. Sites expérimentaux.....	11
2.1.1. Présentation des sites	11
2.1.2. Mise en place du dispositif expérimental	12
2.2. Caractérisation pédo-agronomique, chimique et biologique des sites expérimentaux.....	13
2.2.1. Plan d'échantillonnage	13
2.2.2. Analyse des caractéristiques pédo-agronomiques du sol	14
2.2.3. Analyse des fractions mobiles et totales en ETM dans le sol.....	14
2.2.4. Caractérisation biologique	14
2.3. Semis et suivi des cultures.....	15
2.3.1. Pouvoir germinatif des semences et semis.....	15
2.3.2. Détermination des taux de levée in situ	15
2.3.3. Suivi des cultures	16
2.3.4. Echantillonnage des plantes et du sol.....	16
2.3.5. Détermination des taux de mycorhization, de la hauteur et de la masse sèche de biomasse aérienne	16
2.3.6. Suivi de la contamination et de la mobilité des ETM	16
2.4. Récolte de la biomasse et distillation des HE	16
2.5. Qualité des HE	18
2.5.1. Analyse de la composition chimique des HE.....	18
2.5.2. Analyse des résidus de pesticides dans les HE	18
2.5.3. Analyse des ETM dans les HE	18
2.5.4. Etude des propriétés biologiques	18
2.6. Etude de la viabilité technico-économique de la filière PPAM/HE.....	21
2.7. Etude de l'acceptabilité sociale de la filière PPAM/HE.....	22
2.7.1. L'acceptabilité sociale	22
2.7.2. Enquêter auprès des consommateurs finaux	22
2.7.3. Les deux volets de l'enquête.....	23
3. PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS ET DISCUSSIONS	25
3.1. Caractérisation des parcelles.....	25
3.1.1. Propriétés pédo-agronomiques et niveau de contamination des sols	25
3.1.2. Caractérisation de la flore native du site pollué d'Evin-Malmaison	25
3.2. Semis et taux de levée	29
3.3. Croissance des PPAM et rendements en HE	29
3.3.1. Poids sec et hauteur de la coriandre et de la sauge sclarée avant récolte	30
3.3.3. Transfert des ETM dans les parties aériennes des PPAM	32

3.3.4. Production des HE issues de la biomasse de PPAM cultivées : rendements de distillation et quantité d'HE produites	33
3.4. Qualité des HE produites.....	34
3.4.1. Concentrations en ETM dans les HE de coriandre et de sauge	34
3.4.2. Résidus de pesticides dans les HE de coriandre et de sauge.....	35
3.4.3. Composition des HE produites sur les deux parcelles expérimentales.....	36
3.5. Evaluation de l'efficacité de phytostabilisation aidée.....	38
3.5.1. Concernant la combinaison coriandre-inoculum mycorhizien	38
3.5.2. Concernant la combinaison sauge-inoculum	38
3.6. Evaluation du niveau de contamination des résidus de distillation et études des filières de valorisation des résidus	40
3.6.1. La coriandre.....	40
3.6.2. La sauge	40
3.6.3. Valorisation des résidus de distillation de sauge et de coriandre	40
3.7. Propriétés biologiques des HE	42
3.7.1. Propriétés biologiques des HE avec un potentiel d'application en protection des cultures.....	42
3.7.2. Propriétés biologiques des HE avec un potentiel d'application en santé humaine. .	44
3.7.3. Encapsulation des HE et impact sur les propriétés biologiques des HE	46
3.8. Viabilité technico-économique de la filière.....	46
3.9. Acceptabilité sociale de la filière	47
3.9.1. Les principaux résultats de l'enquête,.....	47
3.9.2. Approfondir la question de l'acceptabilité à l'aide d'une Analyse des correspondances multiples (ACM)	56
3.9.3. Conclusion	58
4. RECOMMANDATIONS.....	58
5. CONCLUSION / PERSPECTIVES.....	59
PERSPECTIVES.....	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	67
SIGLES ET ACRONYMES	68

RÉSUMÉ

La reconversion durable des sols pollués visant à réduire les risques sanitaires et environnementaux est un enjeu important pour un aménagement pérenne et responsable des territoires. Parmi les méthodes émergentes sur le marché du traitement et de la gestion des sites et sols pollués, le phytomanagement, alliant phytotechnologie et valorisation de la phytomasse, permet la réappropriation de ces espaces dégradés en répondant à cette double exigence de performances environnementales et économiques. Ainsi, le projet PhytEO avait pour objectif de proposer une nouvelle filière de valorisation non alimentaire de la biomasse végétale produite sur des sols agricoles pollués par des éléments traces métalliques (ETM) sur le site atelier de Metaleurop. Il s'agissait d'évaluer *in situ* l'intérêt d'un mode de gestion reposant sur la phytostabilisation aidée par des champignons mycorhiziens et la production d'huiles essentielles (HE) extraites à partir de Plantes à Parfums Aromatiques et Médicinales (PPAM, angélique, sauge, coriandre) cultivées sur des parcelles polluées à l'échelle de l'hectare, et ceci au travers d'une démarche intégrant les aspects environnementaux et socio-économiques. La coriandre ainsi que la sauge sclarée ont toutes deux montré une bonne capacité à se développer et à produire une quantité importante de biomasse sur des sols présentant une forte pollution historique par les ETM. Bien que l'ajout d'un amendement biologique à base de champignons mycorhiziens ait permis d'augmenter de façon significative les taux de mycorhization des PPAM, aucun gain n'a été observé au niveau de la croissance, de la quantité et de la qualité des HE produites. En sa présence, la concentration dans les inflorescences de sauge a été réduite tout comme la mobilité du Cd dans le sol associé. D'autre part, les ETM et les résidus de pesticides ne sont détectés qu'à l'état de traces dans les HE distillées à partir de la biomasse de sauge sclarée (inflorescences) ou de coriandre (parties aériennes ou graines) cultivées sur ces sols pollués. L'analyse des compositions chimiques de ces HE n'a montré aucune modification ni par la pollution ni par l'inoculation mycorhizienne et a mis en évidence une grande richesse en principes actifs à l'origine de plusieurs propriétés biologiques potentiellement valorisables dans les domaines de la protection des cultures (effets fongistatiques, anti-germinatifs et herbicides) et de la santé humaine (effets anti-inflammatoires et antioxydants). Les résidus de distillation de la sauge pourraient être valorisés en amendements du sol ou en alimentation animale. Le consommateur final ne semble avoir de véritables réticences et inquiétudes pour l'utilisation de produits issus de cultures sur sol pollué que dans le cas où ceux-ci sont destinés à être ingérés ou, dans une moindre mesure, en contact direct avec le corps. Néanmoins une minorité d'individus, plus présents chez les plus âgés, est critique voire hostile à toute culture sur ce type de sols.

Enfin, l'ensemble des résultats de cette étude et de l'analyse technico-économique de la filière PPAM/HE soulignent la pertinence de la sauge sclarée dans une démarche de phytomanagement de sols pollués par les ETM. Le potentiel de l'angélique dont le développement a été retardé à cause d'épisodes de sécheresse récurrents (1^{ère} récolte fin juin 2020), sera évalué dans le cadre du projet DEPHYTOP.

ABSTRACT

The sustainable reconversion of polluted soils, aiming at reducing the health safety and environmental risks, is a crucial issue for a perennial and responsible territory development. Among the methods emerging on the market for the management and disposal of polluted soils, the phytomanagement which combines phytotechnology and biomass valorization, allows the recovery of these degraded areas while meeting both the environmental and economic requirements. Thus, PhytEO project's main ambition was to suggest an eco-innovative channel for the non-food valorization of the biomass produced on agricultural soils polluted with metallic trace elements (MTE), within the perimeter of Metaleurop area.

It aimed at evaluating the relevance of phytomanagement approach based on phytostabilisation aided with mycorrhizal fungi and essential oil (EO) production from aromatic plants (angelica, coriander and sage) cultivated on polluted plots at a hectare scale. This approach integrated environmental and socio-economic considerations. Coriander as well as clary sage have both shown a good ability to settle in, to grow and to produce high amounts of biomass, despite the presence of high MTE concentrations in the soil. Although the addition of an amendment based on arbuscular mycorrhizal fungi enhanced the mycorrhizal colonization rates of both coriander and clary sage roots, no significant improvement was observed in terms of plants' growth, EO amounts and quality. Moreover, mycorrhizal inoculation allowed a reduction of MTE transfer in aerial parts of clary sage as well as a Cd mobility reduction in the related soil. Besides, the EO distilled from clary sage inflorescences and coriander (aerial parts or seeds) grown on MTE polluted soils, displayed a satisfactory quality, regarding the absence of contamination by MTE or pesticide residues (trace amounts). Their chemical compositions were not altered by both MTE pollution and mycorrhizal inoculation and brought forward a high richness in active principles responsible for various biological properties potentially valuable in crop protection (antifungal, anti-germinative and herbicidal effects) and human health (anti-oxidant and anti-inflammatory effects) fields. Sage distillation residues could find potential applications as soil amendments or animal feed.

The end consumer seems to have noticeable concerns and reluctance regarding the use of products originating from biomass grown on polluted soils only when these products are intended to be either ingested or to a lesser extent in direct contact with the human body. Nonetheless, a minority of individuals, more represented among the oldest, is critical or even opposed to any kind of cultivation on these types of soils.

Altogether, our results combined with the techno-economic feasibility assessment of the channel "aromatic and medicinal plants/EO" have emphasized clary sage as a good candidate for the phytomanagement of MTE-polluted soils. The potential of angelica, whose development has been impaired and delayed due to repeating drought events (first harvest on June 2020), will be assessed within the framework of the forthcoming

1. Contexte général, problématique et objectifs du projet

Plus de 10 millions de sites pollués sont répertoriés à l'échelle mondiale. Au niveau européen, les estimations indiquent 2,5 millions de sites potentiellement pollués, dont 300 000 nécessiteraient une réhabilitation urgente (Mench et al., 2018). Parmi les polluants les plus fréquemment retrouvés, les éléments traces métalliques (ETM) sont détectés dans 37 % des sites pollués en Europe (Mench et al., 2018). Si les ETM sont naturellement présents dans le fond géochimique des sols, leur enrichissement est lié à des phénomènes géologiques et climatiques (éruptions volcaniques, altération de la roche mère) et en grande majorité à des activités anthropiques. Les activités industrielles, minières, agricoles et les transports ont notamment contribué à la pollution en ETM de divers compartiments des écosystèmes terrestres et/ou aquatiques, principalement à cause des retombées atmosphériques. De par leur persistance, leur toxicité et la progression de leurs teneurs dans l'environnement, la question de la gestion et de la requalification des sites et sols pollués par les ETM, en milieu rural et urbain, se pose et représente un enjeu majeur.

De par son passé industriel et sa forte densité de population, la région Hauts-de-France est particulièrement touchée par cette problématique et compte à ce jour près de 1000 sites pollués (13.5 % du patrimoine national), en particulier dans l'ancien bassin minier. Parmi les secteurs d'activités de la région, l'exploitation minière, la sidérurgie et la métallurgie ont contribué pour beaucoup à la pollution des sols par les ETM (Douay et al., 2013). C'est notamment le cas de l'ancienne fonderie de plomb Metaleurop Nord, située à Noyelles-Godault (62), qui pendant son activité a généré des quantités considérables de poussières chargées en ETM et qui, par retombées atmosphériques, ont contribué à la pollution des sols notamment en Pb, en Cd, et en Zn (Sterckeman et al., 2002). Cette pollution est d'autant plus problématique qu'elle s'étend sur une large surface de terres agricoles (730 ha) et qu'elle représente un danger pour près de 60 000 habitants. En effet, les ETM peuvent être sujet aux phénomènes naturels d'érosion des sols sous l'effet du vent (envols de poussières) ou de l'eau (ruissellements de surface, lessivage en profondeur) et ainsi représenter un danger par exposition directe ou par une contamination de la chaîne alimentaire pour les populations environnantes. De plus, un transfert de Cd, de Pb et de Zn des sols vers les productions végétales agricoles, potagères ou encore vers la végétation herbacée ou arborée a été constaté (Bidar et al., 2007). C'est pourquoi, la zone Metaleurop (site atelier du réseau SAFIR, Sites Ateliers Français pour l'Innovation et la Recherche) fait l'objet de politiques territoriales qui, sous la forme d'arrêtés préfectoraux successifs depuis 2015, prévoient un encadrement des activités et productions agricoles en fonction du degré de pollution du sol dans trois zones autour de l'ancien site industriel (Figure 1). Toute activité agricole est ainsi exclue dans la zone 1, la plus polluée (> 1000 ppm de Pb ou > 20 ppm de Cd – Figure 1), regroupant le site Metaleurop et la zone urbaine autour de celui-ci. Au sein de la zone 2 (entre 500 et 1000 ppm de Pb ou entre 10 et 20 ppm de Cd) et de la zone 3 (entre 200 et 500 ppm de Pb ou entre 4 et 10 ppm de Cd) plus élargie, couvrant près de 700 ha de terres agricoles, un encadrement sanitaire des productions agricoles a été mis en place par un système d'analyses libératoires (vérification de conformité) avant leur mise sur le marché. Les productions ne répondant pas aux critères de qualité attendus et présentant notamment des concentrations élevées en ETM sont déclassées ou détruites. Il est à noter également que les analyses étaient jusqu'alors prises en charge par l'état, mais sont désormais à la charge du producteur. Ces considérations représentent donc un enjeu économique majeur, en plus de la problématique sanitaire, pour les agriculteurs du secteur.

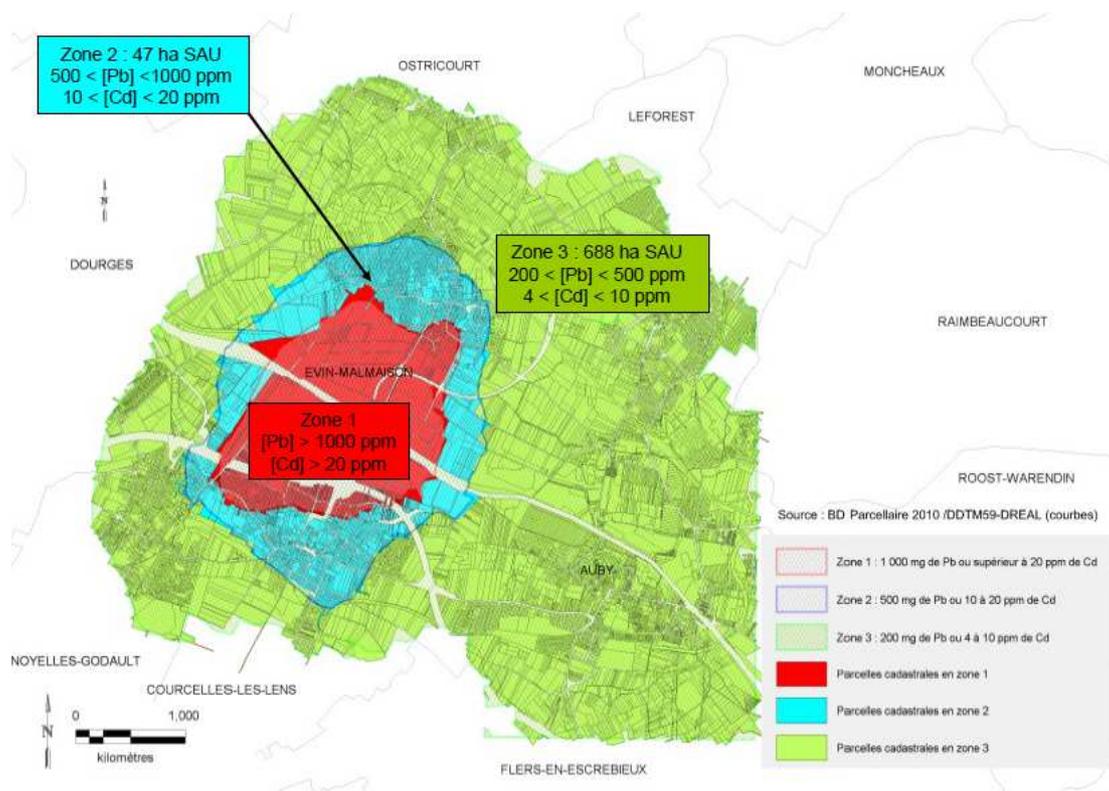


Figure 1 : Délimitation des trois zones du site Metaleurop (DRAAF Hauts-de-France, 2017).

Ainsi la reconversion durable des sites et des sols pollués est un enjeu important pour un aménagement pérenne et responsable des territoires et cette reconversion ne répond pas uniquement à la nécessité de réduire les risques sanitaires et environnementaux mais fait appel également à la réappropriation des espaces dégradés et dans le cas de la zone Metaleurop, à la reconversion de l'agriculture locale. Pour répondre à cette problématique, les phytotechnologies, basées sur l'utilisation de plantes et de leurs microbiotes rhizosphériques associés, semblent constituer une stratégie intéressante d'un point de vue technique, environnemental et socio-économique. C'est le cas de la phytostabilisation aidée où les espèces végétales en combinaison avec les amendements empêchent ou réduisent la mobilité des ETM prévenant les transferts des polluants vers les différents compartiments de l'environnement et dans la chaîne alimentaire. En effet, afin d'optimiser les performances de la phytostabilisation, diverses stratégies, dont l'utilisation d'amendements organiques, inorganiques et biologiques, ont été développées ces dernières années (Sarwar et al., 2017). Outre la réduction de la mobilité et de la biodisponibilité des polluants, ces amendements ont pour effet de favoriser l'installation et le développement du couvert végétal (Shah & Daverey, 2020). Par exemple, la colonisation des racines par les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) permet d'accroître l'immobilisation des polluants dans le sol mais aussi la croissance des plantes et leur tolérance à la toxicité des ETM (Firmin et al., 2015). De plus, la biomasse produite sur un sol phytostabilisé contient généralement des teneurs en ETM proches des valeurs physiologiques, ce qui en fait une biomasse *a priori* particulièrement propice à la valorisation dans un grand nombre de filières non alimentaires. Malgré ces atouts, les phytotechnologies ne sont qu'à leurs balbutiements en France. Elles sont mises en œuvre uniquement dans 3% des opérations de dépollution. Parmi les principaux verrous qui freinent leur développement, on peut citer le manque de retour d'expérience sur des essais à grande échelle à moyen et long terme, ainsi que la rentabilité socio-économique de ce mode de gestion. Les enjeux actuels de ces phytotechnologies portent sur la démonstration de leurs performances mais également sur l'identification de débouchés viables d'un point de vue technique, économique, social et réglementaire pour la biomasse produite sur sol pollué. Ainsi une gestion intégrée des sites et sols pollués par phytomanagement, permettrait non seulement de tenir compte des risques mais également des avantages économiques, sociaux et environnementaux. En outre, le développement de nouvelles filières permettrait d'une part, aux agriculteurs de conserver leurs activités et d'autre part, de valoriser leurs terres polluées à des fins non alimentaires.

Ces dernières années, plusieurs projets, à l'échelle régionale, nationale et européenne comme PHYTENER, PHYTOSED, BIOFILTER, GREENLAND, LORVER, DEMOPHYTO, MISCHAR, PHYTOFIBER, NETFIB ... menés *in situ* sur des sites ateliers historiquement pollués par les ETM, parfois à l'échelle de l'hectare, avaient pour objectif de tester des combinaisons d'espèces végétales arborées et herbacées avec des amendements biologiques ou minéraux dans une logique de phytostabilisation des ETM et de

développement de différentes filières de valorisation de la biomasse végétale (production d'énergie, de biochar, d'éco-matériaux fibrés) en tenant compte des aspects techniques, sociaux, réglementaires et économiques. Ainsi, sur le site atelier de Metaleurop plusieurs filières ont vu le jour. La filière miscanthus (projet PHYTENER) est la seule filière actuellement en développement sur le territoire, consistant à cultiver du miscanthus et à utiliser la biomasse soit pour alimenter des chaudières poly-concombustibles, soit comme paillage dans les espaces verts ou alors comme matériau en éco-construction. La filière chanvre industriel (projet MISCHAR), actuellement au stade expérimental, a quant à elle pour objectif de produire des fibres valorisables en éco-construction pour fabriquer du béton de chanvre, des panneaux isolants ou les utiliser en papeterie. Si l'utilisation de la biomasse à ces fins présente un grand intérêt et répond aux exigences environnementales en termes de rejets, celle-ci est limitée par certaines contraintes : notamment le coût plus élevé des plantations, le développement lent de certaines espèces végétales retardant le retour sur investissement et dans certains cas les faibles marges dégagées. Parmi les filières de valorisation éco-innovantes présentant a priori une rentabilité supérieure, la culture de plantes productrices d'huiles essentielles (HE) a été suggérée comme une option possible et prometteuse (Lal et al., 2008a,b ; Verma et al., 2014). En effet, la demande mondiale en HE, composés à haute valeur ajoutée, est en constante augmentation et devrait atteindre 5 milliards de dollars d'ici la fin de l'année 2050 (Verma et al., 2014). Pour répondre à cette demande, l'expansion de la production des HE sur des terrains pollués pourrait être une option intéressante. Différents travaux ont démontré l'intérêt des plantes à parfums aromatiques et médicinales (PPAM) telles que le romarin, la lavande ou le thym dans l'immobilisation des ETM dans des sols amendés en matières organiques, en carbonate de calcium ou en chaux (Madejon et al., 2009 ; Parra et al., 2014). Malgré la présence des ETM dans la partie aérienne de certaines PPAM, il a été montré que ces polluants se retrouvent à l'état de traces dans les HE (Zheljzkov et al., 2006 ; Abu-Darwish, 2009 ; Danh et al., 2011, Khajanchi et al., 2013 ; Angelova et al., 2015), à des concentrations inférieures à celles recommandées dans l'article 4a de la directive européenne 88/388/CEE (1 mg/Kg de Cd ou 10 mg/kg de Pb). Des travaux menés par exemple sur le romarin ont montré que la biosynthèse de composés antioxydants pouvait être favorisée chez les plantes provenant des sites les plus pollués (Affholder, 2013). Les HE constituent une matière première recherchée et utilisable dans diverses industries non alimentaires (cosmétiques, pharmaceutiques et phytosanitaires). En effet, la demande industrielle de ces composés à forte valeur ajoutée s'est accrue d'une façon considérable ces dernières années, et ce grâce à la multiplicité de leurs usages dans de nombreux secteurs industriels et l'engouement des consommateurs pour ces produits naturels (Bessah et al., 2015). L'industrie des cosmétiques, savonneries et parfums constitue le plus gros consommateur d'HE en représentant 60 % de la demande (Lubbe & Verpoorte, 2011). Les HE sont utilisées comme matière première de base dans la fabrication des parfums et d'autres produits cosmétiques (Fischetti, 2010). De nombreux travaux de recherche ont également mis en évidence leur puissante activité biocide agissant aussi bien sur les bactéries, les champignons que les virus, ce qui pourrait élargir leur champ d'applications (Burt, 2004). Ils pourraient également constituer une solution alternative plus durable de lutte contre les maladies des plantes grâce à leurs diverses propriétés biocides (biopesticides, insecticides, larvicides), ce qui permettrait de réduire l'usage des produits phytosanitaires chimiques nocifs pour la santé de l'Homme et l'environnement (plans Ecophyto). Cependant, l'utilisation des HE est généralement limitée en raison de leur faible solubilité, stabilité et volatilité (Turek & Stintzing, 2013). C'est pourquoi, le développement de nouvelles formulations grâce à leur encapsulation par la β -cyclodextrine pourrait permettre d'augmenter leur efficacité et de développer de nouveaux domaines d'applications.

Ainsi, le projet PhytEO avait pour objectif de proposer une nouvelle filière de valorisation non alimentaire de la biomasse végétale produite sur des sols agricoles pollués par des ETM sur le site atelier de Metaleurop. Pour cela, nous avons évalué *in situ* la faisabilité technique et socio-économique d'un mode de gestion reposant sur la phytostabilisation aidée des ETM et la production d'HE extraites à partir de trois espèces de PPAM (angélique, sauge, coriandre) cultivées sur des parcelles polluées, à l'échelle de l'hectare.

Dans le cadre de ce projet, les défis sont multiples. Nous avons tenté de lever différents verrous scientifiques et technologiques grâce à :

- la mise en œuvre de démonstrateurs *in situ* à grande échelle (2 ha x 2) de PPAM pour étudier l'intérêt d'utiliser des espèces végétales productrices d'HE dans une stratégie de phytostabilisation aidée
- l'investigation de l'intérêt d'apport d'amendements biologique ou minéral sur la croissance des PPAM et l'amélioration de la qualité des HE et du processus de phytostabilisation
- l'extraction des HE à grande échelle à partir de la phytomasse récoltée
- l'évaluation de la qualité des HE extraites à partir de la biomasse végétale produite sur sols pollués par les ETM
- la détermination des activités biocides (anti-bactériennes et anti-fongiques), anti-inflammatoires et antioxydantes potentielles des HE
- l'évaluation de l'intérêt de l'encapsulation des HE sur les propriétés biologiques testées

- la proposition de filières de valorisation des résidus issus du procédé d'extraction des HE en fonction de leur degré de contamination par les ETM (méthanisation, combustion, compostage, fourrage)
- l'évaluation technico-économique du concept
- l'étude de l'acceptabilité sociale de la filière HE extraites à partir de la biomasse végétale produite sur des sols pollués

Les résultats attendus à l'issue du projet étaient (i) la pérennisation de l'agriculture locale en proposant aux agriculteurs, pénalisés par la contamination de leurs terres, le maintien d'une activité agricole viable à partir de productions végétales non alimentaires ; (ii) la démonstration en conditions expérimentales *in situ* de la faisabilité et de l'intérêt de cette filière et (iii) la proposition de solutions techniques, technologiques ou organisationnelles aux différents acteurs en charge de la gestion des sites et sols pollués. En résumé, la finalité d'un tel projet était la proposition d'une filière de valorisation non alimentaire de la biomasse produite sur sols pollués par les ETM respectant les critères de durabilité environnementale et s'inscrivant dans les principes d'une économie circulaire.

Ce projet de recherche s'intègre parfaitement dans le projet de territoire engagé par les services de l'État et leurs partenaires sur la zone agricole polluée par l'ancienne usine Metaleurop Nord. Il s'appuie sur un partenariat universitaire transdisciplinaire, institutionnel et privé pour examiner le bienfondé, la viabilité technico-économique et l'acceptabilité sociale de ce mode de gestion des sols pollués. Il s'agira de faire progresser les connaissances dans le domaine du phytomanagement des sols pollués et de proposer des recommandations techniques, technologiques et organisationnelles aux agriculteurs et aux différents acteurs en charge de la gestion des sites et sols pollués.

2. Méthodologie

2.1. Sites expérimentaux

2.1.1. Présentation des sites

Dans le cadre de ce projet, deux parcelles expérimentales de 2 ha chacune ont été mobilisées : une parcelle polluée par les ETM située à Evin-Malmaison et une seconde, non polluée, située à Rodelinghem.

2.1.1.1. Parcelle historiquement polluée par les ETM

Une première parcelle de 2 ha (Figure 2), située à Evin Malmaison (Coordonnées GPS : 3°02'25.5", 50°25'55.5") a été mobilisée. Celle-ci se trouve dans la zone 3, à la limite de la zone 2 du périmètre du site Metaleurop (Figure 1), défini dans l'arrêté préfectoral du 29 mai 2015 et soumis à un encadrement sanitaire des productions agricoles et présente des teneurs en ETM comprises entre 4 et 10 ppm pour le Cd et entre 200 et 500 ppm pour le Pb. Cette parcelle fait partie du site atelier recensé dans le réseau SAFIR et appartient au bassin minier Metaleurop.



Figure 2 : Localisation de la parcelle polluée par des ETM située à Evin-Malmaison (62).

2.1.1.2. Parcelle non polluée par les ETM

Une seconde parcelle, de 2 ha, non polluée par les ETM (Figure 3), située à Rodelinghem (62) (Coordonnées GPS 1°55'46.9", 50°49'55.7") et présentant des concentrations en ETM comparables aux bruits de fond géochimique de sols agricoles de la région Hauts de France (Cd : 0,03 à 1,39 ppm ; Pb : 13,4 à 198,1 ppm ; Zn : 24,2 à 310 ppm - base de données ASPITET de l'INRA), a été également utilisée lors de cette étude.



Figure 3 : Localisation de la parcelle non polluée par les ETM située à Rodelinghem (62).

2.1.2. Mise en place du dispositif expérimental

2.1.2.1. Choix des espèces végétales

Trois espèces de PPAM ont été choisies dans le cadre de ce projet : la coriandre, la sauge sclarée et l'angélique. Plusieurs critères ont été pris en compte dans ce choix : (1) leur acclimatation à la région Hauts de France, (2) le coût et disponibilité de la semence, (3) la valeur marchande et le potentiel commercial de l'HE, (4) l'attractivité de l'HE pour le producteur d'HE partenaire du projet, (5) le cycle de végétation des PPAM, (6) les itinéraires techniques et enfin (7) le potentiel des PPAM en termes de phytostabilisation. Il est à souligner que la sélection comporte des espèces ayant des cycles de développement différents (une annuelle, une bisannuelle et une pérenne), capables de se développer dans le contexte pédoclimatique de la région des Hauts-de-France avec un nombre de traitements ou d'intrants limités sur la parcelle et possédant un potentiel commercial attractif dans une filière non-alimentaire (sauge sclarée, angélique) ou déjà décrites dans d'autres études en phytostabilisation (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques des PPAM cultivées dans le projet Phyteo.

	Angélique <i>Angelica archangelica L.</i> Apiacées	Sauge sclarée <i>Salvia sclarea L.</i> Lamiacées	Coriandre <i>Coriandrum sativum L.</i> Apiacées
			
Cycle de végétation	Pérenne (≈ 10 ans)	Bisannuelle (3 ans)	Annuelle
Récolte	Dès la deuxième année	1 ^{ère} année ≈ 10% (rendements) 2 ^{ème} année ≈ 100% 3 ^{ème} année ≈ 70%	Année du semis
Phytostabilisation	-	Angelova et al., 2016	-

2.1.2.2. Délimitation du parcellaire

Les deux parcelles d'étude ont chacune été découpées en 3 surfaces équivalentes d'environ 6500 m² chacune afin d'y cultiver l'angélique, la sauge et la coriandre dès la première année du projet (Figure 4). Pour chaque plante, la surface a été également subdivisée en 3 surfaces équivalentes d'environ 2200 m² chacune (Figure 4). Dans la première, les sols ont été amendés avec un inoculum mycorhizien commercial (AGTIV – cultures spécialisées, Premier Tech agriculture), à base de *Rhizophagus irregularis*; l'inoculum mycorhizien, sous forme de poudre (125 g/ha), est mélangé à la semence (poudrage) lors du semis. La deuxième surface était prévue pour un éventuel ajout d'un amendement minéral (ex : matériaux alcalins, phosphates, oxy(hydroxy)des de fer et de manganèse) à choisir en fonction des résultats obtenus suite au premier essai notamment en termes de mobilité des ETM dans le sol et enfin la troisième surface restera comme témoin non amendé.

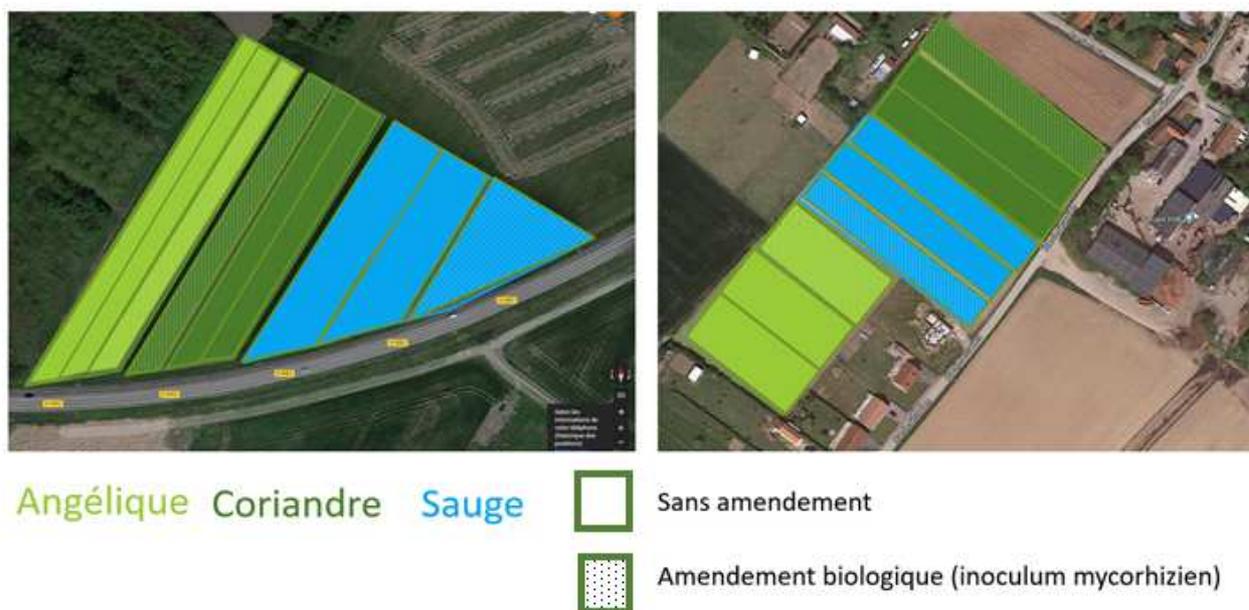


Figure 4 : Délimitation du parcellaire de la parcelle non polluée (Site de Rodelinghem) et de la parcelle polluée (Site d'Evin-Malmaison).

Des bandes non végétalisées sont conservées entre les différentes parcelles amendées ou non (espacées de 2 m) ainsi qu'entre les différentes espèces végétales (espacées d'1 m) comme décrit ci-dessus. Ces bandes non végétalisées permettent de garder un espace entre les différentes modalités afin d'éviter que l'inoculum mycorhizien ne puisse coloniser les racines des plantes de la modalité voisine (non inoculée notamment).

L'ensemble des interventions sur les parcelles expérimentales sont synthétisées dans la frise chronologique représentée dans la Figure 5 ci-dessous.

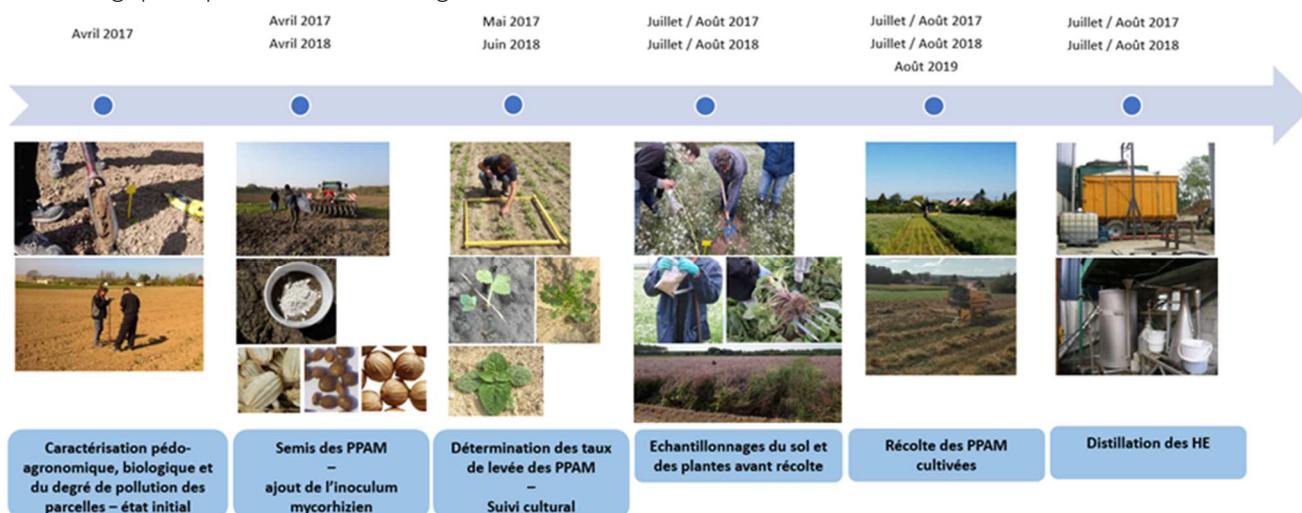


Figure 5 : Frise chronologique des interventions sur les parcelles d'Evin-Malmaison et de Rodelinghem

2.2. Caractérisation pédo-agronomique, chimique et biologique des sites expérimentaux

2.2.1. Plan d'échantillonnage

Des prélèvements de sol ont été réalisés le 6 avril 2017 d'une part pour caractériser la parcelle d'un point de vue pédo-agronomique et d'autre part pour déterminer les teneurs totales et mobiles en ETM présentes dans les sols des deux parcelles expérimentales. Des prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une tarière manuelle, dans les horizons superficiels du sol (25 premiers centimètres). Chaque point de prélèvement a été également géolocalisé par relevé GPS avec une précision de 50 cm (Appareil Trimble TDC100, antenne R1). Le plan de prélèvement est présenté ci-dessous (Figure 6).



Figure 6 : Cartographie des points de prélèvement réalisés pour caractériser l'état initial des parcelles - Parcelle non polluée à gauche ; parcelle polluée à droite. Les contours correspondant à la délimitation des parcelles pour l'implantation future des PPAM sont indiqués (angélique en bleu – coriandre en noir – sauge en rouge).

2.2.2. Analyse des caractéristiques pédo-agronomiques du sol

L'analyse des caractéristiques pédo-agronomiques (texture du sol, carbone organique total, teneur en matière organique, rapport C/N, capacité d'échange cationique, taux de calcaire, azote total, phosphore échangeable, potassium échangeable, magnésium échangeable, calcium échangeable et sodium échangeable) du sol des parcelles a été sous-traitée.

2.2.3. Analyse des fractions mobiles et totales en ETM dans le sol

Pour chaque échantillon de sol (0-25 cm), environ 250 g de sol ont été pesés et mis à l'étuve (40°C, 48h). Le sol sec a été broyé à 2 mm puis tamisé. Le pH à l'eau a été réalisé selon la norme NF ISO 10390 (2005).

Quantification des ETM dans les surnageants d'extraction au nitrate d'ammonium des sols :

L'extraction de la fraction libre en ETM s'effectue au nitrate d'ammonium (NH_4NO_3 , 1 M). Cet extractant permet de retrouver dans le surnageant les composés solubles, la fraction ionique échangeable et les complexes métalliques solubles (ISO 19730: 2008(E)). 10g de sol sec sont mélangés à 25 mL de solution de NH_4NO_3 (1 M) et agités pendant 2h. La solution est ensuite filtrée (filtre de 45 μm) à l'aide d'un système d'extraction à air comprimé pour récupérer le surnageant. Le surnageant est analysé par ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Spectroscopy) ou par ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) pour quantifier les ETM selon les protocoles de qualités internes à l'INERIS. Des contrôles ont été inclus dans les racks d'analyse.

Digestion à l'acide fluoridrique et quantification de la fraction totale en ETM des sols :

La digestion s'effectue à l'acide fluoridrique à 100%. Le sol sec de granulométrie 2 mm est broyé pour obtenir un sol sec tamisé de granulométrie 250 μm . 0,2 g de sol sec est mis en contact avec 9 mL d'acide chlorhydrique (HCl), 3 mL d'acide nitrique (HNO_3) et 2 mL d'acide fluoridrique (HF) dans un matras en téflons. Le matras est ensuite chauffé (micro-onde) afin d'augmenter l'efficacité de l'attaque acide. Une fois le matras refroidi, l'HF est neutralisé par de l'acide borique. Le minéralisa volumé à 50 mL par de l'eau distillée milli Q. est ensuite filtré et les ETM analysés par ICP-OES ou MS selon les protocoles de qualités internes à l'INERIS. Des contrôles ont été inclus dans les racks d'analyse.

2.2.4. Caractérisation biologique

Isolement et quantification de spores de CMA à partir du sol

Des prélèvements d'échantillons de sol ont été réalisés dans les 25 premiers centimètres sur les parcelles polluées ou non, avant les semis, pour rechercher la présence de champignons mycorhiziens autochtones « autochtones ». Afin d'isoler et de quantifier les spores de CMA présentes dans le sol, la méthode de tamisage humide décrite par Gerdemann et Nicolson (1963) a été utilisée.

Détermination des taux de mycorhization

Afin de mesurer les taux de mycorhization des PPAM ou des espèces végétales autochtones présentes sur le site d'Evin-Malmaison, des prélèvements de racines des plantes ont été effectués et colorées selon la technique de Phillips et Hayman (1970) (modifiée). Les racines sont préalablement lavées à l'eau claire puis colorées avec du bleu Trypan (bleu Trypan 0,5g dans 32/32/467 mL d'un mélange d'eau/glycérol/acide lactique) pendant 1h à 70°C, après avoir été éclaircies dans une solution de KOH 10% pendant 1 h à 70°C.

La présence des structures fongiques spécifiques des CMA (arbuscules, vésicules et hyphes fongiques) observées au microscope optique (x40). Le pourcentage de colonisation total est égal au nombre d'intersections avec les racines mycorhizées $\times 100 /$ nombre d'intersections totales. Ce pourcentage de colonisation est exprimé en fonction des pourcentages d'arbuscules et de vésicules distincts.

Inventaire floristique des espèces autochtones

L'inventaire floristique de la parcelle expérimentale polluée par les ETM a été réalisé au printemps 2019. Le dénombrement et l'identification des espèces végétales présentes ont été réalisés à l'aide de relevés par quadrats d'1 m², au nombre de 13, dont la position a été déterminée aléatoirement sur la parcelle. La position de ces treize quadrats a été géolocalisée. L'identification des plantes a été réalisée selon l'ouvrage de Bonnier et al. (1986).

La diversité α ou diversité au sein d'un habitat ou d'une aire géographique délimitée caractérise la variété et l'abondance des espèces au sein d'une unité d'étude. Des coefficients d'abondance-dominance et de sociologie de Braun-Blanquet sont attribués à l'ensemble des espèces identifiées dans chaque quadrat. Les relevés sont également traduits en indices de composition : les indices de Menhinick (1964) et de Margalef (1958) qui traduisent à la fois la richesse des espèces et l'abondance des individus d'un groupe biologique étudié ; les indices de diversité de Shannon Weaver (1948) et de Simpson (1949) qui permettent d'identifier si une espèce est dominante ou si toutes les espèces sont présentes avec un effectif similaire. Le coefficient d'abondance-dominance de Braun-Blanquet désigne une estimation de l'espace occupé et traduit le recouvrement spatial de l'espèce sur la zone d'étude échantillonnée (Annexe 3).

2.3. Semis et suivi des cultures

2.3.1. Pouvoir germinatif des semences et semis

Le pouvoir germinatif des différentes semences employées a tout d'abord été vérifié au laboratoire dans différentes conditions expérimentales semi-contrôlées. Pour ce faire, des graines, qui étaient conservées à 4 °C, ont été placées sur différents supports de culture (papier filtre imbibé d'eau, sol prélevé de la parcelle non polluée, sol prélevé de la parcelle polluée) et la germination des graines a été suivie pendant 15 jours par comptages quotidiens.

Les densités de semis (300 000 graines / hectare) par espèce végétale ainsi que la période de semis ont été établies selon les recommandations de la société Ferrant PHE et les données communiquées par l'ITEIPMAI. L'inoculum commercial testé dans le cadre de cette étude, sous forme de poudre, a été introduit au moment du semis, directement mélangé avec la semence. Les différents semis ont été échelonnés sur deux années de culture comme détaillé dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Chronologie des semis des PPAM dans le cadre du projet PhytEO.

Année de semis	PPAM	Date de semis			
		Parcelle non polluée		Parcelle polluée	
2017	Coriandre	10 avril		7 avril	
	Sauge				
	Angélique	10 avril	Re-semis le 15 mai	7 avril	Re-semis le 15 mai
2018	Coriandre	23 avril		20 avril	
	Angélique			20 avril	Re-semis le 19 septembre

2.3.2. Détermination des taux de levée in situ

Le taux de levée associé à chaque espèce végétale a été évalué 1 mois et demi après semis, à 3 positions déterminées aléatoirement dans la parcelle et par condition (modalités inoculées ou non par l'inoculum mycorhizien). Pour chaque position, des comptages ont été réalisés au sein de 3 quadrats d'un mètre carré, selon le dispositif représenté dans l'Annexe 1 et selon une méthodologie adaptée de Braun-Blanquet (1928) et de la méthode des points quadrats (Daget et Poissonet, 1971). Chaque point de relevé a été géoréférencé à l'aide d'un appareil GPS, avec une précision de 50 cm.

2.3.3. Suivi des cultures

Le développement des plantes est suivi régulièrement dans le but de déceler la présence de maladies et/ou d'espèces adventices sur la parcelle ainsi que de pouvoir définir une date optimale de récolte. Les différentes interventions réalisées sur les parcelles sont également suivies en étroite collaboration avec Ferrant PHE : le désherbage global de la parcelle (Annexe 2) ainsi que la conservation de bandes non végétalisées, intercalées entre les différentes « sous-parcelles » sont ainsi réalisés chaque année.

2.3.4. Echantillonnage des plantes et du sol

Des prélèvements de plantes et de sol (500 g) ont été réalisés quelques jours avant la récolte des PPAM (Tableau 3).

Tableau 3 : Synthèse des échantillons prélevés sur les sites pollué d'Evin-Malmaison et non pollué de Rodelinghem (L : lavé ; NL : non lavé).

Date d'échantillonnage	Echantillons
Juillet et septembre 2017	Sol (toutes les conditions)
Juillet 2017	<i>Coriandrum sativum</i> L. (feuilles ^L)
Septembre 2017	<i>Salvia sclarea</i> L. (feuilles ^{NL})
Avril 2018	Sol (coriandre)
Juillet 2018	Sol (sauge)
Juillet 2018	<i>Salvia sclarea</i> L. (inflorescences ^{L+N})
Août 2018	Sol (coriandre)
Août 2018	<i>Coriandrum sativum</i> L. (graines ^L)

Les différents points de prélèvement sont systématiquement géoréférencés à l'aide d'un appareil GPS, avec une précision de mesure de 50 cm. Les points de prélèvement correspondant aux prélèvements avant récolte sont représentés dans l'Annexe 4.

2.3.5. Détermination des taux de mycorhization, de la hauteur et de la masse sèche de biomasse aérienne

Les parties aériennes prélevées ont été mesurées puis séchées à l'étuve (72 h à 80 °C), afin d'en déterminer le poids sec. Les taux de mycorhization ont également été mesurés en suivant la même méthodologie que celle décrite dans la section 2.2.4.

2.3.6. Suivi de la contamination et de la mobilité des ETM

De manière analogue à la méthodologie présentée au point 2.2.3, les échantillons de sol sont traités afin de déterminer les fractions mobile et totale en ETM.

De plus, les organes végétaux correspondant à la biomasse distillée pour obtenir les huiles essentielles ont été prélevés afin de quantifier la teneur en ETM. A l'exception des échantillons de sauge d'Evin-Malmaison de 2017, chaque échantillon végétal est lavé avant d'être mis à l'étuve (40°C, 48h). Il est ensuite broyé. L'analyse des ETM dans les végétaux a été réalisée après minéralisation à l'eau régale : 0,5 g sont minéralisés en four micro-onde à 180 °C pendant 20 min dans 10 mL d'acide nitrique (HNO₃ 67%) et 3 mL d'eau ultra-pure (Mars Xpress CEM) puis le minéralisa est analysé par ICP-OES ou MS. Des contrôles ainsi que des échantillons de sauge et de coriandre provenant du sol non pollué de Rodelinghem ont été inclus dans les racks d'analyse.

2.4. Récolte de la biomasse et distillation des HE

La récolte de la biomasse a été réalisée avec l'aide de la société Ferrant PHE (Tableau 4). Suite à la récolte de chaque espèce, la biomasse obtenue est acheminée vers le lieu de distillation par la société Ferrant PHE. Un pilote fonctionnel d'extraction des HE a été mis à disposition par Ferrant PHE (Figure 7), qui a réalisé le process de distillation des HE.

Tableau 4 : Date de récolte des différentes PPAM selon l'année de culture.

Année de semis	PPAM	Date de RECOLTE	
		Parcelle non polluée	Parcelle polluée
2017	Coriandre	12 juillet	19 juillet
	Sauge	29 août	11 septembre
2018	Coriandre	21 août	3 septembre
	Sauge	17 et 19 juillet	16 et 18 juillet
2019	Sauge	23 et 29 juillet	14 et 16 août



Figure 7 : Pilote d'extraction des huiles essentielles ; à gauche le réfrigérant et l'essencier pour récupérer les HE, à droite la remorque permettant la distillation de la biomasse.

La matière végétale récoltée a été placée dans une enceinte fermée hermétiquement dans laquelle est injectée de la vapeur d'eau. La vapeur d'eau, en passant à travers la matière végétale se charge en composés volatils extraits de la plante et passe ensuite à travers un système de refroidissement, où celle-ci est recondensée. Dans le cas de faibles quantités de biomasse récoltées ou pour la distillation des graines, de la paille peut être ajoutée afin de réduire la vitesse de circulation de la vapeur d'eau et d'améliorer les rendements de distillation. Après décantation, l'huile essentielle moins dense que l'eau, est recueillie : il s'agit d'un procédé d'entraînement à la vapeur, dont le principe est schématisé sur la Figure 8. La mesure du volume de biomasse est possible grâce à des graduations disposées dans la remorque.

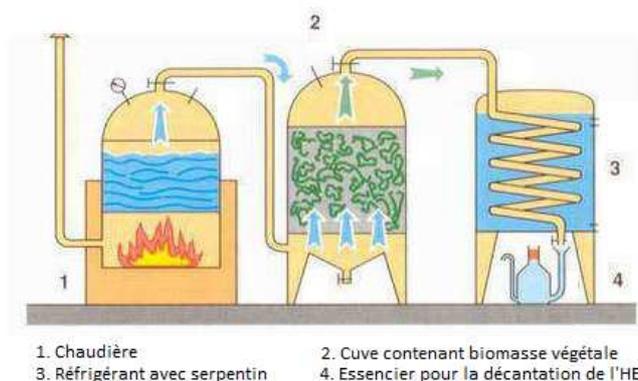


Figure 8 : Procédé de distillation des HE par entraînement à la vapeur.

Les résidus de biomasse issus de la distillation ont été échantillonnés par lot et mis à disposition de l'INERIS pour y vérifier les teneurs en ETM présentes. Plusieurs voies de valorisation des résidus de distillation de la sauge et de la coriandre ont été étudiées (méthanisation, compostage, alimentation animale). La détermination de la teneur en ETM dans les HE est également analysée par l'INERIS.

2.5. Qualité des HE

2.5.1. Analyse de la composition chimique des HE

La composition chimique des HE a été déterminée par chromatographie en phase gazeuse, équipée d'une colonne capillaire ZB-5MS (Phenomenex - 5 % Phenyl-arylène / 95% diméthylpolysiloxane - longueur 10 m, diamètre interne 0,10 mm, épaisseur de la phase 0,10 μm) et couplée à un spectromètre de masse (Shimadzu QP 2010 Ultra). Préalablement diluées dans de l'acétate d'éthyle (ratio 1:200 (v/v)), les HE sont injectées en mode « split » (ratio 1:10) dans un volume de 0.2 μL , à 220 °C. Le système a été maintenu à une vitesse linéaire constante de 60 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ et le débit du gaz vecteur, de l'hélium, est de 0,8 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Le programme débute à une température de 60 °C et augmente progressivement de 40 °C/min pour atteindre un palier de 280 °C. Les spectres de masses ont été déterminés en mode « impact électronique » à 70 eV et enregistrés sur une étendue de 35 à 350 (m/z). Les paramètres de températures du spectromètre ont été fixés à 280 °C pour la source d'ions et à 240 °C pour la ligne de transfert. Les indices de rétention de Kovats ont été déterminés à partir de co-injections d'alcane. L'identification des composés des HE a été effectuée en comparant les indices de Kovats et les spectres de masse obtenus en sortie de colonne avec ceux des bibliothèques NIST et Wiley 275 (Bandoni et al., 2011 ; Kuźma et al., 2009 ; Pitarokili et al., 2002 ; Ronyai et al., 1999).

2.5.2. Analyse des résidus de pesticides dans les HE

Une analyse des résidus de pesticide ciblant environ 600 molécules actives a été réalisée sur les HE par GC-MS/MS (méthode MOC3/05(S1), version 0) et LC-Q-TOF (méthode MOC3408(S1), version 2) par la société Phytocontrol.

2.5.3. Analyse des ETM dans les HE

Une recherche des ETM dans les HE a été réalisée pour chaque condition étudiée (saugé sclarée (inflorescences) et de la coriandre (graines, parties aériennes) / parcelles polluée et témoin) ainsi que dans des HE commerciales de coriandre et de saugé sclarée. 0,5 g de condensat chargé en huile essentielle a été analysé en suivant le protocole pour les végétaux (2.3.6.) Les analyses ont été réalisées en triplicatas.

2.5.4. Etude des propriétés biologiques

Les activités biologiques des HE distillées à partir de la saugé sclarée (inflorescences) et de la coriandre (graines, parties aériennes) ont été étudiées. Ainsi, en vue d'applications en protection des cultures, les pouvoirs antifongique, anti-germinatif et herbicide des HE ont été évalués *in vitro* tandis que les activités antioxydantes et anti-inflammatoires ont également été recherchées, en vue d'applications dans le domaine de la santé humaine.

2.5.4.1. Propriétés antifongiques

L'activité antifongique des différentes HE a été testée contre deux champignons phytopathogènes, *Zymoseptoria tritici* (par contact direct en milieu liquide) et *Fusarium culmorum* (par contact direct et volatilité sur milieu solide). Les HE préalablement solubilisées dans du DMSO à 1% sont utilisées à des concentrations finales allant de 0,005 à 1 % (v/v). Pour chaque modalité, trois répétitions indépendantes ont été réalisées.

Pour *Zymoseptoria tritici*, les expériences ont été menées en microplaques. Les HE testées sont incorporées directement dans les puits contenant un milieu liquide Glucose-Peptone. 60 μL d'un inoculum fongique ($2\cdot 10^5$ spores/ml) sont introduits dans chaque puits (8 puits par condition) et les microplaques sont incubées sous agitation mécanique (110 RPM) pendant 6 jours à 20°C. Après ce délai, qui correspond à un temps optimal de développement pour le champignon, les densités optiques sont lues à 620 nm par spectrophotométrie. Les valeurs de CI50 sont obtenues grâce à une régression non linéaire à l'aide du logiciel XLStat (Sahmer et al., 2015).

Pour *Fusarium culmorum*, les activités antifongiques des HE a été évaluée par contact direct (Figure 9) selon une méthodologie adaptée de Znini et al., (2013). Les HE sont introduites dans le milieu de culture (PDA) refroidi à 50 °C avant d'être coulées dans des boîtes de Pétri de 9 cm de diamètre. Un témoin positif correspondant à un fongicide de référence (Aviator XPRO, à base de Bixafen et Prothioconazole – homologué sur grandes cultures contre septorioses et fusarioses) a également été réalisé (concentrations variant de 5×10^{-5} à 0,5 %).

Une fois le milieu refroidi, les boîtes sontensemencées avec un inoculum de 9 mm de diamètre, prélevé à l'aide d'un emporte-pièce stérile, à partir de la périphérie d'un tapis mycélien provenant d'une culture

du champignon âgée de 7 jours. Les inocula sont déposés avec le mycélium en contact direct avec la gélose, au centre des boîtes. Le diamètre de la croissance radiale du mycélium fongique est mesuré après 7 jours d'incubation à 20 °C afin de calculer le pourcentage d'inhibition de la croissance mycélienne (Sahmer et al., 2015).

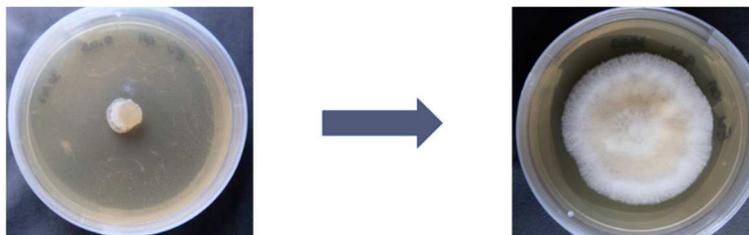


Figure 9 : Activité antifongique par contact direct contre *Fusarium culmorum* (présentée ici pour l'HE de coriandre feuilles).

L'activité antifongique des HE par volatilité a été évaluée selon une méthode adaptée d'Abarca et al., (2016) et de Chutia et al., (2009). Un témoin positif correspondant à un fongicide de référence (Aviator XPRO, à base de Bixafen et Prothioconazole – homologué sur grandes cultures contre septorioses et fusarioses) a également été réalisé (concentrations variant de 5×10^{-5} à 0,5 %). 10mL de PDA sont introduits (avant prise en masse du milieu) dans une boîte de Pétri de 5,5 cm. Cette petite boîte est déposée au centre d'une boîte de Pétri de 9cm de diamètre, contenant elle 10 mL d'une solution aqueuse des HE (Figure 10 & 11).

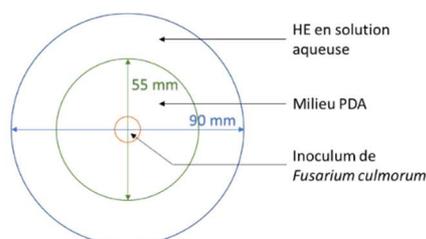


Figure 10 : Représentation schématique du dispositif utilisé pour les tests antifongiques par volatilité.

Un inoculum de 9 mm de diamètre, prélevé à l'aide d'un emporte-pièce stérile à partir de la périphérie d'un tapis mycélien provenant d'une culture du champignon âgée de 7 jours, est déposé au centre de la boîte de 5,5 cm de diamètre, avec le mycélium en contact direct avec la gélose. Le diamètre de la croissance radiale du mycélium fongique est mesuré après 5 jours d'incubation à 20 °C afin de calculer le pourcentage d'inhibition de la croissance mycélienne (Sahmer et al., 2015).

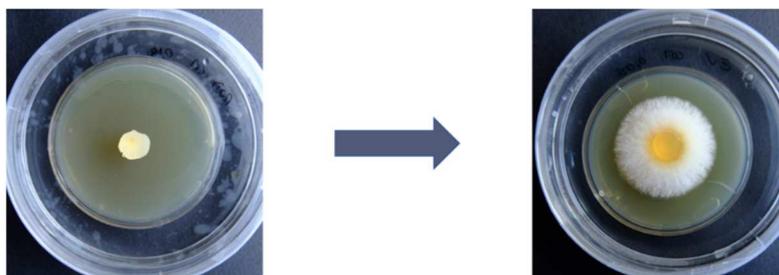


Figure 11 : Activité antifongique par volatilité contre *Fusarium culmorum* (présentée ici pour l'HE de coriandre feuilles).

2.5.4.2. Propriétés anti-germinatives et herbicides

Les propriétés anti-germinatives et herbicides sont évaluées vis-à-vis de deux espèces végétales : le ray-grass (monocotylédone) ainsi que la laitue (dicotylédone), communément utilisées comme espèces bioindicatrices pour les tests de phytotoxicité (Park et al., 2016) et recommandées dans les directives ISO (1995), de l'OECD (2003) et de l'US EPA (1996). L'activité anti-germinative des HE par contact direct, a été évaluée selon une méthodologie adaptée de Paul et al., (2001). Après avoir été solubilisée dans du DMSO à 1%, les HE sont introduites dans un milieu gélosé Agar (1 %), non complété, refroidi à 50 °C. Une gamme de concentration en HE (0,0005 à 0,5 %) est évaluée dans un volume final de 60 mL de lieu par boîte de Petri. Un témoin positif correspondant à un herbicide systémique non sélectif (Glyphosate, sel

d'isopropylamine - 360 g.L⁻¹) a également été testé sur la même gamme de concentrations que les HE. Une fois le milieu refroidi, les graines de laitue (12 par boîte – Figure 12) ou de ray-grass (10 par boîte – Figure 13) sont déposées à la surface de la gélose, régulièrement espacées. Les boîtes de pétri sont ensuite placées en position verticale dans des armoires de culture en conditions contrôlées en incubation pendant 8 jours, avec une photopériode de 16h, une température de 20 °C à la lumière et 12 °C à l'obscurité, un taux d'humidité de 70 %. A l'aide d'un scanner « Winrhizo », des photos sont prises des boîtes après 8 jours d'incubation. Le nombre de graines germées par modalité est ainsi dénombré et donne lieu à une évaluation de valeur de CI50, correspondant à une inhibition de la germination de 50 % par rapport au témoin et déterminée par interpolation graphique et par analyse statistique (Sahmer et al., 2015).

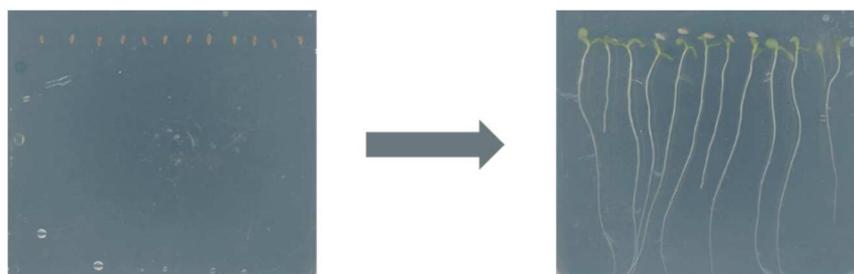


Figure 12 : Activité herbicide par contact direct contre la laitue.



Figure 13 : Activité herbicide par contact direct contre le ray-grass.

2.5.4.3. Propriétés antioxydantes des HE

Le test de piégeage du radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl (DPPH*) a été utilisé pour déterminer l'activité antioxydante des différentes HE selon une méthodologie adaptée de Kfoury et al. (2019). Une concentration croissante d'HE (jusqu'à 4.10⁻³ %) a été préparée dans de l'éthanol pour chacune des HE testées. 1 ml de chaque solution d'HE éthanolique a ensuite été mélangé à 2 ml de solution de DPPH* éthanolique (0,1 mM). Tous les mélanges ont été agités pendant 1 h dans l'obscurité à 20 ± 1 °C. L'absorbance a été mesurée ensuite à l'aide d'un spectromètre UV/Vis (Perkin Elmer Lambda 2S) à 517 nm. L'activité de piégeage des radicaux a été évaluée à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Activité antioxydante (AA) \%} = (1 - A_s/A_0) \times 100$$

Où A_s et A₀ représentent respectivement l'absorbance de l'échantillon et du blanc. Les résultats obtenus pour chaque HE ont été exprimés en valeurs de CE50, définies comme la concentration d'antioxydant qui provoque une diminution de 50 % de l'absorbance de la DPPH*, par interpolation graphique. En outre, les valeurs de CE50 des HE ont été comparées à celles obtenues pour l'acide 6-hydroxy-2,5,7,8-tétraméthylchroman-2-carboxylique (Trolox®), un analogue hydrosoluble de la vitamine E, avec des résultats exprimés en TEAC (capacité antioxydante équivalente à celle de Trolox®).

2.5.4.4. Propriétés anti-inflammatoires des HE

La lignée de cellules épithéliales bronchiques humaines (BEAS-2B) a été cultivée dans des flacons plastiques de surface CellBIND® (Corning - ThermoFisher Scientific, France) en milieu LHC-9 et incubée à 37 °C dans une atmosphère humidifiée contenant 5 % de CO₂. La cytotoxicité des HE a d'abord été évaluée sur la lignée cellulaire BEAS-2B à différentes concentrations allant de 9.10⁻⁵ à 1,8.10⁻³ %. Les cellules BEAS-2B, exposées ou non aux différentes HE, sontensemencées dans des microplaques CellBIND® de 96 puits à une densité de 20 000 ou 10 000 cellules/200 µL de milieu. Après 24 ou 48 heures d'exposition, la cytotoxicité a été évaluée en mesurant l'activité extracellulaire de la lactate déshydrogénase dans les surnageants (Cytotoxicity Detection Kit LDH, Roche Diagnostics), et l'activité de la déshydrogénase mitochondriale (MDH) (Cell Proliferation Reagent WST-1, Roche Diagnostics), comme décrit précédemment (Dergham et al., 2015 ; Kfoury et al., 2016). Des cellules non exposées à l'HE et exposées au Triton X-100 (2 %) ont été respectivement utilisées comme témoins négatifs et positifs.

Le potentiel anti-inflammatoire de l'OE a été évalué grâce à une méthode adaptée de Dergham et al. (2015). Les cellules BEAS-2B ont été préalablementensemencées dans des microplaques CellBIND® de 96

puits, afin d'obtenir 40000 cellules/puits à la fin du temps d'exposition. Les cellules ont ensuite été exposées à des PM_{2,5}, c'est-à-dire à des particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm (15 µg/cm²) pour induire une réponse inflammatoire et cultivées pendant 48 h, en présence d'HE aux deux concentrations testées (1,8.10⁻⁴ et 9.10⁻⁴ %). Des cellules non exposées à l'HE et non exposées à la fois à l'HE et aux PM_{2,5} ont été utilisées respectivement comme témoins positifs et négatifs. Après 48 heures d'exposition, des aliquotes de surnageants de culture sans cellules ont été collectées et congelées (-80 °C) pour la détermination des concentrations de cytokines et l'analyse de la teneur en protéines totales. Les concentrations de cytokines ont été déterminées par une analyse Elisa (kits ELISA Quantikine, R&D Systems Europe, Ltd.) et la teneur totale en protéines des surnageants de culture acellulaire a été quantifiée à l'aide du kit Acide BiCinchoninique (Sigma-Aldrich, France). Deux interleukines, à savoir IL-6 et IL-8, ont été sélectionnées comme cytokines d'intérêt pour l'évaluation du potentiel anti-inflammatoire de l'OE testé, étant donné leur implication connue comme médiateurs pro-inflammatoires dans les cellules exposées aux particules atmosphériques (Dergham et al., 2015 ; Kfoury et al., 2016).

2.5.4.5. Encapsulation des HE à l'aide de la β-cyclodextrine

En raison de leur volatilité, la stabilité des HE ainsi que la persistance de leurs effets biologiques au cours du temps sont souvent présentées comme limitées. Pour surmonter ces problèmes, l'encapsulation des HE à l'aide de la β-cyclodextrine (CD), décrite pour sa capacité à complexer les composés des HE, pourrait ainsi contribuer à réduire les phénomènes de dégradation et de volatilisation des HE, tout en permettant une diffusion contrôlée progressive (Abarca et al., 2016 ; Kfoury et al., 2019). Par conséquent, l'ensemble de ces différentes propriétés biologiques ont donc été testées, en présence et en absence de la β-CD (10 mM).

La capacité de rétention des HE par la β-CD a été déterminée au préalable par chromatographie en phase gazeuse en espace de tête, selon la méthode de Kfoury et al., 2015, en comparant la somme des aires des pics chromatographiques pour les HE mises en présence de la β-CD avec les mêmes HE libres dans le milieu. Les HE ont été ajoutées soit à un volume de 10 mL d'eau ultra pure, soit à une solution aqueuse de β-CD (10 mM), placés dans des fioles de 22 mL en verre, ensuite scellées à l'aide de septa en silicone et d'aluminium et thermostatées à 25 ± 0.1 °C. Une fois l'équilibre entre les phases aqueuse et gazeuse atteint (30 min), 1 mL de la phase vapeur présente dans la partie supérieure de la fiole, au-dessus de la solution aqueuse d'HE, est prélevée à l'aide d'une seringue étanche au gaz et injecté directement en tête de colonne via une ligne de transfert (250 °C). Toutes les mesures ont été réalisées à l'aide d'un échantillonneur « Headspace » automatique Agilent couplé à un appareil Perkin Elmer Autosystem XL.

Le coefficient de rétention (r) des HE par les CD a été déterminé à 25 °C, à l'aide de l'expression

$$r (\%) = \left(1 - \frac{\sum ACD}{\sum A0} \right) * 100$$

suivante :

Où $\sum A0$ and $\sum ACD$ correspondent à la somme des aires des pics chromatographiques de chacun des composés des HE en présence (ACD) ou absence (A0) de CD. Toutes les mesures ont été réalisées en triplicatas pour chaque HE, libre ou en présence de β-CD.

2.6. Etude de la viabilité technico-économique de la filière PPAM/HE

Une analyse technico-économique a été réalisée pour estimer la viabilité de la filière PPAM. Les coûts de production de la biomasse issue de la culture de coriandre (parties aériennes ou graines) et de sauge ont été évalués pour chaque condition expérimentale (site pollué ou non pollué, conditions I ou NI) séparément et ont été exprimés par hectare. Ils comprennent les coûts d'exploitation (amortissement et entretien du matériel, carburant, coût de la main-d'œuvre, etc.) et les dépenses d'approvisionnement (semences, engrais, inoculum mycorhizien et produits phytosanitaires). Ils ont été estimés selon deux guides de référence : le guide de la protection des grandes cultures (mis à jour chaque année par la Chambre d'agriculture de chaque région française) qui fournit des données sur les produits phytosanitaires et leurs coûts et un second guide fournissant des informations techniques sur les équipements agricoles, concernant les coûts de matériel et d'exploitation. Ils comprennent la préparation des sols, les semis, les intrants, la récolte et les coûts potentiels après récolte. Ces coûts ont été comparés à ceux d'autres méthodes de phytoremédiation ou de phytomanagement, ainsi qu'aux coûts de production des grandes cultures courantes (blé, orge d'hiver et colza). En outre, le produit brut a été estimé à partir des rendements en HE obtenus pour les 3 cultures en utilisant l'équation suivante : Produit brut = Rendement HE × Prix de vente HE (par kg).

Il convient de noter que le prix de vente de l'HE est le prix payé par les entreprises avant la commercialisation de l'HE en tant que produit final. Le processus de distillation a été considéré comme sous-traité dans la présente évaluation.

2.7. Etude de l'acceptabilité sociale de la filière PPAM/HE

2.7.1. L'acceptabilité sociale

Une solution scientifique et technique apportée à un problème environnemental peut être soumise à 3 types de verrous principaux, qui concernent :

1. La faisabilité scientifique et technique et la maîtrise des risques potentiels ;
2. La viabilité économique (sur le marché, sur le marché subventionné...);
3. L'acceptabilité sociale.

Cette partie traite du troisième verrou, c'est-à-dire de l'aspect « acceptabilité sociale ».

La réaction du public par rapport au déploiement d'un nouvel équipement, une nouvelle technique, voire un nouvel usage de ce qui existe déjà n'est généralement pas binaire (acceptation *versus* refus). Il s'agit plutôt d'un continuum entre deux pôles opposés, l'accueil enthousiaste en constituant le premier, le rejet total le second. Par ailleurs, cet accueil peut différer fortement selon les groupes sociaux, les types d'acteurs, les individus eux-mêmes¹.

Dans le cas de PhytEO, il existe deux types d'acteurs dont il est important de comprendre la réception du projet. Le premier est l'industriel qui utiliserait les HE comme matière première pour fabriquer des cosmétiques, produits ménagers, produits phytosanitaires, *etc.* Le second type d'acteur est le consommateur final de ces produits, c'est-à-dire tout un chacun. Pour traiter des deux acceptabilités, deux enquêtes différentes sont nécessaires, chacune avec ses contraintes et méthode spécifiques.

2.7.2. Enquêter auprès des consommateurs finaux

Lors du démarrage de PhytEO la question s'est posée de savoir s'il était nécessaire de vérifier la bonne acceptabilité par le consommateur final des produits contenant ces HE. La loi n'en fait pas obligation et les réticences rencontrées au sein même de l'équipe PhytEO et chez certains partenaires du projet plaidaient plutôt pour que l'on s'en abstienne.

Etudier l'acceptabilité de l'utilisation d'une matière première produites sur des sols pollués, c'est rendre apparente une pratique potentiellement conflictuelle. Donc potentiellement engendrer des réticences plus ou moins importantes parmi les consommateurs finaux, voire de la franche hostilité chez qui est fortement imprégné de valeurs environnementales. Cela constitue donc un risque certain.

Et on peut comprendre que l'entreprise chargée de la culture et de la distillation de ces HE ait exprimé ses réticences. Sa réputation peut être affectée et le doute s'installe à propos du reste de sa production, pourtant issue de sols indemnes de pollution.

Si cette position se comprend très bien, ne pas faire cette enquête d'acceptabilité présente néanmoins des inconvénients importants. Dissimuler une pratique pour ne pas inquiéter est en effet contestable du double point de vue de l'éthique et de l'efficacité de la démarche. Et ce quand bien même les études menées par l'UCEIV et l'INERIS dans le cadre de PhytEO établissent que les substances polluantes contenues dans le sol ne passent pas dans les HE – ou à un taux extrêmement faible, qu'il ne peut y avoir dommage pour la santé humaine ou l'environnement.

D'un point de vue éthique, d'abord, ne pas consulter le consommateur final conduirait implicitement à partager la population en deux. Une partie, minoritaire, serait considérée comme dotée des qualités nécessaires pour bien interpréter les faits et aurait donc le droit d'être informée ; l'autre, majoritaire, serait au contraire considérée comme dépourvue de ces qualités et donc laissée dans l'ignorance (Joly, 2001). Les experts, supposés rationnels et pourvus d'une perception non déformée des risques, auraient le droit de savoir ; en revanche, les profanes, réputés inaptes à la connaissance rationnelle et pourvus d'une perception déformée de la réalité n'auraient pas le droit. Que les polluants puissent ne pas passer dans les HE lors de la distillation serait pour eux quelque chose de trop difficile à admettre.

Mais, dans une société démocratique, cette dissymétrie dans le droit de savoir est, d'un point de vue éthique, difficilement défendable, même si la tentation de l'instaurer peut exister chez certains.

Par ailleurs, au-delà de la question éthique, cacher ce qui finira peut-être, voire probablement, par se savoir peut avoir des effets pervers durables. Ainsi, la communication gouvernementale volontairement

¹ Même si la notion d'acceptabilité est utilisée comme nous venons de le faire peut sembler être une notion neutre, beaucoup de sociologues et autres chercheurs en sciences sociales n'aiment pas employer le mot. Pour eux, ceux de leurs collègues qui le font sont souvent soupçonnés de faire le jeu des porteurs de projets, d'en être les supplétifs, et à ce titre de les aider dans leur stratégie de rendre acceptable ce qui en fait ne l'est pas (Raufflet, 2014 ; Bicaïs, 2007 ; Kent et Lane, 2009).

rassurante faite en France sur le nuage de Tchernobyl en 1986 en est un bon exemple. Celle sur l'inutilité de porter un masque au début de la crise de la Covid-19 en est un autre. Dans ces deux cas, on peut parler d'« effet boomerang » : dans un premier temps on éloigne l'inquiétude du grand public en lui cachant ce qui peut l'inquiéter, mais cette inquiétude revient ensuite, et plus forte. Elle sera de plus accompagnée d'une forte et durable méfiance pour toute communication sur le sujet, comme le montre le cas de Tchernobyl.

De plus, dans un contexte où l'information, quel que soit le sujet, passe de plus en plus par les réseaux sociaux, il s'avère de plus en plus risqué de vouloir cacher quelque chose au public. Dans la partie de l'opinion publique qui se montre encline à prêter foi aux rumeurs, légendes urbaines et *fake news* (Burgess, 2006), le réflexe est de se dire : « Si l'on nous a caché quelque chose, c'est qu'il y a un danger ».

C'est donc l'option d'enquêter auprès des consommateurs finaux qui, du point de vue l'éthique et de la rationalité, s'est imposé au sein de l'équipe. Néanmoins le risque pour le partenaire chargé de la transformation des végétaux et de l'éventuelle mise sur le marché des HE de voir son image abîmée n'est pas nul ; d'où un certain nombre de précautions.

2.7.3. Les deux volets de l'enquête

- L'enquête auprès des acteurs de la filière HE

Une enquête a été réalisée, au cours de l'automne et l'hiver 2019-2020, auprès de responsables de firmes produisant des cosmétiques et de firmes produisant des traitements phytosanitaires.

- o Elle a été réalisée par entretiens semi-directifs, le plus souvent par téléphone, pour minimiser les déplacements.
- o Le public enquêté : pas de contrainte quantitative forte, en fonction des acteurs du marché des HE.

Il a été particulièrement difficile d'obtenir des rendez-vous avec des industriels susceptibles d'utiliser des HE. Peu accessibles et se sentant souvent peu concernés par la question, ils ne répondaient pas ou déclinaient la proposition d'entretien. Sur les sept entretiens, pour des raisons budgétaires et de volonté de limiter les déplacements, six ont été menés par téléphone (Tableau 5). Les entretiens semi-directifs ont été menés à l'aide d'une grille préparée à l'avance, listant les thèmes à aborder, mais sans ordre établi d'avance, pour plus de liberté. Leur durée était généralement de 30 minutes à 50 minutes (un de 15 mn seulement, un autre près d'une heure).

Tableau 5 : Liste des professionnels enquêtés par entretiens semi-directifs.

	Secteur	Entreprise	Fonction	Date	Durée	Entretien	Etat de la bande son
1	Cosmétique	Clarins	Directrice Recherche Actifs R&D	2020_01_21	54'35	Face à face	ok
2	Cosmétique	Sarbec	Directrice R&D	2020_01_29	33'27	Téléphone	ok
3	Cosmétique	CreaFarm	R&D manager	2020_02_03	47'03	Téléphone	ok
4	Cosmétique Responsable	Dessange	Développement DESSANGE International	2020_02_04	36'51	Téléphone	ok
5	Phyto France	BASF	Division Agro Responsable Advocacy et du Pôle Agriculture Durable	2020_02_28	38'53	Téléphone	ok
6	Phyto	CERTIS Europe	Directeur du développement France	2020_03_02	15'00	Téléphone	Néant
7	Phyto	Biocidal Alternative Solutions SA	Project Manager	2020_04_20	45'18	Téléphone	Médiocre

- L'enquête auprès des consommateurs finaux

Les contraintes spécifiques de l'enquête

Cette enquête, menée à l'automne 2019, visait à connaître l'opinion des individus et ménages qui sont les potentiels consommateurs finaux des produits contenant des HE cultivées sur sols pollués. Il s'agissait, à

travers les échanges avec les enquêtés, de recueillir un matériau suffisant pour mesurer le degré d'acceptabilité de ces produits, mais sans que les répondants puissent faire le lien entre ce sur quoi ils étaient interrogés et l'expérimentation menée dans le cadre de PhytEO. Ils ne devaient pas pouvoir faire la connexion entre d'un côté l'enquête à laquelle ils participaient et de l'autre le site précis (Metaleurop) et l'entreprise partenaire du projet PhytEO chargée de la distillation. Une barrière étanche devait exister entre les enquêtés et l'objet précis de l'enquête.

Après concertation avec les partenaires du projet et en tenant compte de cette contrainte forte, le choix de la méthode pour cette partie de l'enquête s'est fixé sur le questionnaire (Annexe 5). Celui-ci permet de formuler des questions qui vont du plus général au plus précis - mais sans être obligé de donner des détails sur PhytEO - et d'obtenir des données quantitatives. Néanmoins les moyens financiers et humains attribués à l'équipe SHS de PhytEO (le laboratoire TVES) étaient trop modestes pour pouvoir enquêter un échantillon représentatif de la population française (avec des quotas respectés pour le sexe, l'âge, la PCS, les zones géographiques...) et d'une taille suffisante (plus de mille personnes). Nous avons alors fait le choix de travailler sur trois sous-échantillons aux caractéristiques bien marquées. Ce qui offre la possibilité de faire apparaître des écarts d'acceptabilité dus aux traits particuliers des trois types de public.

- Les trois sous-échantillons.

Le premier sous-échantillon est constitué de personnes que l'on peut considérer comme possédant des convictions environnementalistes, puisqu'adhérentes à une association de défense de l'environnement ou participant à des actions/manifestations sur ce thème. Il doit permettre de voir quel est le degré d'acceptabilité des HE issues de sols pollués dans une population que l'on peut estimer, au départ, comme sensible aux questions des pollutions.

Le second sous-échantillon rassemble des personnes travaillant dans une administration publique, d'Etat ou territoriale. Par cette appartenance au secteur tertiaire publique, elles se trouvent éloignées du risque de perdre leur emploi, notamment si les activités économiques venaient à être freinées par une réglementation environnementale très restrictive. On peut donc supposer ces personnes moins sensibles que d'autres aux objectifs économiques présents de PhytEO, moins susceptibles d'arbitrer entre emploi et précaution sanitaire stricte, et donc, *in fine*, plus réticentes que la moyenne face à ce type de projet.

Le troisième groupe est composé d'étudiants de Master 1 et 2, inscrits dans plusieurs Universités de la moitié nord de la France (Annexe 6). Il s'agit donc d'une population à la fois jeune et instruite, dont on peut considérer, qu'en matière d'innovations techniques et d'environnement, elle pèsera sur l'opinion dans les décennies qui viennent.

Construction du questionnaire et exploitation du matériau recueilli.

Le questionnaire a été construit en entonnoir, c'est-à-dire en allant du plus général au plus précis. Les questions portaient d'abord sur les questions environnementales en général, puis se centraient sur le thème des cultures sur sols pollués. La question des huiles essentielles n'était abordée que tardivement, pour éviter tout biais de cadrage (ne pas influencer le répondant dans ses choix).

Les traitements auxquels ont été soumises les données recueillies au cours de l'enquête par questionnaire sont les suivants :

- o des tris à plat, pour mesurer, sur l'ensemble de l'échantillon, la place des risques liés à la pollution des sols dans les risques les plus craints, l'acceptabilité sur l'utilisation agricole des sols pollués, etc.
- o des tris croisés et une analyse factorielle, pour approcher le profil sociodémographiques de ceux qui acceptent le mieux et le moins bien la culture sur sols pollués, l'utilisation industrielle des produits qui en sont issus, etc.

3. Principaux résultats obtenus et discussions

3.1. Caractérisation des parcelles

3.1.1. Propriétés pédo-agronomiques et niveau de contamination des sols

Une partie des résultats présentés ci-après ont été obtenus dans le cadre d'un stage de master 2 (A. Perlein, INERIS 2018). L'ensemble des résultats concernant la caractérisation des sites expérimentaux fait l'objet de deux publications en préparation (Perlein et al. et Raveau et al.).

La caractérisation physico-chimique initiale des sites (Tableau 6) a notamment permis de vérifier l'absence de pollution par les ETM sur la parcelle localisée à Rodelinghem, avec des teneurs respectives en Cd, Pb et Zn de 0,4; 22 et 48 ppm, similaires au bruit de fond géochimique des sols agricoles régionaux (Sterckeman et al., 2007). Elle a également confirmé l'ampleur de la pollution en ETM sur le site d'Evin-Malmaison, avec les teneurs suivantes : 7 ppm de Cd, 394 ppm de Pb et 443 ppm de Zn. En comparaison avec le fond géochimique régional, ces teneurs sont respectivement 17, 11 et 6 fois supérieures (Sterckeman et al., 2007). Les concentrations des autres ETM se trouvant dans la gamme des valeurs ordinaires, la suite de l'étude se concentre sur le Cd, Cu, Pb et Zn. La mobilité des ETM suit l'ordre suivant: Cd > Cu=Sb >> Zn=Ni >>> Pb=As=Cr ce qui montre que le Cd est le plus mobile.

Une bonne fertilité chimique des sols a également été démontrée en comparaison avec des valeurs de référence (Denoroy et al., 2004), et ce en particulier sur la parcelle polluée par rapport à la parcelle non polluée, avec notamment des valeurs supérieures pour la capacité d'échange cationique (183 et 99 mg.Kg⁻¹ pour le sol pollué et non pollué respectivement), la teneur totale en azote (1,62 et 1,18 g.Kg⁻¹ pour le sol pollué et non pollué respectivement), le carbone organique total (17 et 10,2 g.Kg⁻¹ pour le sol pollué et non pollué respectivement), la teneur en matière organique (29 et 17 g.Kg⁻¹ pour le sol pollué et non pollué respectivement) ainsi que le ratio C/N (10,5 et 8,6 pour le sol pollué et non pollué respectivement). La teneur en phosphore est quant à elle supérieure sur la parcelle non polluée (0,65 g.Kg⁻¹) par rapport à la parcelle polluée (0,17 g.Kg⁻¹), représentant une teneur élevée en comparaison à des valeurs de référence pour les cultures peu exigeantes (Denoroy et al., 2004).

3.1.2. Caractérisation de la flore native du site pollué d'Evin-Malmaison

L'inventaire phytosociologique réalisé sur la parcelle polluée a permis (i) d'identifier des espèces végétales se développant spontanément sur notre site pollué et donc probablement tolérantes aux ETM, (ii) de déceler la présence d'autres espèces aromatiques et (iii) d'orienter le choix des espèces végétales à cultiver afin de limiter certaines contraintes liées aux pratiques culturales (Tableau 7). En raison du spectre d'action des herbicides, ce dernier paramètre était important à vérifier afin de pouvoir contrôler le développement des espèces adventices présentes tout en évitant des effets non-intentionnels sur les plantes cultivées choisies.

Ainsi, 24 espèces végétales, appartenant à 14 familles botaniques différentes, ont été identifiées sur la parcelle polluée par les ETM. Parmi elles, *Erigeron canadensis*, *Matricaria recutita*, *Senecio vulgaris*, *Erysimum sp.*, *Lolium perenne*, *Festuca sp.*, *Urtica dioica L.* et *Rumex sp.* avaient précédemment été retrouvées sur d'autres sites présentant une pollution par les ETM (Dazy et al., 2008; Hajiboland and Manafi, 2007; Jeannin et al., 2020; Masarovičová et al., 2010). De façon intéressante, *M. recutita* avait également été caractérisée pour son comportement accumulateur vis-à-vis du Cd (Masarovičová et al., 2010). Cet inventaire pourrait s'avérer particulièrement intéressant pour sélectionner des espèces végétales non cultivées et potentiellement adaptées à la gestion des sites pollués par les ETM. Certaines espèces natives pourraient, en effet, posséder un comportement « exclure », intéressant en phytostabilisation, tandis que des accumulateurs, voire hyperaccumulateurs pourraient s'avérer utiles pour la phytoextraction des ETM.

Il est également important de signaler que parmi les espèces végétales identifiées, seule la matricaire camomille (*M. recutita*) est une PPAM et pourrait poser des problèmes de contamination des HE si elle est récoltée en même temps que la PPAM cultivée (modification de la composition des HE, apparition d'une couleur anormale de l'HE). Ainsi, des précautions au moment de la récolte ont été observées, notamment en élevant la barre de coupe, afin d'éviter la contamination des HE par les composés aromatiques de la matricaire. Par ailleurs, aucune des plantes identifiées n'appartient à la même famille botanique que les PPAM sélectionnées dans le projet PhytEO (Apiaceae ou Lamiaceae). En termes de richesse, les indices de Menhinick et Margalef mesurés indiquaient respectivement des valeurs de 1,09 et 3,72 (Tableau 8). Les indices de diversité calculés, de Shannon & Weaver et de Simpson respectivement, étaient eux de 2,15 et 0,85. Ces indices montrent que, malgré la pollution du sol par les ETM, le site d'Evin-Malmaison possède une biodiversité végétale relativement élevée en comparaison avec d'autres sols agricoles, pollués ou non, décrits dans la littérature (Chateil et al., 2013; Dazy et al., 2008; Fédoroff et al., 2005; Koptsik et al., 2003;

Zhou et al., 2018). En effet, la biodiversité est souvent négativement corrélée avec des teneurs croissantes en ETM (Hernández and Pastor, 2008; Koptsik et al., 2003; Vangronsveld et al., 1996), ce qui ne semble pas être le cas dans nos conditions. Il est toutefois suggéré qu'au-delà de la teneur en ETM des sols, les caractéristiques pédo-climatiques ainsi que l'activité microbienne du sol jouent également un rôle important dans la biodiversité végétale (Hernández and Pastor, 2008; Koptsik et al., 2003). Dans le cas de nos sites expérimentaux, une bonne fertilité chimique des sols a en effet été établie, avec notamment une bonne disponibilité des nutriments.

L'isolement et le dénombrement des spores de CMA présentes dans les sols (143 et 157 spores/ 100 g de sol sur les parcelles polluée et non polluée respectivement) ainsi que la détermination des taux de colonisation racinaire des espèces végétales qui se développent spontanément sur le site ont toutefois révélé des valeurs relativement faibles (taux de mycorhization de 4 et 7 % sur les parcelles polluée et non polluée respectivement), comparativement à d'autres sols agricoles pollués ou non. En effet, les valeurs de densités de spores de CMA dans les sols varient habituellement entre 300 et 1400 spores/100 g de sol (Oehl et al., 2004; Yang et al., 2015; Zak et al., 1982). Ainsi, les valeurs relativement faibles obtenues et similaires entre les deux parcelles expérimentales, pourraient être attribuées aux pratiques culturales des sols agricoles précédant la mise à disposition des parcelles (travail du sol, utilisation de produits phytosanitaires et d'intrants chimiques) et qui auraient provoqué une diminution de la richesse et probablement de la diversité des populations mycorhiziennes (Bünemann et al., 2006; Tilston et al., 2010). Ainsi, ces premiers résultats justifient l'intérêt de l'ajout d'un inoculum mycorhizien, décrit pour sa capacité à stimuler la croissance des plantes en améliorant leur nutrition, en réduisant l'impact des stress environnementaux et en participant dans certains cas à l'immobilisation des ETM dans le sol (Renaut et al., 2020; Smith and Read, 2008).

Tableau 6 : Principaux paramètres pédo-physico-chimiques des sites pollués d'Evin-Malmaison et non pollués de Rodelinghem (moyennes \pm SD). Les concentrations extractibles en ETM sont exprimées en % par rapport aux concentrations totales.

Paramètres	Site non pollué	Site pollué
pH-H ₂ O	7.1 \pm 0.52	7.86 \pm 0.13
Total (mg.Kg ⁻¹)		
As	9 \pm 0.6 (0.08 % \pm 0.02)	16 \pm 2 (0.06 % \pm 0.02)
Cd	0.4 \pm 0.03 (2.28 % \pm 1.4)	7 \pm 0.4 (1.63 % \pm 0.51)
Cr	50 \pm 3 (0.02 % \pm 0.006)	59 \pm 3 (0.02 % \pm 0.02)
Cu	16 \pm 0.3 (0.41 % \pm 0.22)	27 \pm 3 (1.07 % \pm 0.41)
Ni	16 \pm 1 (0.95 % \pm 2.18)	25 \pm 1.8 (0.19 % \pm 0.04)
Pb	22 \pm 2 (0.07 % \pm 0.06)	394 \pm 16 (0.02 % \pm 0.006)
Sb	0.7 \pm 0.05 (0.96 % \pm 0)	5 \pm 0.3 (0.97 % \pm 0.28)
Zn	48 \pm 2 (1.27 % \pm 0.73)	443 \pm 12 (0.21 % \pm 0.07)
Argile(%)	14 \pm 1	26 \pm 2
Limon (%)	70 \pm 4	53 \pm 10
Sable (%)	17 \pm 3	18 \pm 3
Carbone Organique Total (g.Kg ⁻¹)	10.2 \pm 1.4	17 \pm 2
Matière organique (g.Kg ⁻¹)	18 \pm 2	29 \pm 4
C/N	8.6 \pm 0.8	10.5 \pm 0.7
CEC Metson (me.Kg ⁻¹)	99 \pm 3	183 \pm 50
CaCO ₃ (%)	0.73 \pm 0.34	0.48 \pm 0.13
N (g Kg ⁻¹)	1.18 \pm 0.05	1.62 \pm 0.24
P assimilable Joret-Hebert (g Kg ⁻¹) - P ₂ O ₅	0.65 \pm 0.26	0.17 \pm 0.02
K (g.Kg ⁻¹) - K ₂ O	0.21 \pm 0.04	0.26 \pm 0
Mg (g.Kg ⁻¹) - MgO	0.18 \pm 0.07	0.21 \pm 0.02
Ca (g.Kg ⁻¹) - CaO	3.5 \pm 1.3	6 \pm 0.5

Na (g.Kg ⁻¹) - Na ₂ O	0.02 ± 0	0.03 ± 0
--	----------	----------

Tableau 7 : Espèces végétales inventoriées, cycle de vie et abondance sur le site pollué d'Evin-Malmaison

		Quadrat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
		Couverture au sol	80%	95%	95%	90%	85%	80%	100%	95%	90%	100%	70%	75%	85%	
Famille	Espèces	Cycle de vie	Abondance													
Asteraceae	<i>Erigeron canadensis</i> L.	Annuelle	+	+	.	.	+	.	+	.	1.1	.	2.2	1.1	1.1	
	<i>Lactuca virosa</i> L.	Biennale	.	.	.	.	.	.	.	.	2.2	.	+	.	2.2
	<i>Matricaria recutita</i> L.	Annuelle	1.1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	<i>Senecio vulgaris</i> L.	Annuelle	2.2	.	2.2	.	.	2.2	2.2	.	.	1.1	1.1	.	+	
	<i>Sonchus asper</i> L. Hill	Annuelle	2.2	5.5	2.2	4.4	4.3	2.2	3.3	5.5	2.2	2.2	3.3	3.4	2.2	
Brassicaceae	<i>Erysimum cheiranthoides</i> L.	Annuelle	.	.	+	.	.	.	1.1	+	4.4	.	.	1.1	.	
	<i>Sinapis arvensis</i> L.	Annuelle	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
Convolvulaceae	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	Pérenne	1.1	.	4.3	1.1	1.1	1.1	1.1	+	1.1	2.2	.	.	+	
Equisetaceae	<i>Equisetum arvense</i> L.	Pérenne	.	.	2.3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia helioscopia</i> L.	Annuelle	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	<i>Mercurialis annua</i> L.	Annuelle	1.1	1.1	.	1.1	+	+	1.1	+	.	1.1	+	+	.	
Fumariaceae	<i>Fumaria officinalis</i> L.	Annuelle	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2.2	.	.	.
Geraniaceae	<i>Geranium pusillum</i> L.	Annuelle	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Papaveraceae	<i>Papaver rhoeas</i> L.	Annuelle	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
Plantaginaceae	<i>Veronica arvensis</i> L.	Annuelle	1.1	.	+	.	.	1.1	+	.	1.1	.	.	.	.
Poaceae	<i>Alopecurus myosuroides</i> Huds.	Annuelle	3.2	1.1	1.1	2.3	3.3	3.4	3.3	2.2	.	4.4	+	+	.	
	<i>Bromus sterilis</i> L. Nevski	Annuelle	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	Pérenne	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
	<i>Lolium Pérenne</i> L.	Pérenne	+	2.2	3.2
	<i>Phragmites australis</i> Cav.	Pérenne	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Polygonaceae	<i>Rumex crispus</i> L.	Pérenne	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Rubiaceae	<i>Galium aparine</i> L.	Annuelle	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.
Sapindaceae	<i>Acer</i> sp.	Pérenne	.	.	.	+	.	+	+	+	.	.	.	.	.
Urticaceae	<i>Urtica dioica</i> L.	Pérenne	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Tableau 8 : Indices de biodiversité végétale mesurés sur le site pollué d'Evin-Malmaison.

Indices de biodiversité	
Menhnick	1.09
Margalef	3.72
Shannon & Weaver	2.15
Simpson	0.85

3.2. Semis et taux de levée

Le pouvoir germinatif des semences a été vérifié, avant semis, sur différents substrats. Alors que les taux de germination étaient relativement élevés pour la sauge et la coriandre (90 et 70 % respectivement), ils étaient inférieurs à 40 % pour l'angélique (résultats non montrés).

La coriandre cultivée pour ses parties aériennes ainsi que la sauge sclarée (inflorescences) ont été semées au printemps 2017 sur les deux parcelles expérimentales, polluée ou non par les ETM (Tableau 2). La coriandre a également été semée en avril 2018 pour une seconde année de culture donnant lieu à la récolte des graines. Une fois semées, les PPAM ont ensuite fait l'objet d'un suivi régulier *in situ*.

Le faible pouvoir germinatif de la semence ainsi que des conditions climatiques particulières, avec notamment un été 2017 plus chaud et plus sec que la normale, ont conduit à un très faible taux de levée de l'angélique. Cette espèce végétale a par conséquent été ressemée au printemps 2018 en utilisant de nouvelles semences présentant un taux de germination, plus élevé (supérieur à 50 %). La levée a cependant été avortée en raison de conditions climatiques à nouveau exceptionnelles pour l'été 2018. Un dernier semis a été réalisé en septembre 2018, avec les mêmes semences, et a donné lieu à des taux de levée satisfaisants, compris entre 30 et 40 %. L'angélique s'est ensuite bien développée. Cependant, du fait de sa floraison en deuxième année, la récolte des graines n'a pu avoir lieu que fin juin 2020. Les données, en cours d'analyse, n'ont toutefois pu être traitées dans le cadre de ce projet PhytEO.

Nos résultats ont montré pour la coriandre que les taux de levée variaient entre 49 et 84 %, sans différence significative entre les deux parcelles expérimentales polluée et non polluée, quelle que soit l'année de culture et la modalité inoculée ou non (Tableau 9). En ce qui concerne la sauge sclarée, des taux de levée plus importants de 30 % ont été mesurés sur la parcelle polluée, par rapport à la parcelle non polluée. Ces valeurs plus élevées peuvent s'expliquer notamment par des différences pédo-agronomiques entre les deux parcelles ou de capacité de rétention en eau. Sur la parcelle non polluée, le sol se sature notamment plus rapidement en eau, ce qui peut bloquer la germination des graines de sauge sclarée, de très petite taille, en les asphyxiant.

Tableau 9 : Taux de levée de la coriandre et de la sauge.

		Coriandre – parties aériennes	Coriandre – graines	Sauge sclarée
Site non pollué	NI	72 ± 26 a	58 ± 31 ab'	45 ± 6 B
	I	68 ± 15 a	49 ± 28 b'	45 ± 10 AB
Site pollué	NI	78 ± 11 a	84 ± 15 a'	71 ± 9 A
	I	77 ± 10 a	72 ± 15 ab'	65 ± 8 A

3.3. Croissance des PPAM et rendements en HE

L'ensemble des résultats concernant les rendements obtenus fait l'objet d'une publication en préparation (Raveau et al.).

3.3.1. Poids sec et hauteur de la coriandre et de la sauge sclarée avant récolte

En termes de croissance, la hauteur des plants de coriandre avant récolte des parties aériennes (2017), atteignait en moyenne 60 cm, quelle que soit la parcelle, pour des poids secs de 10 et 4 g/plante, sur les parcelles non polluée et polluée respectivement, quelles que soient les modalités inoculées ou non (Figure 14). En 2018 (récolte des graines de coriandre), la hauteur des plantes était de 77 cm en moyenne, tandis que les poids secs s'élevaient à 11 et 7 g/plante, sur les parcelles non polluée et polluée respectivement, quelles que soient les modalités inoculées ou non. La quantité de biomasse produite sur les parcelles expérimentales était en moyenne de 22 m³/ha lors de la récolte des parties aériennes, et de 4 m³/ha lors de la récolte des graines. Ces estimations ont été établies lors de la distillation des HE.

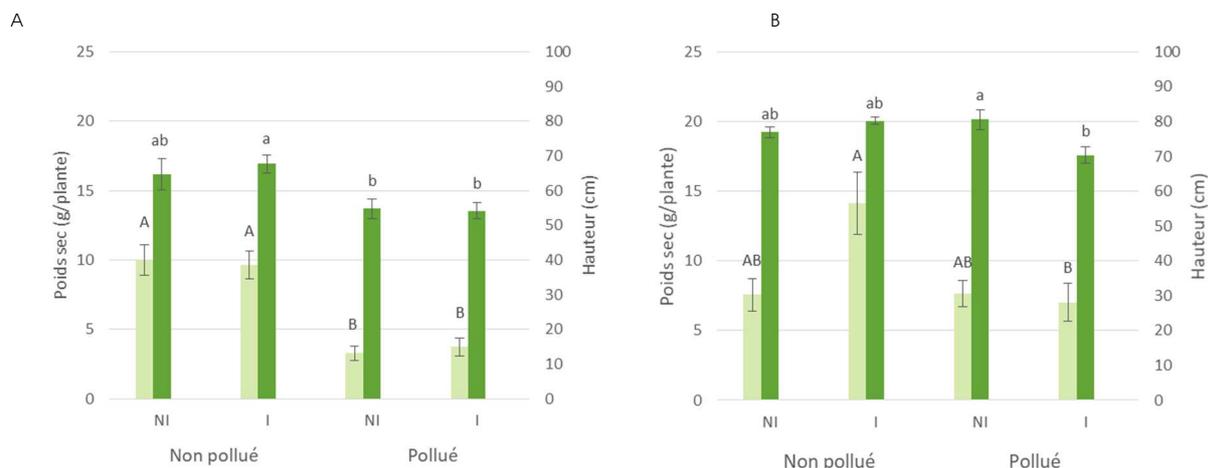


Figure 14 : Poids sec et hauteur de la coriandre avant récolte des parties aériennes (A) ou des graines (B) - Les différences significatives entre les conditions sont indiquées par des lettres différentes (α = 0,05). Les valeurs sont des moyennes ± SE (n=12). NI : non inoculé ; I : inoculé.

La sauge sclarée affichait une hauteur moyenne de 35 cm la première année (en 2017), de 153 cm la deuxième année (en 2018) et de 107 cm la troisième année (en 2019), sans différence significative entre les deux parcelles ni entre les modalités inoculées ou non (Figure 15). En termes de poids secs, les valeurs mesurées étaient comprises entre 50 et 160 g/plante et entre 52 et 170 g/plante sur les parcelles non polluée et polluée respectivement. Des valeurs plus faibles ont été observées sur la parcelle polluée en deuxième année de culture, ce qui peut s'expliquer par la densité plus importante de plantes au mètre carré, dénotée par les taux de levée supérieurs, ce qui a pu limiter le développement en largeur de la plante. En termes de biomasse, 15, 106 et 42 m³/ha ont été récoltés en moyenne la première, deuxième et troisième année, respectivement.

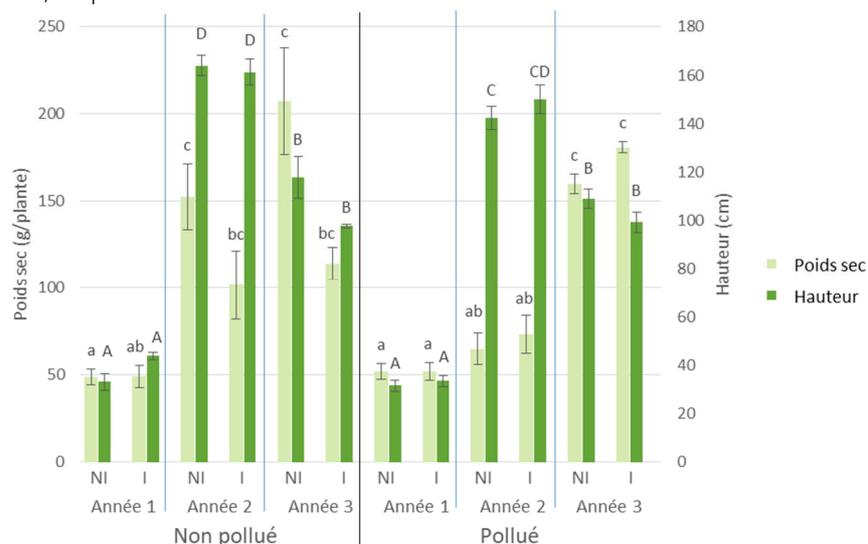


Figure 15 : Poids sec et hauteur de la sauge sclarée avant récolte - Les différences significatives entre les conditions sont indiquées par des lettres différentes (α = 0,05). Les valeurs sont des moyennes ± SE (n=12). NI : non inoculé ; I : inoculé.

La coriandre et la sauge sclarée sont capables de se développer de façon similaire aussi bien sur des sols pollués que sur des sols non pollués par les ETM. La germination des graines, la levée, le développement ainsi que la production de biomasse n'ont en effet pas été affectés par la présence des ETM dans le sol.

Ces résultats montrent que la sauge sclarée et la coriandre, testées dans le cadre de cette étude, semblent bien adaptées pour une culture sur des sols pollués par les ETM, suggérant leur tolérance aux ETM et leur adaptation aux conditions pédo-climatiques de la région Hauts-de-France.

3.3.2. Taux de mycorhization de la coriandre et de la sauge sclarée

L'apport d'un inoculum mycorhizien a permis d'augmenter significativement les taux de colonisation racinaire des deux espèces de PPAM testées (coriandre et sauge). En effet, les taux de mycorhization mesurés sur la coriandre en 2017 au stade « parties aériennes », cultivée en l'absence de l'inoculum mycorhizien, étaient de 8 et 2 % sur les parcelles non polluée et polluée respectivement et passent à 22 et 9 % en conditions inoculées (Figure 16). Pour la coriandre récoltée en 2018 au stade « graine », une augmentation des taux de mycorhization en conditions inoculées a seulement été observée sur la parcelle non polluée, avec des valeurs de 3 et 13 % pour les conditions non-inoculée et inoculée respectivement. Pour la sauge sclarée, une amélioration significative des taux de mycorhization pour la modalité inoculée par rapport à celle non inoculée a été observée en 2018 et en 2019, c'est-à-dire en deuxième (augmentation de 50 %) et troisième (augmentation de 25 %) années de culture (Figure 17). De plus, une augmentation progressive de la colonisation racinaire a été observée au cours du temps pour la modalité inoculée, avec des taux de mycorhization qui ont atteint 40 % en 3^{ème} année de culture alors qu'ils étaient de l'ordre de 5 % en première année.

Cependant, l'augmentation des taux de mycorhization chez ces deux PPAM n'a pas permis d'observer une amélioration de la croissance des plantes et de la production de biomasse. Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour expliquer les résultats observés. En premier lieu, la mycorhization spontanée des PPAM par les CMA indigènes peut masquer l'apport de l'inoculation mycorhizienne. Par ailleurs, bien qu'il soit connu que les CMA sont capables d'établir une relation symbiotique avec la majorité des végétaux supérieurs (Smith and Read, 2008) et qu'ils possèdent une spécificité d'hôte végétal relativement faible (Lee et al., 2013; 2019; Smith and Read, 2008), il a toutefois été montré que la réponse de la plante hôte à la colonisation racinaire par les CMA dépendait fortement de l'espèce mycorhizienne (Lee et al., 2013). Ainsi, il est possible que l'espèce de CMA contenue dans l'inoculum commercial (*R. irregularis*) utilisé ne soit pas la mieux adaptée aux PPAM cultivées. Il est également décrit dans la littérature qu'un inoculum exogène peut entrer en compétition avec les espèces indigènes naturellement présentes dans le sol, exerçant une pression sélective sur les espèces de CMA autochtones, réduisant ainsi la colonisation racinaire (Janoušková et al., 2017). Enfin, la souche de CMA contenue dans l'inoculum mycorhizien utilisé a été isolée à l'origine à partir de sols agricoles non pollués par les ETM, puis cultivée *in vitro* à partir de racines modifiées de carottes (Badri et al., 2016). Elle n'est donc probablement pas tolérante aux ETM. A cet égard, la pollution du sol de la parcelle d'Evin-Malmaison par les ETM est susceptible d'avoir affecté négativement le cycle du développement de la souche de *R. irregularis*, notamment la germination (Del Val, 1999 ; Göhre & Paszkowski, 2006).

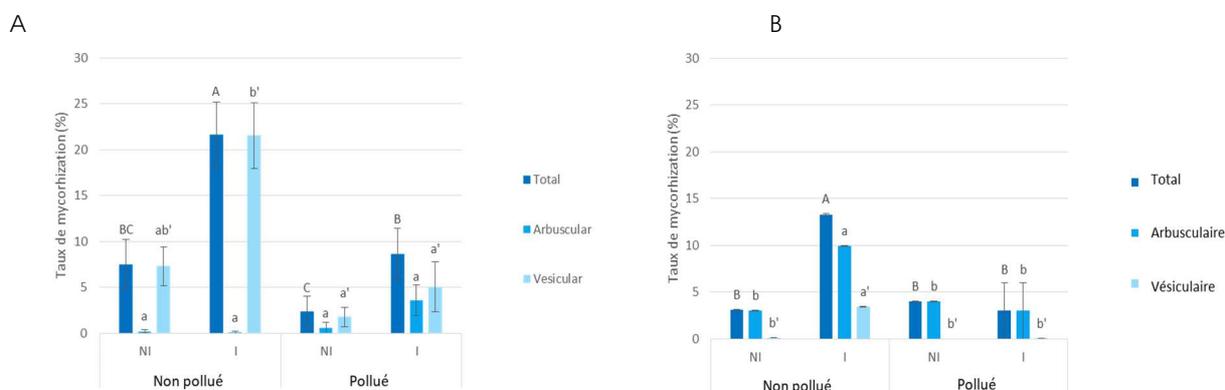


Figure 16 : Taux de mycorhization de la coriandre avant récolte des parties aériennes (A) et des graines (B) - Les différences significatives entre les conditions sont indiquées par des lettres différentes ($\alpha = 0,05$). Les valeurs sont des moyennes \pm SE (n=12). NI : non inoculé ; I : inoculé.

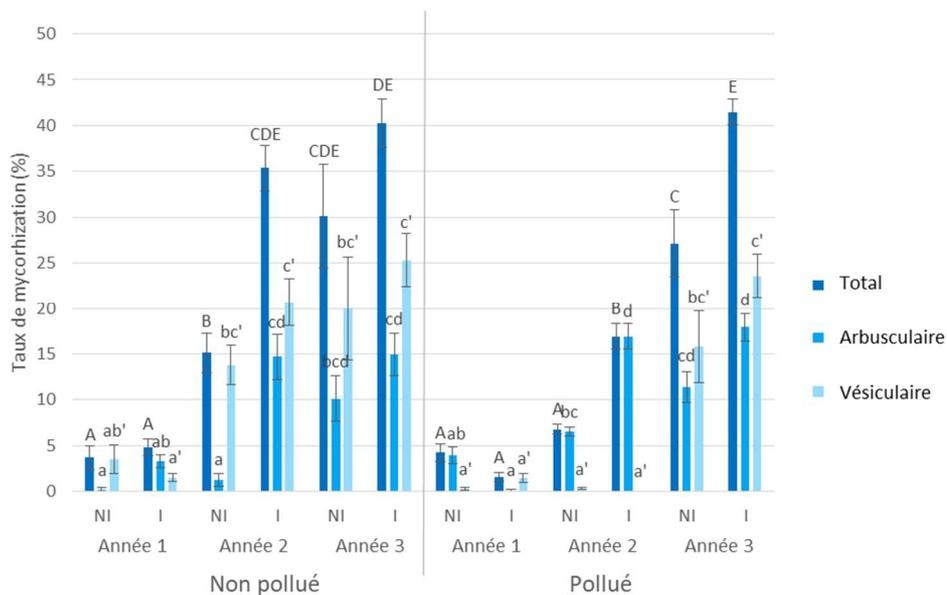


Figure 17 : Taux de mycorhization de la sauge sclarée avant récolte - Les différences significatives entre les conditions sont indiquées par des lettres différentes ($\alpha = 0,05$). Les valeurs sont des moyennes \pm SE (n=12). NI : non inoculé; I : inoculé.

3.3.3. Transfert des ETM dans les parties aériennes des PPAM

3.3.3.1. Concentrations en ETM dans les parties aériennes de coriandre

Les concentrations en Zn, Cd, Pb et Cu mesurées dans les parties aériennes de la coriandre (Figure 18) ayant poussé sur le sol pollué sont supérieures aux valeurs de référence obtenues sur le sol non-pollué et aux valeurs rapportées dans la littérature (Zn : 35 ; Cd : 0,76 ; Cu : 8,5 ; Pb : 0,2 $\mu\text{g g}^{-1}$ PS ; Singh & Garg 2006 ; Zheljzkov et al, 2008). Les résultats mettent en évidence une tendance à l'accumulation du Cd avec un effet organe, les parties aériennes accumulant davantage ($\text{BCF}_{\text{tot}} > 1$) que les graines ($\text{BCF}_{\text{tot}} < 1$) (Zheljzkov et al, 2008), Ce résultat pourrait être expliqué par un mécanisme de protection des graines contre la toxicité du Cd, Au contraire du Cd, le Zn et le Cu sont davantage concentrés dans les graines, ce qui pourrait être dû au fait que ces éléments sont essentiels au développement de la graine. Le Pb est quant à lui évité comme le montre les BCF (<0,012). Quel que soit le métal considéré, aucun effet de l'inoculation sur les concentrations dans les parties aériennes de la coriandre n'a été mis en évidence.

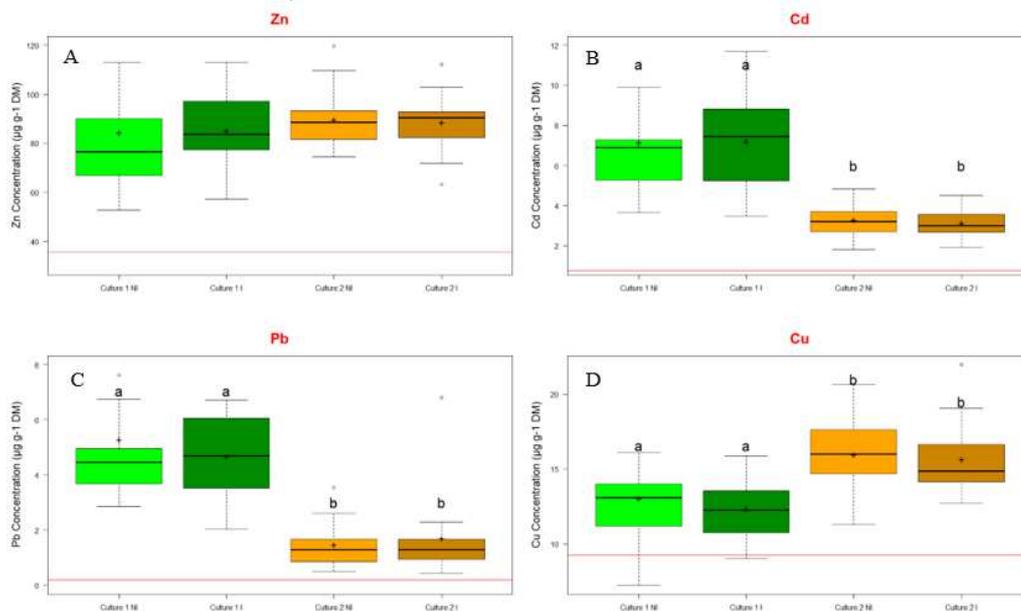


Figure 18 : Concentrations de Zn (A), Cd (B), Pb (C) et Cu (D) dans les parties aériennes (vert) et les graines (orange) de la coriandre inoculée (I) et non-inoculée (NI) (les box plots indiquent la médiane, les percentiles et la moyenne \pm SD ; la ligne rouge indique les valeurs de référence

mesurées sur la coriandre sur le site non-pollué de Rodelinghem). Les différences significatives sont indiquées à $\alpha = 0,05$.

3.3.3.2. Concentrations en ETM dans les parties aériennes de sauge

La comparaison des concentrations en ETM entre inflorescences de sauge lavée et non lavée montre que le lavage n'a pas d'effet. Ce résultat suggère donc qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter une étape de lavage au préalable à la distillation de la sauge, il pourrait être expliqué par le dense feuillage de la sauge qui empêcherait que les poussières enrichies en ETM atteignent les inflorescences. En conséquence de ce résultat, les concentrations des sauges présentées sur la Figure 19 correspondent à la moyenne des concentrations des échantillons lavés et non lavés.

Au contraire du Cu, les concentrations en Zn, Cd et Pb dans les feuilles et les inflorescences de sauge sont toutes supérieures aux valeurs de référence obtenues sur le site non pollué de Rodelinghem. Les valeurs de BCF mettent en évidence de comportement « exclure » de la sauge vis-à-vis de ces 4 ETM.

Des effets de l'inoculation et/ou du stade de développement de la sauge sont mis en évidence pour le Zn (diminution de la concentration en présence d'inoculant au stade feuille), Cd (diminution de la concentration en présence d'inoculant aux stades feuille et inflorescence) et Pb (diminution de la concentration en présence d'inoculant au stade feuille).

Un effet positif de l'inoculation est visible en première année de culture de la sauge, au stade feuille mais cet effet ne perdure pas en seconde année de culture, lorsque la sauge atteint le stade inflorescence. Pour expliquer ce résultat, l'hypothèse d'une colonisation racinaire réussie par le champignon inoculé peut être avancée. Cependant, les résultats de taux de mycorhization mesurés en 1^{ère} année contredisent cette hypothèse (5% en 1^{ère} année contre 20% en 2nd année).

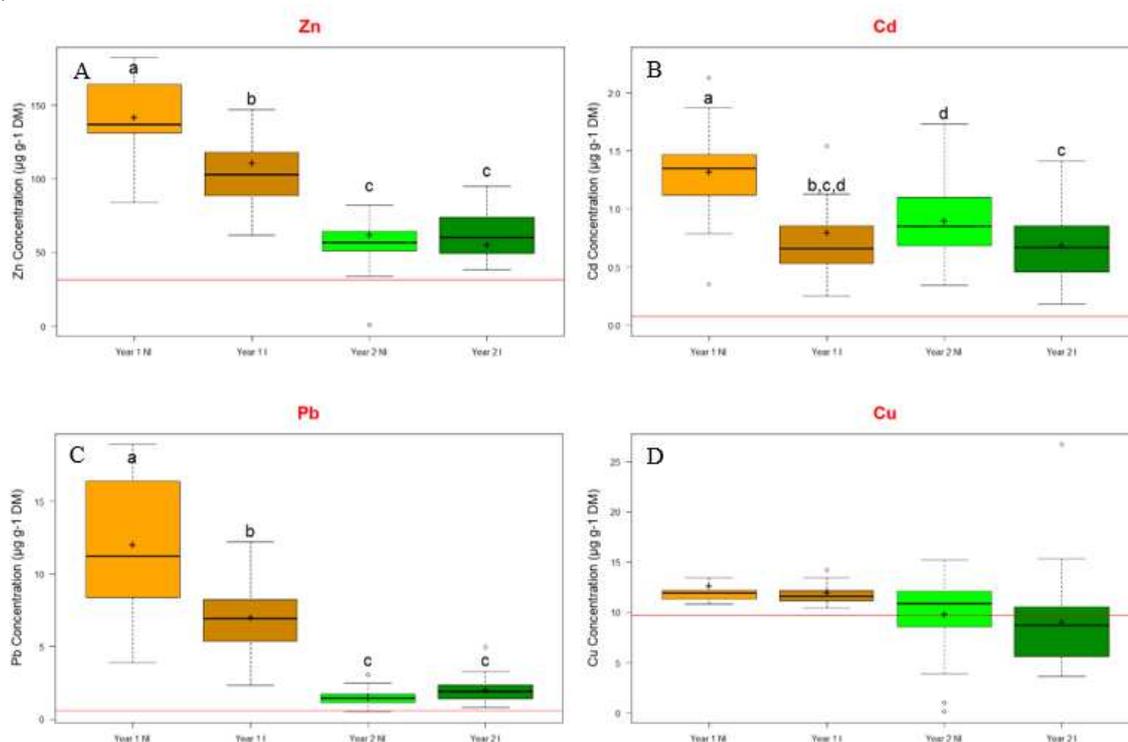


Figure 19 : Concentrations de Zn (A), Cd (B), Pb (C) et Cu (D) dans les feuilles (année 1, orange) et les inflorescences (année 2, vert) de la sauge inoculée (I) et non-inoculée (NI) (les box plots indiquent la médiane, les percentiles et la moyenne \pm SD ; la ligne rouge indique les valeurs de référence mesurées sur la coriandre sur le site non-pollué de Rodelinghem), les différences significatives sont indiquées à $\alpha = 0,05$.

3.3.4. Production des HE issues de la biomasse de PPAM cultivées : rendements de distillation et quantité d'HE produites

La distillation a été réalisée par la société Ferrant PHE à partir des inflorescences de la sauge sclérée, des parties aériennes de coriandre ou des graines de coriandre

Dans le cas de la coriandre, des rendements de 10 et de 6 kg/ha ont été obtenus, pour l'HE issue des parties aériennes et des graines respectivement, quelle que soit la parcelle expérimentale et la modalité, inoculée ou non (Tableau 10). Les rendements obtenus pour l'HE issue des parties aériennes de coriandre sont comparables à ceux décrits dans la littérature, de l'ordre de 10 kg/ha (Smallfield et al., 1994). En revanche, les rendements obtenus à partir des graines de coriandre sont deux à trois fois plus faibles que ceux attendus, ces derniers pouvant atteindre jusqu'à 18 kg/ha (Priyadarshi and Borse, 2014). Ce faible rendement peut en partie s'expliquer par un été très sec qui a pu impacter la taille des graines, une récolte tardive ayant entraîné une chute importante des graines lors de la récolte et une distillation des graines sans broyage au préalable.

Tableau 10 : Rendement de distillation et rendement des HE obtenues à partir des parties aériennes et de graines de coriandre. NI : non inoculé ; I : inoculé.

Conditions		Coriandre parties aériennes		Coriandre graine	
		Rendement de distillation (%)	Rendement (kg/ha)	Rendement de distillation (%)	Rendement (kg/ha)
Non pollué	NI	0,075	10,2	0,183	4,4
	I	0,085	10,6	0,206	7,5
Pollué	NI	0,047	11,1	0,133	6,3
	I	0,040	9,6	0,166	6,2

Dans le cas de la sauge sclarée (Tableau 11), les rendements en HE sont généralement plus élevés la deuxième année de culture par rapport ceux de la première et troisième année (Carrubba et al., 2002; Zutic et al., 2016). Cela a été vérifié dans le cadre de cette étude puisque les rendements ont atteint 0,5 à 2,7 kg/ha la première et la troisième année de culture, et 13 à 34 kg/ha, la deuxième année. En comparant ces chiffres à des valeurs de référence (de l'ordre de 10 à 30 kg d'HE/ha), les rendements obtenus la deuxième année se situent donc dans une fourchette haute (CRIEPPAM ; Yaseen et al., 2015). Si les chiffres affichés étaient attendus pour la première année, ils sont en revanche plus surprenant pour la troisième année, où des rendements en HE à hauteur de 50 à 60 % de ceux obtenus en deuxième année étaient espérés (Carrubba et al., 2006). Ceci peut s'expliquer par le fait que la sauge a notamment fait l'objet d'une récolte tardive en raison des conditions climatiques et que les pratiques culturales n'étaient pas optimales (absence de broyage de la partie aérienne au printemps, difficultés dans le contrôle des adventices). Au vu des chiffres affichés dans la littérature, la marge d'amélioration des rendements semble importante.

Tableau 11 : Rendement de distillation et rendement des HE obtenues à partir des sommités fleuries de sauge sclarée. NI : non inoculé ; I : inoculé.

Conditions		Année 1		Année 2		Année 3	
		Rendement de distillation (%)	Rendement (kg/ha)	Rendement de distillation (%)	Rendement (kg/ha)	Rendement de distillation (%)	Rendement (kg/ha)
Non pollué	NI	0,005	0,93	0,021	12,9	0,0012	0,48
	I	0,007	0,53	0,019	20,3	0,0059	2,7
Pollué	NI	-	0,17	0,035	33,7	0,0059	1,4
	I	-	0,15	0,020	24,2	0,0058	2,3

3.4. Qualité des HE produites

3.4.1. Concentrations en ETM dans les HE de coriandre et de sauge

Les valeurs de concentrations en ETM dans les deux espèces (Tableau 12) ont été comparées à celles obtenues sur les huiles des mêmes espèces cultivées sur le site non pollué de Rodelinghem et à celles d'huiles commerciales.

Pour les deux espèces, et quel que soit le stade de développement de l'espèce, les concentrations en ETM mesurées dans les HE sont proches ou équivalentes de la limite de quantification, ce qui met en évidence que ces valeurs sont très faibles. De plus, le type de sol sur lequel l'espèce s'est développée (pollué versus non pollué) n'influe pas sur ce résultat.

L'inoculation n'a pas influencé les concentrations en ETM des HE de coriandre. Dans le cas de l'HE de la sauge récoltée au stade feuille, un effet de l'inoculation sur les concentrations en Cu et Cr (réduction ou augmentation) a été mis en évidence.

Pour les deux espèces, les plus faibles concentrations d'ETM sont obtenues pour les HE distillées à partir des organes qui sont habituellement utilisées pour la distillation (graines pour la coriandre et les inflorescences pour la sauge). Ces valeurs sont équivalentes ou plus faibles que celles mesurées dans les HE commerciales.

L'ensemble de ces résultats montre que le transfert d'ETM de la phytomasse aux HE est très limité et qu'il ne dépend pas les teneurs initiales en ETM de la phytomasse (Angelova et al, 2016). Ces résultats montrent également que l'hydrodistillation (ou distillation à la vapeur) est un procédé pertinent dans nos conditions expérimentales car les ETM ne sont pas entraînés par la vapeur dans les huiles. Ces résultats confirment de plus, qu'il n'est pas nécessaire d'introduire une étape de lavage des plantes avant la distillation, les HE présentant des concentrations équivalentes à celles issues de sol non pollué.

Tableau 12 : Concentrations d'ETM dans les HE issues des parties aériennes (A, part) et des graines de coriandre (A) et des feuilles et inflorescences de sauge (B), inoculées (I) et non-inoculées (NI), en fonction du site pollué (cont,) et non pollué (uncont,). Les différences significatives sont indiquées à $\alpha = 0,05$, « Commercial » correspond aux HE commerciales, QL = Limite de quantification.

A

	As		Cd		Cr		Cu		Ni		Pb		Sb		Zn		
QL ($\mu\text{g g}^{-1}$)	0.01	0.015	0.01	0.005	0.01	0.015	0.05	0.05	0.03	0.013	0.01	0.0125	0.01	0.005	0.01	0.05	
Coriandre	A. part	Seed	A. part	Seed	A. part	Seed	A. part	Seed	A. part	Seed	A. part	Seed	A. part	Seed	A. part	Seed	
I cont.	0.01 (0.002) ^a	QL	QL	QL	0.036 (0.009) ^a	0.022 (0.009)	0.056 (0.1) ^a	QL	0.06 (0.03)	QL	QL	QL	QL	QL	QL	QL	
NI cont.	0.013 (0.004) ^{a,b}	QL	QL	QL	0.034 (0.03) ^a	0.018 (0.003)	QL ^a	QL	0.064 (0.04)	QL	0.073 (0.109)	QL	QL	QL	QL	0.094 (0.145)	
I uncount.	0.014 (0.002) ^{a,b}	QL	QL	QL	QL	0.017 (0.002)	QL ^a	QL	QL 0	0.017 (0.007)	QL	QL	QL	QL	QL	0.081 (0.122)	0.072 (0.038)
NI uncount.	0.01 (0.002) ^a	QL	QL	QL	0.021 (0.02) ^a	0.019 (0.003)	QL ^a	QL	0.031 (0.001)	QL	0.072 (0.106)	QL	QL	QL	QL	0.075 (0.111)	0.054 (0.007)
Commercial		0.015 ^{QL}		0.015 ^{QL}		0.026		0.862		0.03 ^{QL}		0.06 ^{QL}		0.03 ^{QL}		0.067	

B

Sauge	Year 1		Year 2		Year 1		Year 2		Year 1		Year 2		Year 1		Year 2	
I cont.	0.015 (0.004) ^{a,b}	QL	QL	QL	0.064 (0.015) ^a	0.03 (0.026)	0.321 (0.014) ^b	QL	0.056 (0.023)	0.024 (0.015)	QL	0.014 (0.002)	QL	0.009 (0.002)	0.126 (0.76)	0.05 (0.126)
NI cont.	QL ^a	QL	QL	QL	0.142 (0.039) ^b	0.015 (0)	0.057 (0.011) ^a	QL	0.06 (0.053)	0.058 (0.83)	QL	QL	QL	QL	0.141 (0.071)	QL
I uncount.	0.023 (0.004) ^b	QL	QL	QL	0.204 (0.007) ^c	QL	2.258 (0.082) ^c	QL	0.069 (0.035)	QL	QL	QL	QL	QL	0.077 (0.004)	QL
NI uncount.	0.02 (0.002) ^{a,b}	QL	QL	QL	0.046 (0.003) ^a	QL	0.225 (0.08) ^b	QL	QL	0.017 (0.27)	0.016 (0.008)	QL	QL	QL	QL	QL
Commercial		0.015 ^{QL}		0.015 ^{QL}		0.015 ^{QL}		0.03 ^{QL}		0.03 ^{QL}		0.06 ^{QL}		0.03 ^{QL}		0.03 ^{QL}

L'accumulation des ETM dans les HE est très limitée. Les ETM ont été détectés à l'état de traces.

Les teneurs en ETM observées dans les HE de notre étude étaient, la plupart du temps, inférieures à celles mesurées dans des échantillons d'HE trouvés sur le marché.

3.4.2. Résidus de pesticides dans les HE de coriandre et de sauge

Une analyse multi-résidus de pesticides a été menée, afin d'évaluer la qualité globale des HE vis-à-vis de polluants divers (Tableau 13). Les HE de sauge scolarée et de coriandre (parties aériennes et graines) présentaient une bonne qualité au regard de l'analyse des résidus de pesticides, avec des molécules détectées à l'état de traces et en faible nombre. Toutefois, il existe à l'heure actuelle un vide réglementaire résidant dans l'absence de norme établie pour des usages non-alimentaires comme alimentaires des HE et relatif à la limite maximale en ETM tolérée dans les HE, aussi bien en France que plus largement en Europe. Concernant les résidus de pesticides, les HE à vocation non-alimentaires n'ont

en pratique pas non plus de limite maximale de résidus définie (Quarré, 2018; Tascone et al., 2014). Afin de tenter de trouver des éléments de réponse, la qualité des HE obtenues dans le cadre de cette étude a donc été comparée à celle d'échantillons commerciaux, ou à des résultats d'analyses de pesticides fournis par Ferrant PHE et relatifs à des usages alimentaires. Ainsi, il a notamment été démontré que les teneurs en ETM observées dans les HE de notre étude étaient inférieures à celles mesurées dans des échantillons d'HE trouvés sur le marché.

Tableau 13 : Quantités résiduelles de pesticides dans les HE distillée de coriandre et de sauge. La limite de quantification (LQ) est de 0,01 mg/kg. - : non détecté.

Conditions		Coriandre - parties aériennes		Coriandre - graines		Sauge sclérée	
Principe actif	Activité	Non pollué	Pollué	Non pollué	Pollué	Non pollué	Pollué
Aclonifen	Herbicide	-	1.1 ± 0.3	-	-	-	-
Chlorpyrifos	Insecticide	-	-	-	< LQ	-	-
Clomazone	Herbicide	0.079 ± 0.040	0.028 ± 0.014	-	-	-	-
DDT	Insecticide	-	0.010 ± 0.005	-	-	-	-
Dimethenamid	Herbicide	0.030 ± 0.015	0.076 ± 0.038	-	-	< LQ	-
Ethofumesate	Herbicide	-	0.034 ± 0.017	-	-	-	-
Hexachlorobenzène	Fongicide	0.016 ± 0.008	0.012 ± 0.006	0.012 ± 0.006	-	-	-
Heptachlor	Insecticide	-	0.051 ± 0.026	-	-	-	-
Linuron	Herbicide	0.073 ± 0.037	0.020 ± 0.010	-	-	-	-
Metolachlor	Herbicide	-	0.019 ± 0.010	-	-	-	-
Pendimethalin	Herbicide	0.52 ± 0.18	1.7 ± 0.5	0.12 ± 0.058	-	-	-
Pentachloroanisole	Produit de dégradation	-	< LQ	-	-	-	-
Prosulfocarb	Herbicide	-	0.21 ± 0.08	-	-	-	-
Triallate	Herbicide	0.094 ± 0.047	0.027 ± 0.014	0.052 ± 0.026	-	-	-

Les HE de sauge sclérée et de coriandre (parties aériennes et graines) présentaient une bonne qualité au regard de l'analyse des résidus de pesticides, avec des molécules détectées à l'état de traces et en faible nombre.

3.4.3. Composition des HE produites sur les deux parcelles expérimentales

Outre la qualité des HE en termes de contaminations potentielles par les ETM ou les résidus de pesticides, la composition chimique des HE peut également être modifiée par la présence des ETM dans le sol et par l'inoculation mycorhizienne. La composition chimique (Tableau 14) des HE de sauge sclérée et de coriandre (parties aériennes ou graines) a donc été établie pour l'ensemble des conditions expérimentales (site expérimental pollué ou non par les ETM, condition inoculée ou non avec le CMA). Nos résultats indiquent que l'HE de sauge sclérée est composée majoritairement de monoterpènes (jusqu'à 85 %) dont font partie le linalol (10-17 %) et l'acétate de linalyle (51-63 %), ainsi que des sesquiterpènes, tels que le germacrène-D (7-17 %) et corroborent les données décrites dans la littérature (Aćimović et al., 2018; Kumar et al., 2013; Sharopov and Setzer, 2012; Zutic et al., 2016). Par ailleurs, les HE issues des graines et des parties aériennes de coriandre présentent des compositions distinctes. Les HE issues des graines de coriandre sont majoritairement composées de monoterpènes, tandis que celles provenant des parties aériennes sont essentiellement constituées d'alcools et d'aldéhydes, comme décrit dans la littérature (Bhuiyan et al., 2009; Freires et al., 2014; Matasyoh et al., 2009; Satyal and Setzer, 2020). Ainsi, l'HE issue de la distillation des graines de coriandre présente une très forte proportion de linalol (75-83 %), accompagnée d' α -pinène et de α -terpinène variant respectivement de 3 à 5 % et de 6 à 9 %, tandis que

L'HE issue des parties aériennes présente une majorité de 2-décénal (38-51 %), du linalol, du décanal ainsi que du 2-dodécénal. Par ailleurs, nos résultats montrent que les compositions chimiques des HE de sauge sclarée et de coriandre (parties aériennes et graines) sont similaires entre les différentes conditions expérimentales (parcelle polluée ou non et modalité inoculée ou non avec le CMA). Ces résultats sont en accord avec la littérature qui rapporte que les PPAM de la famille des Lamiacées, telles que *Ocimum basilicum*, *Anethum graveolens*, *Mentha piperita* et plus généralement les différentes espèces des genres *Mentha*, *Rosmarinus* ou *Ocimum* sont capables de se développer sur des sols pollués par des ETM et d'afficher une composition chimique inchangée en termes de quantité et de qualité (Biswas et al., 2011; Pandey et al., 2019). En revanche, certains travaux ont montré que l'introduction d'un inoculum mycorhizien pouvait modifier la quantité et la qualité de l'HE produite, notamment en affectant les voies de biosynthèse de certains métabolites secondaires (Golubkina et al., 2020; Kapoor et al., 2002; Khaosaad et al., 2006). Il a par exemple été souligné que l'inoculation de la coriandre avec *Glomus macrocarpum* et *Glomus fasciculatum* provoquait respectivement une augmentation des teneurs en géraniol et en linalol (Kapoor et al., 2002). De manière similaire, la quantité d'acétate de linalyle présente dans l'HE de *Lavandula angustifolia* a été significativement augmentée en présence d'un inoculum composé de *R. irregularis* (Golubkina et al., 2020). Dans notre cas les compositions chimiques des différentes HE testées ne sont pas modifiées par l'inoculation mycorhizienne.

Tableau 14 : Composition des HE distillées à partir des parties aériennes et de graines de coriandre et des sommités fleuries de sauge sclarée cultivées sur la parcelle polluée et non polluée.

	Coriandre parties aériennes				Coriandre graine				Sauge sclarée				
	Non pollué		Pollué		Non pollué		Pollué		Non pollué		Pollué		
	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	
(Z)-2-decenal	48	51,4	47,1	37,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Linalool	29,3	21,8	32,1	39,2	75	76,8	83,2	79,3	10,0	10,4	16,5	14,8	
Decanal	6,6	7,9	7,2	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
2-dodecenal	4,6	5,8	3,0	3,7	-	-	-	-	-	-	-	-	
2-tridecenal	3,6	4,0	2,0	2,4	-	-	-	-	-	-	-	-	
γ -terpinene	1,6	1,9	1,4	1,8	8,9	8,6	6,6	8,4	-	-	-	-	
β -farnesene	1,5	1,4	0,3	0,0	0,8	-	-	-	-	0,1	0,1	-	
Camphor	1,3	1,0	1,4	1,7	3,7	3,5	3,6	3,7	-	-	-	-	
2-undecenal	1,2	1,7	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	
α -pinene	0,9	1,3	1,0	1,3	5,4	4,5	3,3	2,7	-	-	-	-	
Sesquiphellandrene	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Dodecanal	0,5	0,6	0,8	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	
p-cymene	0,3	0,3	0,2	1,1	1,6	1,6	1,3	1,2	-	-	-	-	
Linalyl acetate	-	-	-	-	-	-	-	-	53	50,6	63,0	62,6	
Germacrene D	-	-	-	-	-	-	-	-	14,8	17,1	6,7	7,3	
α -copaene	-	-	-	-	-	-	-	-	3,6	4,5	1,9	2,0	
β -caryophyllene	-	-	-	-	-	-	-	-	3,2	3,9	2,6	2,0	
Geranyl acetate (trans)	-	-	-	-	1,6	3,0	0,3	1,8	2,5	2,1	1,5	2,5	
β -myrcene	-	-	-	-	-	-	-	-	2,1	1,5	0,9	1,2	
α -terpineol	-	-	-	-	-	-	-	-	1,9	1,4	1,8	2,4	
Germacrene B	-	-	-	-	-	-	-	-	1,7	2,0	0,9	0,9	
Geranyl acetate (cis)	-	-	-	-	-	-	-	-	1,3	0,9	0,7	1,0	
δ -cadinene	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	1,6	0,4	0,6	
β -copaene	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1	1,4	0,7	0,5	
Limonene	-	-	-	-	1,7	1,6	1,3	1,7	0,8	-	0,5	0,1	
Ocimene	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7	0,6	0,4	0,7	
Sclareol oxide	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4	0,6	0,3	0,4	
Humulene	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4	0,4	0,1	0,2	
Sclareol	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	0,3	0,4	0,3	
Caryophyllene oxide	-	-	-	-	0,2	-	-	-	0,3	0,4	0,2	0,2	
α -cubebene	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	-	0,1	0,1	

β -phellandrene	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	0,1	0,1	0,1
4-carene	-	-	-	-	0,3	-	-	0,8	0,2	0,1	0,1	0,2
Camphene	-	-	-	-	0,6	0,5	0,4	0,3	-	-	-	-
Undecanal	-	-	3,5	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-
(Z)-5-tridecene	-	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Ces compositions chimiques des différentes HE testées n'étaient affectées ni par la présence des ETM dans le sol, ni par l'inoculation mycorhizienne.

3.5. Evaluation de l'efficacité de phytostabilisation aidée

3.5.1. Concernant la combinaison coriandre-inoculum mycorhizien

Zn: Comme le montre la Figure 20, la réduction de la fraction initiale de Zn extractible attendue comme objectif de phytostabilisation aidée n'a pas été atteinte, La fraction extractible reste également supérieure à la valeur de référence de la norme, Aucun effet de l'inoculum n'a pu être mis en évidence,

Cd: Comme pour le Zn, la phytostabilisation aidée n'a pas atteint son objectif concernant la réduction de la fraction mobile de Cd dans le sol par rapport à la situation initiale et par rapport à la valeur de référence, Aucun effet de l'inoculum n'a pu être mis en évidence.

Pb et Cu: La phytostabilisation aidée n'a pas atteint son objectif concernant la réduction de la fraction mobile de Cu et de Pb dans le sol par rapport à la situation initiale et par rapport à la valeur de référence, Aucun effet de l'inoculum n'a pu être mis en évidence.

L'absence d'effet de l'inoculum pourrait être due à une faible symbiose entre le système de la coriandre et le champignon mycorhizien, à une faible interaction entre les hyphes du champignon et la fraction extractible l'empêchant de la réduire par divers mécanismes (Leung et al, 2013) ou au faible succès de la mycorhization initiale à cause de la compétition avec les champignons endogènes.

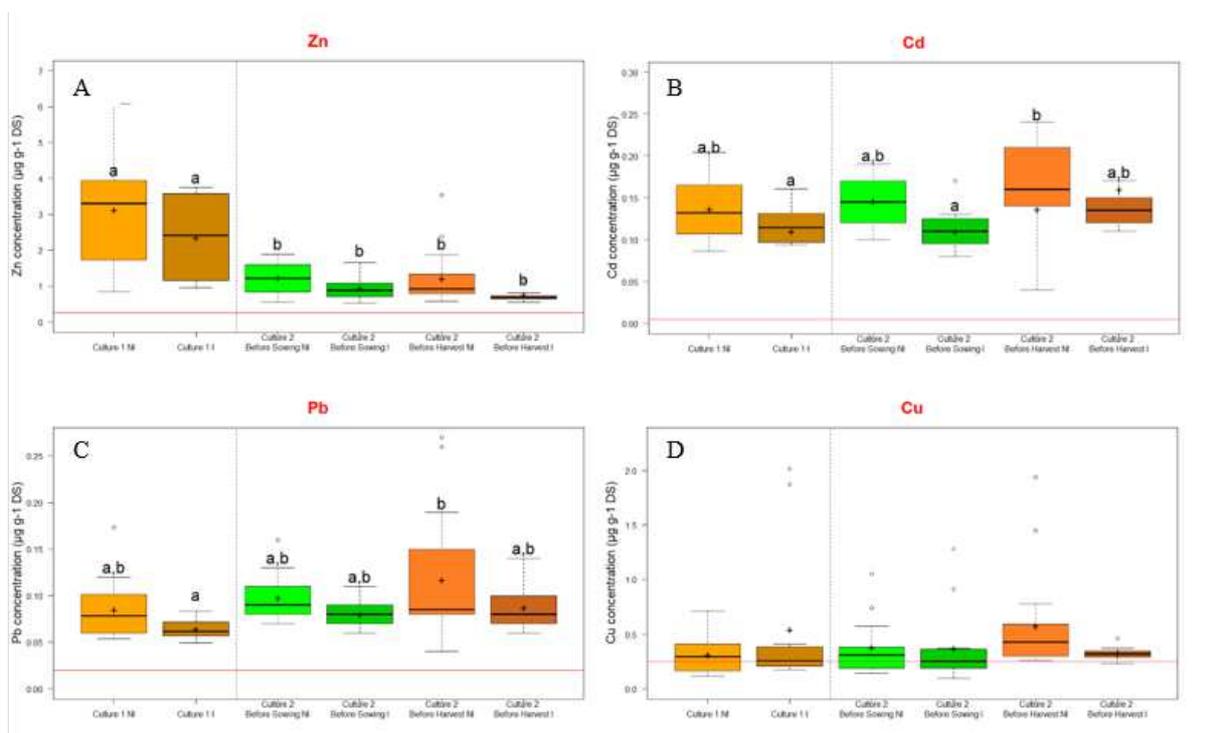


Figure 20 : Concentrations extractibles (NH_4NO_3) de Zn (A), Cd (B), Pb (C) et Cu (D) dans le sol pollué, Les modalités représentées sont : coriandre inoculée (I) et non-inoculée (NI) avant la récolte des parties aériennes (orange), avant le 2ème semis (vert) et avant la récolte des graines (chocolat), Les box plots indiquent la médiane, les percentiles et la moyenne \pm SD; la ligne rouge indique les valeurs de référence de la norme ISO 19730:2008(E), Les différences significatives sont indiquées à $\alpha = 0,05$.

3.5.2. Concernant la combinaison sauge-inoculum

Zn : Comme le montre la Figure 21, la réduction de la fraction extractible de Zn est due à l'effet combinée de la sauge et de l'inoculum, Après un cycle de deux années, la fraction extractible reste supérieure à la valeur de référence de la norme et est identique à la valeur initiale, ce qui ne suggère ni succès ni insuccès de la combinaison sauge-inoculum sur ce paramètre,

Cd : Le même résultat est obtenu pour le Cd malgré la mise en évidence d'un effet positif de l'inoculum en seconde année de culture de la sauge, Après un cycle de deux années, la fraction extractible reste très supérieure à la valeur de référence de la norme et est identique à la valeur initiale,

Pb : En 2^{ème} année de culture, un effet négatif de l'inoculum a pu être observé (augmentation de la fraction extractible de Pb), Après un cycle de deux années, la fraction extractible reste supérieure à la valeur de référence de la norme et à la valeur initiale, Le Pb est cependant très peu mobile,

Cu : La phytostabilisation aidée n'a pas changé la valeur de la fraction extractible qui est restée très proche des valeurs de référence comme initiale,

L'inoculation de la sauge n'a pas modifié la fraction extractible des ETM du sol, Lorsque qu'un effet a été mis en évidence, il ne dure pas ou n'est pas suffisamment important pour entraîner une réduction significative de cette fraction,

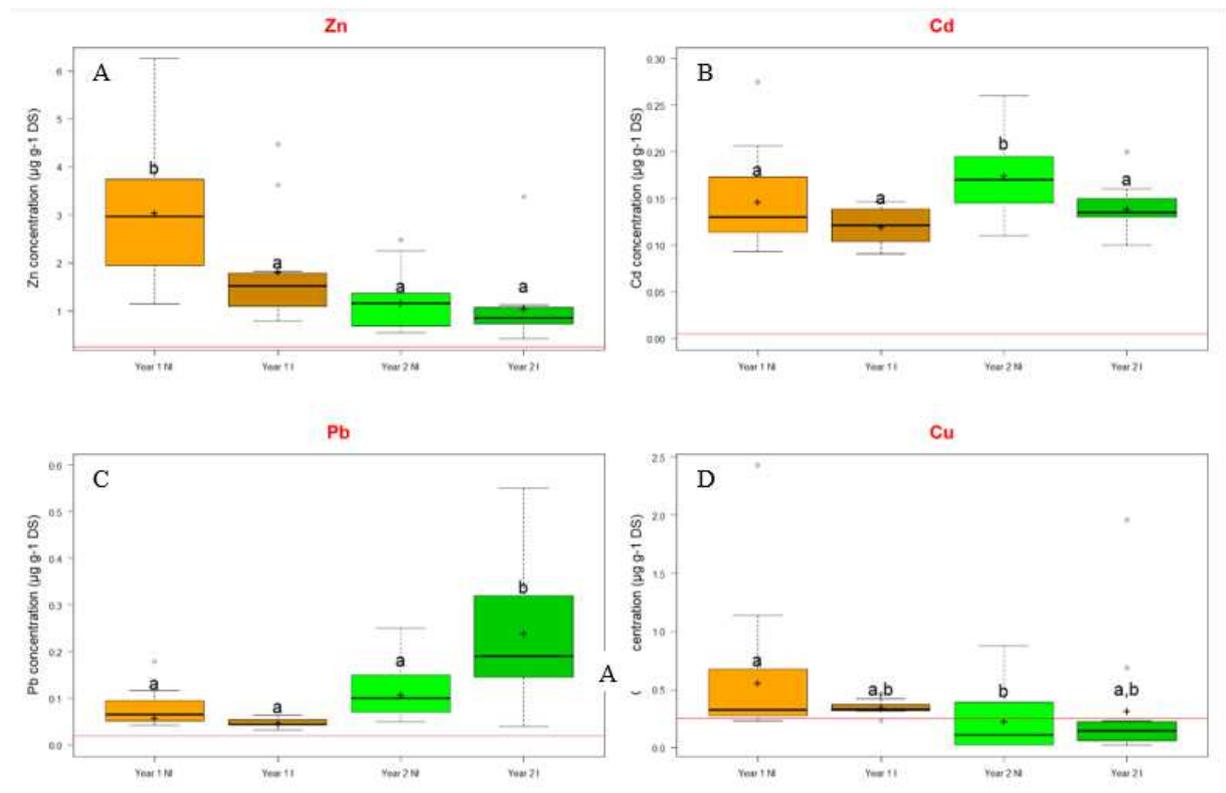


Figure 21 : Concentrations extractibles (NH_4NO_3) de Zn (A), Cd (B), Pb (C) et Cu (D) dans le sol pollué. Les modalités représentées sont : sauge inoculée (I) et non-inoculée (NI) avant la récolte des feuilles (année 1, orange) et des inflorescences (année 2, vert). Les box plots indiquent la médiane, les percentiles et la moyenne \pm SD. La ligne rouge indique les valeurs de référence de la norme ISO 19730:2008(E). Les différences significatives sont indiquées à $\alpha = 0,05$.

En présence d'inoculum mycorhizien, la mobilité du Cd a été réduite dans le sol associé à la sauge.

3.6. Evaluation du niveau de contamination des résidus de distillation et études des filières de valorisation des résidus

3.6.1. La coriandre

A l'exception du Cu, les résidus de distillation obtenus à partir des graines contiennent moins d'ETM que les résidus obtenus à partir des parties aériennes ce qui est en accord avec les résultats concernant les ETM dans les graines et les parties aériennes de coriandre, De même, les concentrations dans les résidus issus de sol pollué sont supérieures à celles des résidus issus de sols non pollués (Tableau 15).

En comparaison de ces dernières, les concentrations dans les résidus obtenus à partir des parties aériennes sont supérieures tandis que celles obtenues à partir des graines sont du même ordre, ce qui traduit l'effet de concentration du procédé de distillation.

3.6.2. La sauge

Toutes les concentrations en ETM des résidus de sauge issus de sol pollué sont supérieures à celles mesurés dans les résidus issus de sol non pollué, Les concentrations en ETM des résidus issus des feuilles du site pollué sont supérieures à celles des résidus d'inflorescences issus du même site.

3.6.3. Valorisation des résidus de distillation de sauge et de coriandre

En termes de filière de valorisation, la possibilité d'utiliser ces résidus comme (i) amendement du sol a été étudié par comparaison avec la norme NF U 44-051 (2019) ainsi que (ii) la possibilité d'une valorisation en alimentation animale par comparaison avec la Directive 2002/32/CE, Enfin, (iii) la méthanisation de ces résidus a été envisagée au travers l'interprétation de leur potentiel biométhanogène (BMP).

(i) Amendement du sol :

Coriandre : Les résidus issus de sol non pollué pourraient être utilisés en amendement du sol, Par contre, ceux issus de sol pollué ne le pourraient pas à cause de leur concentration en Cd qui est proche ou supérieure à $3 \mu\text{g g}^{-1}$ DM, la valeur seuil, En effet, le compostage conduisant à une perte d'eau et de matière organique de plus de 50% (Oudart, 2013), les concentrations attendues augmenteraient proportionnellement, Les résidus issus de site pollué ne peuvent donc pas être envisagés comme des apports pour le compostage.

Sauge : Tous les résidus issus des sols pollué et non pollué présentent des concentrations inférieures aux valeurs seuils ce qui suggère une utilisation sans limite en amendement du sol de ces deux types de résidus.

(ii) Valorisation en alimentation animale :

Coriandre : Comme précédemment, si les résidus issus de sol non pollué peuvent être utilisés en alimentation animale, ceux issus de sol pollué ne le peuvent pas car, même si les résidus de coriandre présentaient des paramètres nutritionnels satisfaisants, les concentrations en Cd dépassent largement la valeur seuil ($1 \mu\text{g.g}^{-1}$ DM).

Sauge : Les résidus issus de sol non pollué peuvent être utilisés en alimentation animale, Au contraire des résidus de feuilles issus de sol pollué, les résidus issus des inflorescences pourraient être utilisés en alimentation animale, les valeurs seuils pour le Cd n'étant pas dépassées.

(iii) Méthanisation :

Coriandre : Le BMP des résidus de coriandre issus de sol non pollué est intéressant car il est équivalent à celui déterminé pour les herbacées de bord de route (jusqu'à $203 \text{ NI} \times \text{kg VS}^{-1}$; André et al, 2019), Les BMP des résidus issus de sol pollué sont quant à eux inférieurs de 26% ce qui pourrait être dû à la présence d'ETM dans la coriandre qui aurait diminué l'activité des microorganismes méthanogènes et en conséquence la production de biométhane. Ces résidus pourraient compléter les intrants d'une installation de méthanisation, avec ou sans préparation, s'ils étaient incorporés à raison de 10-15%, Cependant, l'utilisation de résidus riches en Cd pourraient limiter la valorisation du digestat comme amendement du sol ou fertilisant, L'utilisation de résidus obtenus à partir des graines de coriandre moins enrichies en Cd serait à étudier.

Sauge : Les BMP des résidus de sauge sont plus faibles qu'ils soient issus de sols pollué ou non pollué que ceux de la coriandre, ce qui pourrait être expliqué par un contenu en lignine supérieur dans le cas de la sauge (Triolo and al, 2011, 2012), Cependant, un prétraitement des résidus par broyage par exemple pourrait augmenter leur BMP (Kratky & Jirout (2015), Etant donné que les résidus de sauge sont moins

enrichis en Cd que ceux de la coriandre, ils pourraient diversifier le gisement d'intrants d'un méthaniseur surtout dans les territoires où la compétition pour la ressource est importante.

Les résidus de distillation de la sauge pourraient être valorisés en amendements du sol ou en alimentation animale.

Tableau 15 : Concentration d'ETM ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de matière sèche) dans les résidus de distillation obtenus à partir des parties aériennes et des graines de coriandre (A) et des feuilles (year 1) et inflorescences (year 2) de sauge (B), inoculées (I) et non-inoculées (NI), en fonction du site pollué et non pollué. Les différences significatives sont indiquées à $\alpha = 0,05$, BMP : Bio-Methane Potential, en $\text{NL} \times \text{kg SV}^{-1}$

A)

Coriandre	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	BMP
Aerial Part NI	1.16 (0.08) ^a	9.1 (1.45) ^a	8.9 (1.36) ^a	15.4 (1.1) ^a	4.7 (0.6) ^a	29.8 (2.3) ^a	180 (12) ^a	132.08
Aerial Part I	1.69 (0.17) ^b	8.8 (1.14) ^a	10.5 (2.8) ^a	19.8 (1.2) ^b	5.3 (1) ^a	43.1 (2.8) ^b	209 (26) ^a	145.18
Seed NI	QL ^{a,c}	3.7 (0.44) ^b	1.2 (0.11) ^b	18.1 (2.1) ^{a,b}	1.5 (0.1) ^b	0.9 (0.07) ^c	112 (11) ^b	-
Seed I	QL ^{a,c}	3.51 (0.37) ^b	1.5 (0.68) ^b	18.8 (2.3) ^{a,b}	1.9 (0.2) ^b	0.8 (0.1) ^c	103 (19) ^b	-
Aerial Part un-contaminated	0.26 (0.05)	0.75 (0.1)	6.9 (2.92)	10.1 (1.45)	4 (1.7)	0.6 (0.2)	49 (7)	195.8
Seed un-contaminated	0.79 (0.79)	0.39 (0.04)	21.2 (22)	17.4 (4.2)	10 (8.7)	0.6 (0.5)	76.45 (30)	-

B

Sauge								
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	BMP
Year 1 I	0.29 (0.03) ^{a,c}	1.24 (0.07) ^a	2.5 (0.5) ^a	11.1 (0.7) ^a	1.3 (0.14) ^{a,c}	13.5 (1.1) ^a	164 (10) ^a	89.61
Year 1 NI	0.34 (0.09) ^a	1.67 (0.09) ^b	2.9 (1) ^a	12.6 (0.6) ^b	1.7 (0.55) ^a	18.3 (2.7) ^b	183 (9) ^b	72.85
Year 2 NI	0.11 (0.01) ^{b,c}	0.69 (0.03) ^a	1.6 (0.4) ^a	7.6 (0.6) ^a	0.7 (0.17) ^{b,c}	3.3 (0.7) ^a	57 (3) ^a	-
Year 2 I	0.18 (0.04) ^a	0.82 (0.18) ^a	1.7 (0.1) ^a	7.9 (0.9) ^a	0.55 (0.03) ^b	3.7 (0.7) ^a	67 (5) ^a	-
Year 1 un-contaminated	0.18 (0.01)	0.19 (0)	2.9 (0.1)	8.7 (0.05)	1.4 (0.04)	0.37 (0.09)	33 (0)	144.5
Year 2 un-contaminated	0.20 (0.05)	0.09 (0.01)	3.3 (0.7)	7.9 (0.25)	1.8 (0.3)	0.4 (0.16)	29 (3)	-
NF U 44-051^a	18	3	120	300	60	180	800	-
Animal food threshold^b	4	1	-	-	-	40	-	-

QL^a=0.1; QL^{b,c}=0.05; ^a: NF U 44-051/A3(August 2019) Organic soil improver- Designations, specifications and marking - Additional elements; ^b Directive 2002/32/CE of the 7 May 2002 for animal food.

3.7. Propriétés biologiques des HE

Un autre axe de ce travail a consisté à étudier les activités biologiques des HE distillées à partir de la sauge sclarée (inflorescences) et de la coriandre (graines, parties aériennes) cultivées sur sols pollués par les ET. En s'appuyant sur des prévisions d'évolution, le marché des HE et des produits naturels à base de plante est en constante augmentation et pourrait atteindre 16 milliards de dollars en 2026 (Allied Market Research, 2020; CBI, 2020). Leur valorisation à des fins non-alimentaires dans des secteurs tels que la protection des cultures (Raveau et al., 2020) ou la santé humaine (Kostić et al., 2017) pourrait permettre de diversifier leurs domaines d'application et d'accroître le potentiel de la filière en augmentant l'offre et en stimulant la demande.

3.7.1. Propriétés biologiques des HE avec un potentiel d'application en protection des cultures

En vue d'applications en protection des cultures, les pouvoirs antifongique, anti-germinatif et herbicide des HE, distillées à partir de la sauge sclarée et de la coriandre (graines, parties aériennes) cultivées sur sols pollués par les ETM, ont été évalués *in vitro*.

Quelle que soit l'HE, un effet fongistatique a été montré vis-à-vis de deux champignons phytopathogènes testés, *F. culmorum* et *Z. tritici*, responsables de la fusariose et de la septoriose des céréales respectivement (Tableaux 16 & 17). Des valeurs de CI50 comprises entre 0,20 et 2,83 g.L⁻¹ et entre 0,001 et 0,08 g.L⁻¹ ont été obtenues pour les tests antifongiques contre *F. culmorum* et *Z. tritici* respectivement. En termes d'efficacité antifongique et en comparaison avec un témoin positif (fongicide Aviator), les HE testées peuvent être classées dans l'ordre suivant : Aviator ≥ HE de coriandre parties aériennes ≥ HE de coriandre graines ≥ HE de sauge sclarée.

Tableau 16 : Valeurs de CI50 (g.L⁻¹) résultant des essais biologiques *in vitro* de contact direct et de test de volatilité contre *F. culmorum*.

Conditions		Coriandre Parties aériennes		Coriandre Graines		Sauge sclarée		Témoin positif	
		Sans β-CD	Avec β-CD	Sans β-CD	avec β-CD	Sans β-CD	Avec β-CD		
Contact direct	Non pollué	NI	0,46 ± 0,30 b	1,67 ± 0,64 c	0,46 ± 0,14 b	2,18 ± 0,14 c	2,08 ± 0,41 c	8,39 ± 2,41 d	0,00012 ± 0,00074 a
		I	0,61 ± 0,25 b	2,16 ± 2,02 c	0,42 ± 0,03 b	2,89 ± 1,62 c	2,63 ± 1,08 c	11,2 ± 7,80 d	
	Pollué	NI	0,53 ± 0,37 b	1,63 ± 0,55 c	0,53 ± 0,13 b	2,26 ± 0,61 c	1,47 ± 0,21 bc	5,24 ± 1,28 cd	
		I	0,76 ± 0,28 b	1,57 ± 0,23 c	0,80 ± 0,31 b	2,04 ± 0,05 c	1,54 ± 0,22 bc	3,91 ± 0,84 cd	
Test de volatilité	Non pollué	NI	0,59 ± 0,09 a'	1,98 ± 0,43 b'	0,80 ± 0,11 a'	2,52 ± 0,17 b'	2,63 ± 0,10 b'	11,8 ± 2,17 c'	-
		I	0,20 ± 0,03 a'	0,47 ± 0,07 a'	0,42 ± 0,23 a'	2,63 ± 0,48 b'	2,83 ± 0,64 b'	14,5 ± 3,27 c'	
	Pollué	NI	0,31 ± 0,07 a'	1,01 ± 0,62 ab'	0,40 ± 0,34 a'	2,39 ± 0,07 b'	1,99 ± 0,54 b'	8,29 ± 3,23 c'	
		I	0,78 ± 0,12 a'	2,20 ± 0,13 b'	0,45 ± 0,22 a'	2,44 ± 0,15 b'	2,05 ± 0,57 b'	7,38 ± 1,53 c'	

Tableau 17 : Valeurs de CI50 (g.L⁻¹) résultant des essais biologiques *in vitro* de contact direct et de test de volatilité contre *Z. tritici*.

	Conditions		Coriandre Parties aériennes		Coriandre Graines		Sauge sclarée		Témoin positif
			Sans β-CD	Avec β-CD	Sans β-CD	Avec β-CD	Sans β-CD	Avec β-CD	
			<i>Z. tritici</i>	Non pollué	NI	0,001 ± 0,001 a	0,09 ± 0,05 b	0,03 ± 0,02 ab		0,24 ± 0,18 bc	0,08 ± 0,11 ab	0,25 ± 0,12 bc	0,001 ± 0,001 a
	I	0,001 ± 0,001 a		0,08 ± 0,11 b	0,02 ± 0,01 ab	0,41 ± 0,52 c	0,04 ± 0,06 ab	0,19 ± 0,22 bc	
Pollué	NI	0,005 ± 0,006 a		0,08 ± 0,10 b	0,01 ± 0,01 ab	0,09 ± 0,11 b	0,03 ± 0,03 ab	0,21 ± 0,20 bc	
	I	0,04 ± 0,02 ab		0,15 ± 0,16 b	0,03 ± 0,04 ab	0,12 ± 0,12 b	0,01 ± 0,02 ab	0,12 ± 0,07 b	

Des effets anti-germinatifs et herbicides ont également été mis en évidence sur deux espèces végétales, la laitue (*L. sativa*), une monocotylédone et le ray-grass (*L. Pérenne*), une dicotylédone, communément utilisées dans des tests de phytotoxicité (Tableau 18 & 19). Pour l'effet anti-germinatif, des valeurs de CI50 comprises entre 0,05 et 44,0 g.L⁻¹ et entre 0,15 et 145 g.L⁻¹ ont été déterminées, contre la laitue et le ray-grass respectivement. Pour le second test visant à évaluer l'effet des HE sur la croissance de la plantule (effet herbicide), les valeurs de CI50 variaient entre 0,011 et 1,17 g.L⁻¹ et entre 0,044 et 0,77 g.L⁻¹ contre la laitue et le ray-grass respectivement. L'efficacité anti-germinative et herbicide des HE testées, en comparaison avec un témoin positif, le glyphosate, peut être classée comme suit, quelle que soit la plante cible : Glyphosate (témoin positif) > HE de coriandre parties aériennes > HE de coriandre graines ≥ HE de sauge sclarée.

Il est à souligner que dans l'ensemble, les activités biologiques des différentes HE testées étaient similaires, que les plantes aient été cultivées en conditions polluée ou non et en présence ou non de l'inoculum mycorhizien. Au vu des compositions chimiques établies, n'ayant présenté aucune modification quelles que soient les modalités testées, ces résultats étaient attendus.

Tableau 18 : Valeurs de CI50 (g.L⁻¹) résultant de tests anti-germinatifs chez la laitue et le ray-grass.

	Conditions		Coriandre Parties aériennes		Coriandre Graines		Sauge sclarée		Témoin positif
			Sans β-CD	Avec β-CD	Sans β-CD	Avec β-CD	Sans β-CD	Avec β-CD	
			Laitue	Non pollué	NI	0,05 ± 0,01 a	603 ± 138 e	0,56 ± 0,12 b		1,87 ± 0,17 bc	6,22 ± 2,72 c	NC	0,014 ± 0,006 a
	I	0,13 ± 0,79 a		NC	0,56 ± 0,24 b	1,81 ± 0,06 bc	44,0 ± 21,4 d	4315 ± 743 f	
Pollué	NI	0,08 ± 0,01 a		NC	0,73 ± 0,24 b	1,86 ± 0,02 bc	4,21 ± 1,08 c	8617 ± 741 f	
	I	0,13 ± 0,76 a		604 ± 107 e	0,76 ± 0,21 b	1,92 ± 0,07 bc	36,3 ± 26,0 d	4320 ± 743 f	
Ray-grass	Non pollué	NI	0,18 ± 0,08 a'	500 ± 317 e'	0,60 ± 0,06 b'	1,73 ± 0,26 bc'	145 ± 139 d'	3093 ± 975 f'	36,5 ± 15,1 cd'
		I	0,15 ± 0,03 a'	868 ± 568 e'	0,81 ± 0,22 b'	1,87 ± 0,23 bc'	102 ± 2 d'	847 ± 532 e'	
	Pollué	NI	0,19 ± 0,08 a'	95,1 ± 158 d'	0,77 ± 0,17 b'	1,93 ± 0,15 bc'	2,6 ± 0,39 c'	1273 ± 555 f'	
		I	0,16 ± 0,05 a'	782 ± 679 e'	0,74 ± 0,13 b'	1,80 ± 0,26 bc'	9,9 ± 8,3 c'	13,1 ± 11,1 c'	

Tableau 19 : Valeurs de CI50 (g.L⁻¹) résultant de tests herbicides chez la laitue et le ray-grass.

	Conditions		Coriandre Parties aériennes		Coriandre Graines		Sauge sclarée		Témoin positif
			Sans β-CD	Avec β-CD	Sans β-CD	Avec β-CD	Sans β-CD	Avec β-CD	
Laitue	Non pollué	NI	0,017 ± 0,001 b	0,31 ± 0,07 c	0,22 ± 0,06 c	2,09 ± 0,14 e	1,16 ± 0,45 d	3,96 ± 2,89 e	0,0001 ± 0,0001 a
		I	0,011 ± 0,005 b	0,10 ± 0,06 c	0,28 ± 0,05 c	2,44 ± 0,52 e	1,17 ± 0,56 d	1,77 ± 0,15 e	
	Pollué	NI	0,028 ± 0,010 b	0,19 ± 0,08 c	0,29 ± 0,07 c	1,39 ± 0,24 de	0,54 ± 0,09 d	2,49 ± 0,50 e	
		I	0,031 ± 0,010 b	0,15 ± 0,21 bc	0,35 ± 0,02 c	1,90 ± 0,36 e	0,82 ± 0,45 d	2,38 ± 0,54 e	
Ray-grass	Non pollué	NI	0,050 ± 0,014 b'	0,14 ± 0,02 c'	0,25 ± 0,07 c'	1,93 ± 0,33 e'	0,77 ± 0,77 cd'	0,84 ± 0,27 d'	0,0016 ± 0,0006 a'
		I	0,066 ± 0,014 b'	0,19 ± 0,02 c'	0,26 ± 0,04 c'	2,45 ± 0,56 e'	0,66 ± 0,14 d'	3,09 ± 2,2 e'	
	Pollué	NI	0,053 ± 0,010 b'	0,94 ± 0,80 cd'	0,25 ± 0,04 c'	1,41 ± 0,24 de'	0,50 ± 0,04 d'	2,52 ± 1,52 e'	
		I	0,044 ± 0,019 b'	0,84 ± 0,40 cd'	0,27 ± 0,01 c'	1,71 ± 0,59 de'	0,34 ± 0,15 cd'	58,1 ± 74,2 f'	

Les HE issues de la sauge sclarée et de la coriandre présentaient un réel potentiel, antifongique (par contact direct et par volatilité), anti-germinatif et herbicide. L'HE issue des parties aériennes de la coriandre présente une efficacité plus prononcée.

3.7.2. Propriétés biologiques des HE avec un potentiel d'application en santé humaine.

Les activités antioxydantes et anti-inflammatoires ont également été recherchées, en vue d'applications dans le domaine de la santé humaine (Figure 22 & 23).

Les différents résultats obtenus soulignent un effet antioxydant des trois HE, toutefois moins marqué (3 à 10 fois inférieur) que celui du Trolox®, analogue de la vitamine E (témoin positif). Les CI50 obtenues varient entre 0,009 et 0,038 g.L⁻¹. En comparaison avec le Trolox®, les effets antioxydants des HE peuvent être classés comme suit : Trolox® > HE de coriandre parties aériennes > HE de sauge sclarée > HE de coriandre graines.

Par ailleurs, un effet anti-inflammatoire de l'HE issue des parties aériennes de coriandre en particulier a été mis en évidence, diminuant l'intensité de la réponse inflammatoire au sein de la lignée cellulaire bronchiale. En revanche, l'HE de sauge sclarée ou de coriandre graines a produit l'effet inverse, renforçant l'intensité de la réponse inflammatoire. Il est possible qu'un ou plusieurs des composés présents exclusivement au sein des HE de sauge sclarée et de coriandre graines présentent un effet pro-inflammatoire. Toutefois, le limonène, le trans-acétate de géranyle et l'oxyde de caryophyllène, présents au sein de ces deux HE, présentent une activité anti-inflammatoire avérée, de même que le linalol (Chavan et al., 2010; Gonçalves et al., 2012; Yu et al., 2017).

L'étude du potentiel antioxydant et anti-inflammatoire des HE issues de la sauge sclarée et de la coriandre (graines et parties aériennes) a mis en évidence que l'ensemble des HE testées présentent des activités antioxydantes et anti-inflammatoires, avec des effets plus marqués de l'HE issue des parties aériennes de coriandre. Par ailleurs, comme pour les activités liées à la protection des cultures, les activités antioxydantes et anti-inflammatoires des différentes HE testées sont similaires, que les plantes aient été cultivées en conditions polluée ou non et en présence ou non de l'inoculum mycorhizien.

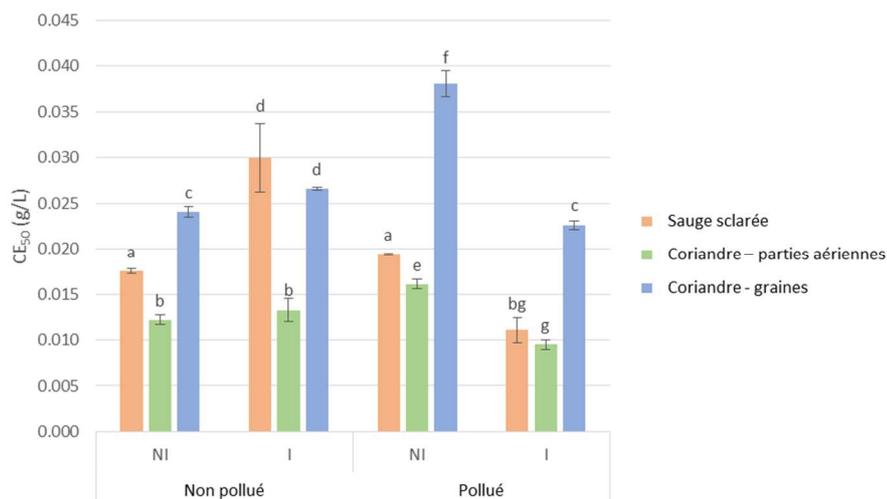


Figure 22 : Valeurs de CE₅₀ (g.L⁻¹) résultant de la capacité de piégeage de radicaux du DPPH. Les valeurs sont des moyennes ± SD (n=3). Les différences significatives entre les conditions expérimentales, en utilisant une comparaison ANOVA à deux facteurs (α = 0,05), sont indiquées par différentes lettres minuscules.

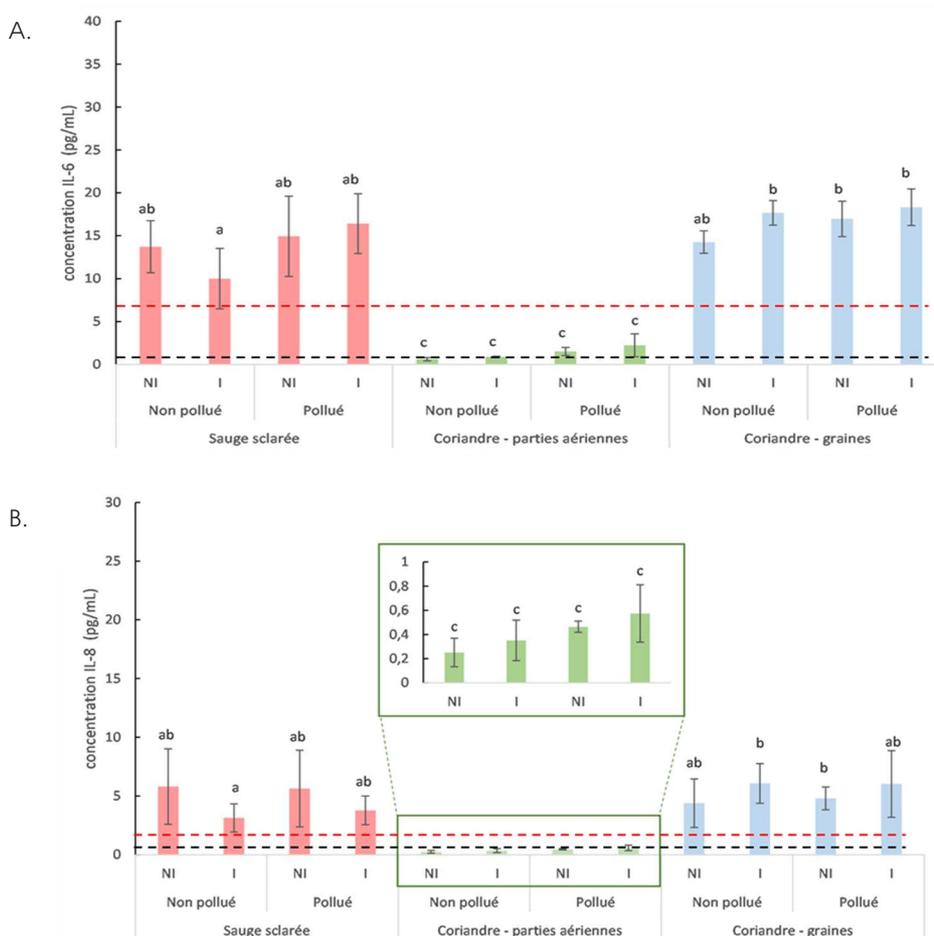


Figure 23 : Niveaux de cytokines dans les cellules BEAS-2B exposées pendant 48 h à des PM_{2.5} en présence d'HE libres ou encapsulées dans la β-CD : (A) Concentrations d'IL-6 dans les cellules BEAS-2B, (B) Concentrations d'IL-8 dans les cellules BEAS-2B. Les valeurs des témoins négatifs et positifs sont représentées respectivement par les pointillés noirs et rouges. Les données sont présentées sous forme de moyenne ± écart-type (n = 3). BEAS-2B : cellules épithéliales bronchiques humaines ; IL-6 : interleukine 6 ; IL-8 : interleukine 8 ; PM_{2.5} : matière particulaire dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 μm. Les différences significatives obtenues par une comparaison ANOVA à deux facteurs (α = 0,05), entre les résultats obtenus en condition libre de β-CD et en présence de β-CD, sont indiquées par différentes lettres minuscules, les différences entre les conditions

expérimentales et le contrôle négatif sont affichées avec une apostrophe ('), tandis que les différences significatives avec le contrôle positif sont affichées avec un astérisque (* - $p < 0,05$).

L'ensemble des HE testées présentent des activités antioxydantes et anti-inflammatoires, avec des effets plus marqués de l'HE issue des parties aériennes de coriandre.

3.7.3. Encapsulation des HE et impact sur les propriétés biologiques des HE

En raison de leur volatilité, la stabilité des HE ainsi que la persistance de leurs effets biologiques au cours du temps sont souvent présentées comme limitées. Pour surmonter ces problèmes, l'encapsulation des HE à l'aide de la β -CD, décrite pour sa capacité à complexer les composés des HE, pourrait ainsi contribuer à réduire les phénomènes de dégradation et de volatilisation des HE, tout en permettant une diffusion progressive. Ces différentes propriétés biologiques ont donc été comparées, en présence et en absence de la β -CD.

Bien que nos résultats aient montré une capacité de rétention importante des HE en présence de la β -CD (Tableau 20), les activités obtenues étaient, dans la majorité des cas, plus faibles lorsque les HE étaient encapsulées (Figures 22-23 & Tableaux 18 & 19). En effet, dans nos conditions expérimentales, au vu de la capacité de rétention de la β -CD, les composés encapsulés des HE étaient probablement moins disponibles. Dans le cadre des tests antifongiques par volatilité notamment, les HE encapsulées étant moins volatiles, l'effet inhibiteur exercé sur le développement du champignon était moindre.

Tableau 20 : Pourcentages de rétention des HE en présence de β -CD. Les valeurs sont exprimées sous forme de moyennes \pm SD (n=3). Les différences significatives ($\alpha = 0,05$) entre les conditions sont indiquées par des lettres différentes (ANOVA à deux facteurs).

		Coriandre partie aérienne	Coriandre graines	Sauge sclarée
Non pollué	NI	74 \pm 1,4 a	73 \pm 1,0 a	63 \pm 7,1 c
	I	72 \pm 1,4 a	74 \pm 2,1 a	63 \pm 5,7 c
Pollué	NI	75 \pm 2,8 a	76 \pm 2,1 a	81 \pm 3,5 b
	I	74 \pm 0,7 a	74 \pm 0,7 a	73 \pm 2,1 a

3.8. Viabilité technico-économique de la filière

L'un des aspects importants pour tout projet de phytomanagement est finalement la réalisation d'une étude de faisabilité technico-économique, prenant en compte les coûts de production (charges d'approvisionnement et opérationnelles, amortissement) et de distillation ainsi que la valeur marchande des HE, dans le cas de la filière PPAM-HE.

Les coûts de production des PPAM ont été estimés sur la base d'une utilisation de matériel agricole et en suivant les préconisations relatives à l'itinéraire technique propre à chaque espèce. Ils sont donc exprimés séparément pour chaque espèce de PPAM et en fonction de l'organe récolté. Il est à noter que les coûts de production étaient similaires entre les parcelles polluées ou non, puisque le matériel utilisé et la méthode de récolte étaient équivalents. Excepté le prix de l'inoculum (170 €/ha), les coûts de production étaient également équivalents entre parcelles inoculées ou non.

Les coûts de production s'élèvent à 706 et 772 €/ha pour la coriandre (parties aériennes et graines respectivement) et à 386 €/ha et par an pour la sauge sclarée, cultivée sur 3 ans. Les coûts de production de cultures agricoles de référence, telles que l'orge d'hiver, le blé ou le colza, sont respectivement de 669, 720 et 761 €/ha (Projet Casdar, 2015). Par conséquent, les coûts de production de ces PPAM et ceux de grandes cultures sont relativement proches (Annexe 7).

Ces coûts de production ont été comparés à ceux affichés dans le cadre d'autres filières de phytomanagement. Wan et al., (2016) décrivent l'utilisation de deux espèces hyperaccumulatrices, *Pteris vittata* et *Sedum alfredii*, en combinaison avec une interculture commerciale (canne à sucre) pour la remédiation d'un sol pollué par les ETM, et affichent un coût opérationnel à hauteur de 10 000 €/ha à l'année, en raison d'intrants très coûteux, nettement supérieur aux coûts de production et de fonctionnement affichés dans notre étude. Une autre étude menée par Włóka et al., (2019) sur des sols pollués par des hydrocarbures aromatiques polycycliques et s'appuyant sur l'utilisation de *Phalaris arundinacea* L. et *Brassica napus* L. pour la biodégradation des hydrocarbures, a indiqué des coûts moyens de 700 €/ha pour la culture et la récolte des deux espèces végétales.

Il est intéressant de noter qu'en raison de la surface de la parcelle agricole polluée (2 ha) et de la pollution superficielle du sol, au niveau des horizons de surface (0-30 cm - Sterckeman et al., 2002), la remédiation du site en utilisant des techniques physico-chimiques représenterait un coût supérieur à 1 000 000 € (plus de 500 000 €/ha). Ces chiffres sont donnés sur la base d'une estimation récente du coût moyen (180 €/m³) des méthodes physico-chimiques de traitement (appliquées aux sols pollués par les ETM, Zhang, 2019) et semblent réhibitores pour ce type de remédiation, au vu de la vaste surface polluée mais également de leurs effets délétères sur la vie microbienne du sol (Burges et al., 2018; Gong et al., 2018). Par conséquent, en comparaison des méthodes conventionnelles de traitements des sols pollués par les ETM, notre étude démontre que l'utilisation des PPAM dans le cadre de la phytostabilisation des ETM offre des perspectives intéressantes en raison d'un coût de mise en œuvre relativement bas.

L'étude de la viabilité économique des trois filières repose sur le coût de distillation des HE, estimé à 300 € par chargement (14 m³ de biomasse à distiller), sur les rendements en HE obtenus dans nos conditions expérimentales (dans certains cas anormalement faibles) et sur le prix de vente des HE affichés en 2020 sachant que le marché des HE est connu pour être particulièrement versatile.

En raison du prix de vente des HE de coriandre (graines ou parties aériennes) relativement faible et inférieur à 100 €/kg d'HE, les marges brutes dégagées pour la filière « coriandre » sont en moyenne de 150 €/ha pour les parties aériennes et négatives pour la coriandre graine (- 450 €/ha en moyenne).

Pour la sauge sclarée, la marge brute dégagée est en moyenne de 1600 €/ha et s'élève jusqu'à 4485 €/ha sur la parcelle polluée par les ET, en raison des rendements élevés en HE obtenus. Si ces résultats obtenus pour la sauge sclarée, en termes de coût de production et de marge brute dégagée notamment, sont comparés au blé, utilisée comme référence agricole, la sauge sclarée affiche une marge brute moyenne inférieure de 20 % à celle du blé (2100 €/ha – Projet Casdar, 2015). Par conséquent, la sauge sclarée, qui présente une marge brute relativement importante apparaît comme un candidat potentiel.

Comme cela a été précédemment suggéré, la perspective d'inclure la culture des PPAM dans un système de rotation culturale, intégrant différentes espèces de PPAM et/ou des intercultures à vocation bioénergétique ou d'engrais verts, pourrait permettre d'abaisser les coûts de gestion de la parcelle et de production, en réduisant par exemple les quantités d'intrants apportées et/ou les interventions techniques, ou en améliorant la rentabilité de la filière. Il pourrait également être envisagé de récolter la sauge sclarée une seconde fois la deuxième année. Grâce à son cycle de développement rapide, il pourrait également être possible de récolter la coriandre deux fois par an, ce qui pourrait augmenter la quantité d'HE produite et la marge brute ainsi dégagée par an.

Il est par ailleurs important de noter qu'au-delà du simple bénéfice économique potentiel, le phytomanagement, en intégrant la démarche de gestion durable du site, contribue également à restaurer la fonction du sol et à assurer des bénéfices écologiques ainsi que sociaux, qui sont certes difficilement monétisables. Mais qu'il est désormais important de prendre en compte (Burges et al., 2018; Cundy et al., 2016).

La sauge sclarée, qui présente une marge brute relativement importante apparaît comme un candidat potentiel.

3.9. Acceptabilité sociale de la filière

3.9.1. Les principaux résultats de l'enquête,

3.9.1.1. Le changement climatique, principale préoccupation environnementale.

Quand on les interroge sur les problèmes environnementaux qu'ils estiment être les plus préoccupants - sans déjà savoir sur quel objet précis porte le questionnaire -, les répondants (Figure 24) placent en tête le réchauffement climatique (70 %), puis la disparition des espèces animales (51 %), puis encore la pollution de l'eau (46 %) et de l'air (37 %). La pollution des sols n'arrive qu'en sixième position : 24 % et seulement 5 % en première position.

Q3. Qu'est-ce qui vous semble le plus préoccupant parmi ces sujets environnementaux ?
(3 choix possibles, ordonnés)

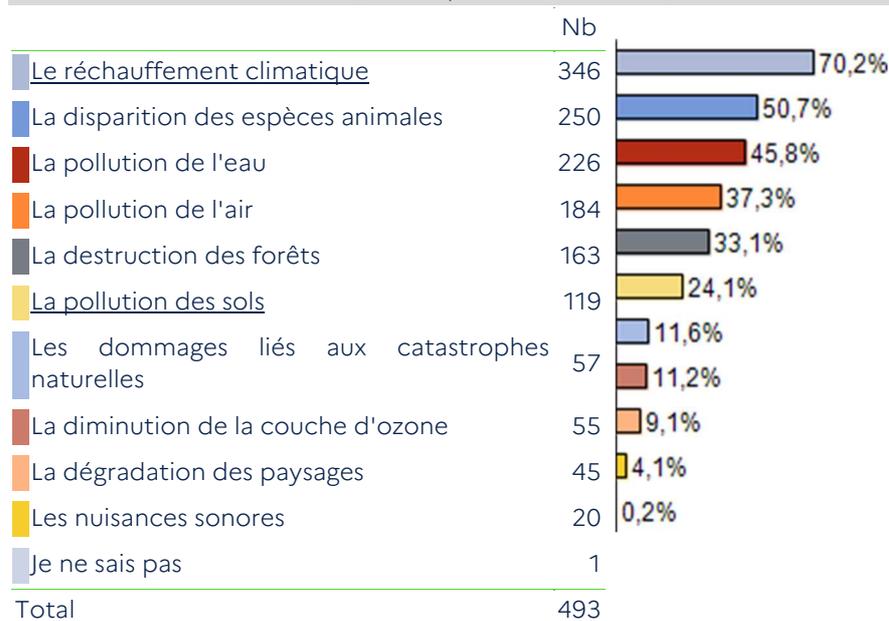


Figure 24 : Hiérarchie des problèmes environnementaux

Interroger sur les domaines de l'action publique à privilégier au sein d'une société permet de mettre en évidence les objectifs collectifs auxquels on attache le plus d'importance. Dans la liste des sept items proposés, les répondants pouvaient en choisir jusqu'à trois, en les ordonnant, et c'est « la préservation de la nature » qui arrive nettement en tête, avec 76 % qui font ce choix, que ce soit en 1^{ère}, 2^{ème} ou 3^{ème} position. Puis viennent la santé avec 67 % et l'égalité et la solidarité avec 62 %. La liberté n'arrive qu'en quatrième position (32 %) et, fait important pour notre objet d'étude, le progrès scientifique n'est choisi que par 15 % des répondants (seules 13 personnes sur 499 le citent en premier).

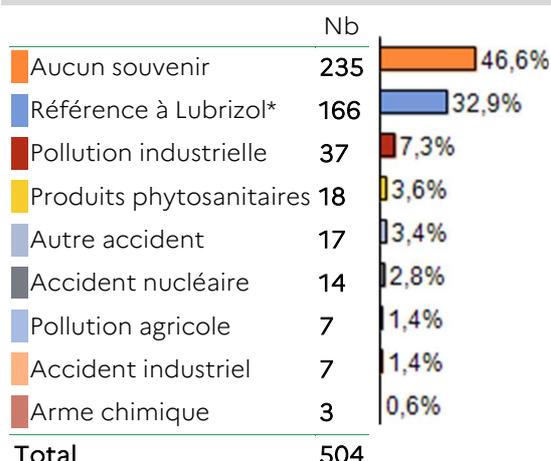
Bien que, comme nous le verrons plus loin, il n'existe pas de véritable rupture de confiance envers la science, ce que le baromètre annuel de l'IRSN (Institut national de radioprotection et de sûreté nucléaire) confirme au niveau national², le progrès scientifique n'est pas vu dans notre enquête comme une cause importante.

3.9.1.2. Des souvenirs flous à propos de l'accident « Lubrizol » et des pollutions des sols en général.

Bien que l'enquête PhytEO ait débuté peu de temps après l'incendie de l'usine Lubrizol (26 septembre 2019), seul environ un tiers des enquêtés l'évoque lorsqu'ils sont sollicités pour donner un souvenir d'accident récent ayant entraîné une pollution de sols, notamment agricoles. Par ailleurs, seuls 15 % évoquent d'autres types d'accidents industriels et 5 % des pollutions agricoles sans lien avec Lubrizol (dont 3,6 % par des produits phytosanitaires). Ils sont en fait près de la moitié (47 %) à être incapables de citer le moindre événement de pollution des sols (Figure 25).

² L'enquête annuelle de l'IRSN établit, qu'en 2019, 45 % des Français déclarent avoir une « bonne opinion » des experts scientifiques et 16 % une « très bonne opinion » ; le chiffre global est en hausse de 10% par rapport à 2017 (IRSN, 2020, p.16). Il est probable que la crise de coronavirus ne soit pas sans incidence sur ces chiffres, ce que nous dira le prochain baromètre de l'IRSN.

Q21. Avez-vous le souvenir d'un évènement récent qui a entraîné une pollution des sols et notamment de terres agricoles ?



* : Nom « Lubrizol » cité ou évènement évoqué sans dire le nom

Figure 25 : Souvenirs de pollutions de sols.

Cela confirme que les souvenirs portant sur les catastrophes et accidents industriels ont tendance, si ce n'est à s'effacer rapidement des esprits, du moins à y laisser des traces plutôt confuses. Lors d'une enquête réalisée en 2006 dans une commune entourée de trois sites Seveso seuil haut, seule une petite moitié des 158 personnes sollicitées pour donner le nom d'un accident industriel récent a parlé de la catastrophe d'AZF Toulouse. Encore étaient-ils nombreux, pour cette catastrophe médiatisée et récente, à se montrer imprécis sur plusieurs éléments : lieu exact du sinistre, nombre de morts, type d'usine ayant explosé, *etc*, (Flanquart et al., 2006).

3.9.1.3. Une plus grande sensibilité pour les produits en contact direct avec le corps

Dans sa progression en entonnoir, le questionnaire abordait ensuite la plus ou moins grande acceptabilité de l'utilisation de différents types de produits issus de cultures effectuées sur terres polluées. Mais avant de poser les différentes questions relatives à ce thème, l'enquêtrice précisait que cela permettait « une reconversion des sols plus facile et moins chère que la dépollution... »

Les répondants devaient alors, entre autres questions, dire s'ils seraient favorables à certaines utilisations pour les végétaux cultivés sur des terres polluées (Q12).

Les réponses à la question 12 montrent que les usages les mieux acceptés pour les végétaux issus de sols pollués sont ceux qui n'impliquent pas directement le corps humain (Figure 26) : produire des matériaux de construction (54 %), se chauffer (54 %) et se déplacer (53 %). Puis viennent les usages où le corps est certes en jeu, mais pour être ni nourri, ni lavé, ni soigné : produire des vêtements (habillement : 48 %) ou des moquettes, des coussins, *etc*, (aménagement du logement : 35 %).

Les usages les moins bien acceptés sont ceux qui impliquent l'ingestion de ces produits végétaux ou leur mise en contact intime avec le corps. Les usages à destination des animaux et des plantes souffrent d'une réticence assez semblable bien que moindre de la part des répondants.

La « loi » de l'acceptabilité pour ces produits semble donc être la suivante : plus on s'éloigne du corps humain, plus le niveau de l'acceptabilité s'élève, plus on s'en rapproche, plus il baisse. Cette loi semble fonctionner mais à un degré moindre avec d'autres entités vivantes proches : animaux domestiques et plantes d'intérieur.

Notons que près d'une personne sur cinq (18,5%) se déclare hostile à toute utilisation de produits issus de sols pollués ; bien que minoritaire, cette hostilité systématique paraît bien ancrée et n'est donc pas à négliger.

Q12. Seriez-vous favorable à ce que l'on cultive, dans ces conditions, des végétaux pour :

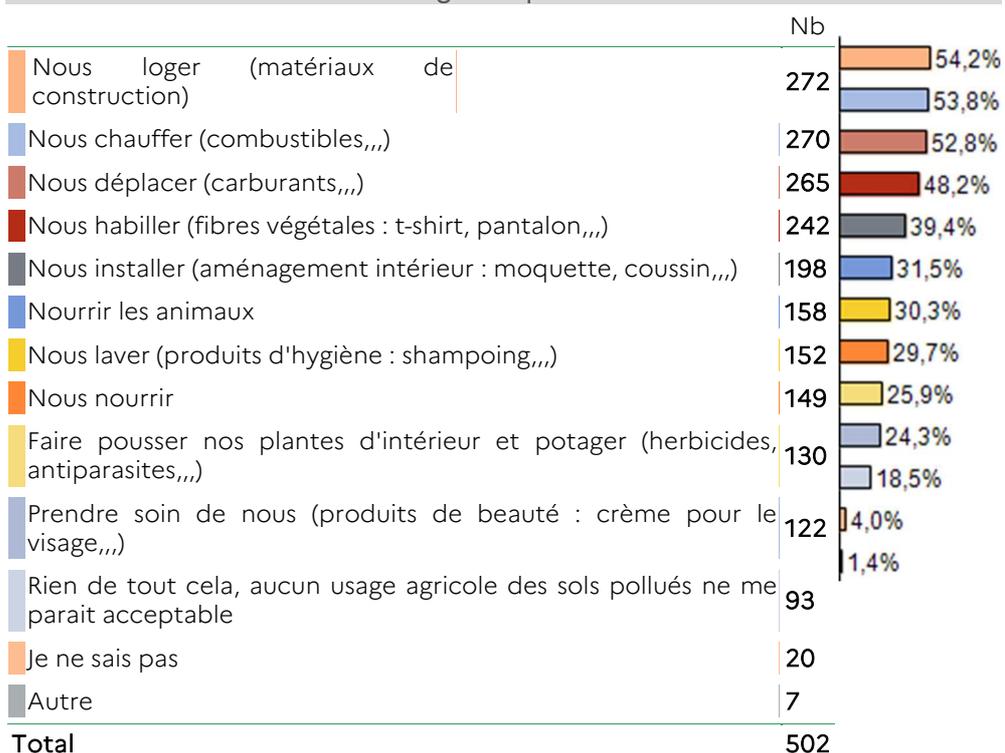


Figure 26 : Les usages acceptables pour les végétaux issus de sols pollués.

Tableau 21 : Attention aux composants des produits selon leur type et usage.

Q10. Quand vous achetez les produits suivants, vous-vous renseignez en regardant l'étiquette ou en utilisant une application pour en connaître la composition ?

	Oui, toujours	Oui, souvent	Non, rarement	Non, jamais	Je n'en achète jamais	total
Produits alimentaires	42 %	39 %	12 %	7 %	0 %	100 %
	81 %		19 %			
Produits hygiène et beauté	41 %	36 %	14 %	9 %	0 %	100 %
	77 %		23 %			
Produits pour plantes	27 %	15 %	11 %	16 %	31 %	100 %
	42 %		27 %			
Produits d'habillement	18 %	26 %	34 %	22 %	0 %	100 %
	44 %		56 %			
Aménagement	10 %	15 %	35 %	30 %	10 %	100 %
	25 %		65 %			
Total	28 %	26 %	21 %	17 %	8 %	100 %
	54 %		38 %			

Cet accroissement de la défiance quand le corps est en jeu est confirmé par les réponses à la question sur la lecture de l'étiquette ou la consultation d'une application lors de l'achat de toute une série de produits (Question 10). La fréquence de ces pratiques visant à écarter de l'achat ce qui peut apparaître

dangereux varie en effet en fonction du type de produits, et ceux qui pénètrent dans le corps (par la bouche ou les pores de la peau) ou qui sont en contact direct avec lui sont les plus surveillés : l'alimentation (81 %) et les produits d'hygiène et de beauté (77 %) (Tableau 21). Arrivent ensuite, à égalité, l'habillement et les produits destinés au traitement des plantes (43 %). Les articles relevant de l'aménagement, du fait de leur contact plus distant au corps sont, à tort ou à raison, moins surveillés.

3.9.1.4. L'acceptabilité des produits non alimentaires en provenance de sols pollués

Le questionnaire, construit avec l'hypothèse que ce serait l'utilisation des sols pollués pour l'alimentation humaine qui occasionnerait le plus fort refus, se poursuivait ensuite en écartant cet usage. Les questions portaient sur d'autres utilisations, pour lesquelles l'hypothèse était que l'acceptabilité serait plus grande.

Précision méthodologique :
 Avant de poser les questions 18, 19 et 20, l'enquêtrice donnait la précision suivante :
 « Du fait de l'urbanisation et de la construction de routes, parkings, bâtiments..., la France perd en surface agricole l'équivalent d'un département de taille moyenne tous les 7 ans, Par ailleurs on prévoit une augmentation de plus de 12 millions d'habitants en France d'ici 2060... »,
 Puis elle posait la question 18 :
 « En prenant en compte ces informations, pensez-vous que cultiver les sols pollués, est une solution d'avenir pour fabriquer des produits non alimentaires ? », avec les réponses possibles suivante :

Oui, certainement Oui, probablement
 Non, probablement pas Non, certainement pas

Q18. Pensez-vous que cultiver les sols pollués est une solution d'avenir pour fabriquer des produits non alimentaires ?

Taux de réponse : **95,6%**

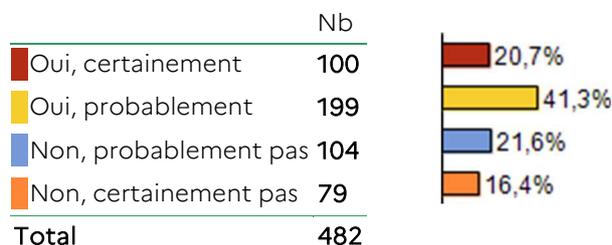


Figure 27 : Acceptabilité des produits alimentaires issus de sols pollués.

Les réponses à cette question 18 ont été l'objet, lors de l'analyse, de tris croisés. L'objectif était de détecter une éventuelle dépendance entre d'une part les caractéristiques de certains groupes de répondants et d'autre part l'acceptabilité de l'utilisation de sols pollués pour la production de produits non alimentaires. Et, contrairement à ce à quoi on aurait pu s'attendre, le fait que certains enquêtés votent pour les partis écologistes ou manifestent pour défendre l'environnement n'a pas d'incidence. En revanche, la classe d'âge et le niveau de diplôme ont une influence sensible sur le degré d'acceptabilité.

Ce sont les plus âgés qui se montrent les plus hostiles à la production de produits non alimentaires sur sols pollués : alors que ceux refusent cet usage sont 30 % chez les 18-25 ans et les 35-44 ans (34 % chez les 45-54 ans), ils sont 42 % chez 65 ans et plus, et même 57 % – et donc majoritaires – chez les 65 ans et plus. L'âge semble donc un facteur freinant l'acceptabilité (Tableau 22).

Pour ce qui est du lien entre le niveau d'éducation et l'acceptabilité des pratiques culturelles évoquées dans la question 18, on constate que c'est chez les plus diplômés (souvent aussi les plus jeunes dans notre échantillon) que l'on trouve la vision la plus optimiste des choses : les deux tiers des « bac +3 » pensent que l'utilisation des sols dégradés peut être une solution d'avenir pour produire des végétaux non destinés à l'alimentation. Chez les titulaires d'un CAP ou BEP, l'adhésion à l'idée est moins forte : 53 % ont cette opinion. Et les « bac +2 » les accompagnent dans ce moindre optimisme (48 %).

Tableau 22 : Acceptabilité selon la classe d'âge des produits non alimentaires issus de sols pollués.

	18-24 ans		25-34 ans		35-44 ans		45-54 ans		55-64 ans		65 ans et plus		Total	
Non, certainement pas	12 %	30 %	10 %	30 %	13 %	34 %	16 %	36 %	35 %	57 %	25 %	42 %	16 %	38 %
Non, probablement pas	18 %		20 %		21 %		30 %		23 %		17 %		22 %	
Oui, probablement	43 %	70 %	50 %	70 %	43 %	65 %	41 %	54 %	25 %	42 %	41 %	58 %	41 %	62 %
Oui, certainement	27 %		20 %		22 %		13 %		17 %		17 %		21 %	
Total	100 %		100 %		100 %		100 %		100 %		100 %		100 %	

Khi² très significatif

3.9.1.5. Zoom sur l'utilisation des HE dans les produits d'hygiène et de beauté

Le questionnaire poursuivait ensuite « en entonnoir » et abordait un usage non alimentaire plus précis : les produits d'hygiène et de beauté intégrant des composants issus de sols dégradés. Parce qu'ils sont en contact direct avec le corps lors de leur utilisation, nous avons fait l'hypothèse d'une plus grande réticence des consommateurs. L'analyse des réponses a montré que nous avons vu juste (voir *supra*), même si – comme nous l'avions aussi prévu – la réticence est moindre que pour les aliments. La question 14 s'intéressait alors aux substances issues de sols pollués qui pouvaient être intégrées sans trop de problèmes dans les produits d'hygiène et de beauté. En plaçant les HE au milieu d'autres composants (dont certains plus ou moins imaginaires), il s'agissait de voir si elles suscitaient une acceptabilité plutôt meilleure ou au contraire moindre (Figure 28).

Dans la liste présentée, les répondants pouvaient choisir jusqu'à quatre composants acceptables ; ils pouvaient aussi en prendre moins ou refuser tout produit issu de sols pollués pour les cosmétiques.

Q14. Quels sont les composants issus de ces végétaux qu'il vous paraîtrait envisageable d'utiliser pour des produits d'hygiène et de beauté,

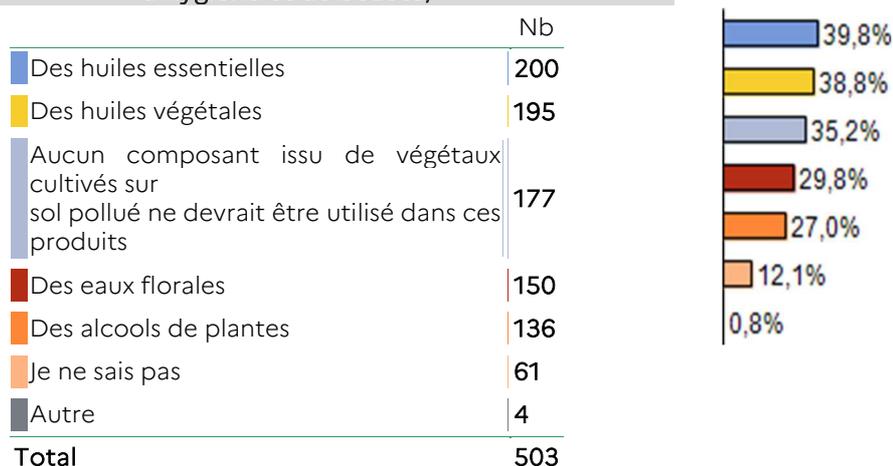


Figure 28 : Acceptabilité de différents composants issus de sols pollués pour les produits d'hygiène et beauté.

Les composants bénéficiant d'un accueil moins négatif qu'attendu³ sont les HE et les huiles végétales : 40% et 39% des répondants envisagent leur utilisation dans la fabrication de produits d'hygiène et de beauté. Suivent les eaux florales, avec 30%. Remarquons néanmoins qu'un bon tiers estime qu'« aucun composant issu de végétaux cultivés sur sol pollué ne devrait être utilisé dans ces produits ».

Nous avons aussi testé l'acceptabilité qu'auraient des produits phytosanitaires ayant des intrants issus de cultures sur sols pollués. Elle se révèle importante, puisqu'elle est de 78 % pour leur utilisation dans le cadre domestique (plantes d'intérieur et potager) et 85% pour leur utilisation par dans les champs.

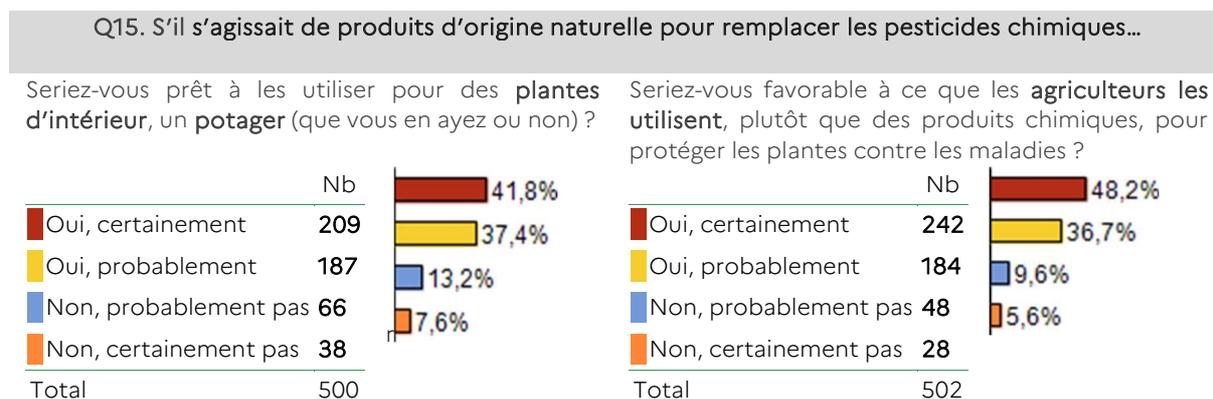


Figure 29 : Acceptabilité de l'utilisation de produits « naturels » issus de sols pollués pour traiter les plantes.

Pour mieux comprendre la source de l'opposition à l'utilisation de tels produits par les agriculteurs (Figure 29), la minorité de personnes hostiles (environ une sur 6 ou 7), devait expliciter son refus (question ouverte). Sur 76 personnes, 30 n'ont pas répondu et les 46 restantes l'ont fait⁴ en parlant de leur doute sur l'innocuité des produits utilisés (16), leur attachement au principe de précaution (7, la nécessité de promouvoir plutôt une agriculture alternative (7), la crainte pour la santé (5), etc.

3.9.1.6. Acceptabilité et confiance

L'acceptabilité de nouvelles techniques, nouvelles substances, nouveaux matériaux est en partie tributaire de qui - individu ou structure - communique sur la question et de la fiabilité attribuée à son discours. L'échantillon a donc été questionné sur la foi accordée aux informations données par différents acteurs : industriels, scientifiques, associations de consommateurs, organismes d'Etat chargés du contrôle et médias.

Lorsque l'on examine le tableau 23, on constate que la fiabilité des informations sur les produits manufacturés, les répondants ont d'abord confiance aux associations spécialisées (91 % ; modalités « oui, certainement » et « oui, plutôt » à égalité), puis aux scientifiques (87 %). Viennent ensuite les organismes d'Etat (64 %, mais 17 % seulement pour « oui, certainement »). Les médias sont déconsidérés (60 % de défiance, 30 % de confiance) et les industriels globalement rejetés (86 % de défiance, 10 % de confiance). Dans d'autres contextes, pour des risques territoriaux (comme la présence d'un site Seveso, d'un cours d'eau sujet à débordement, etc.), on a pu montrer (Le Blanc et al., 2017) que la confiance de ceux qui y sont soumis envers ceux qui les gèrent est influencée par trois facteurs : la proximité géographique et culturelle des gestionnaires, leur compétence supposée et la pureté, elle aussi supposée, de leurs intentions. La confiance aux gestionnaires du risque augmente si : (i) ils sont géographiquement et culturellement proches ; (ii) il leur est prêté une haute compétence ; (iii) ils ne sont pas soupçonnables d'avoir des intérêts plus pressants que la sécurité.

³ Ici seuls 35% se disent hostiles à l'utilisation de n'importe quel composant issu de sol pollué pour fabriquer des produits d'hygiène et cosmétiques, dans la question n°12 (Fig.7), ils étaient plus de 70% à ne pas avoir dit leur accord. Notons néanmoins que ne pas donner son accord et refuser sont deux choses un peu différentes, comme le sont aussi ne pas refuser et accepter.

⁴ La question étant ouverte, les réponses ont été formulées avec des mots différents mais ont été recodées a posteriori en quelques grandes catégories regroupant des idées proches.

Ici, il est probable que ce soit le troisième facteur qui fasse défaut aux industriels et engendre la défiance : ils sont souvent soupçonnés de faire passer le maintien de leur production et la recherche de profit avant le respect de l'environnement et la sécurité des riverains.

Tableau 23 : Raisons évoquées pour le refus du traitement des plantes avec des produits « naturels » issus de sols pollués.

Q11. Faites-vous confiance aux acteurs suivants lorsqu'ils vous donnent des informations sur les produits industriels que vous achetez ?

	Oui, certainement	Oui, plutôt	Non, plutôt pas	Non, certainement pas	Je ne sais pas
Associations	46 %	45 %	6 %	2 %	2 %
	91 %				
Scientifiques	36 %	51 %	7 %	2 %	3 %
	87 %				
Organismes d'Etat	17 %	47 %	21 %	11 %	4 %
	64 %				
Médias	3 %	33 %	39 %	21 %	4 %
			60 %		
Industriels	1 %	9 %	37 %	49 %	4 %
	10 %		86 %		
Total	21 %	37 %	22 %	17 %	3 %
	58 %		39 %		

Aussi, même si dans le cas de PhytEO il ne s'agit pas de risques « territoriaux », du moins pour le consommateur final, il existe chez lui une nette défiance envers les industriels. Qui a certainement beaucoup à voir avec des suspicions sur leurs véritables intentions. Quoi qu'ils affirment, ils sont soupçonnés de faire passer leurs intérêts économiques avant la sécurité de leurs produits, pour consommateurs comme pour l'environnement.

3.9.1.7. Cultures sur sols pollués, une opportunité économique ?

La question Q20 avait pour ambition de mesurer l'acceptabilité en lien avec les variables économiques. Il s'agissait de mesurer le degré d'acceptabilité des cultures sur sols pollués quand on met en avant que cette pratique peut offrir débouchés économique et emplois. La grande majorité des 494 personnes qui ont répondu à la question et donné un nom au sentiment qu'ils éprouveraient si on leur disait « que cultiver les sols pollués peut créer des débouchés économiques et des opportunités d'emploi » a pioché parmi les réponses proposées : indécis, inquiet, enthousiaste, en colère ; néanmoins une minorité a utilisé la modalité « autre » pour mieux exprimer son sentiment : pas convaincu, sceptique, curieux, *etc* (Figure 30).

Lorsque l'on regroupe les différentes opinions selon les trois grandes catégories de « positif » (enthousiaste, curieux, intéressé), « hésitant » (indécis, pas convaincu, sceptique, dubitatif) et « hostile » (inquiet, en colère, en état d'incompréhension, vigilant, triste) (Tableau 24), on constate que c'est cette dernière qui domine, ((près de quatre personnes sur dix). Puis viennent les hésitants (36 %) et enfin les convaincus (25 %).

Par ailleurs, la méthode du tri croisé met en évidence les facteurs sociodémographiques et d'opinion qui ont une influence sur les réponses. Et si elles varient peu selon que les répondants votent ou pas pour un parti écologiste et participent ou pas à des manifestations de défense de l'environnement – comme on aurait peut-être pu s'y attendre –, elles sont en revanche sensibles à l'appartenance à l'un des trois sous-échantillons et à l'une des six classes d'âge.

Ainsi, ce sont ceux que nous avons classés, du fait de leur mode de recrutement pour la passation du questionnaire, parmi les « environnementalistes » qui se montrent les plus hostiles (12 points de plus que

chez les étudiants de Master) et les moins positifs (17 points de moins que les étudiants et 8 que les salariés du secteur public) (Tableau 24).

Q20. Que ressentez-vous si l'on vous explique que cultiver les sols pollués peut créer des débouchés économiques et des opportunités d'emploi ? Vous êtes :

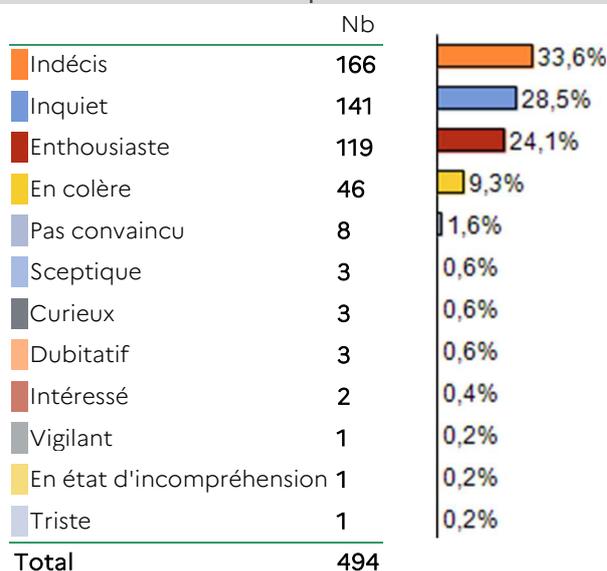


Figure 30 : Sentiment face à l'idée que cultiver des sols pollués peut être une opportunité économique.

Tableau 24 : Grandes catégories de sentiment face à l'idée que cultiver des sols pollués peut être une opportunité économique, en fonction de l'appartenance aux 3 sous-échantillons.

Attitude		Environnementalistes adhérents ou sympathisants	Salariés du secteur public	Etudiants de master	Total
Hostiles	inquiets + en colère + en état d'incompréhension + vigilant + triste	45 %	37 %	33 %	38 %
Hésitants	indécis + pas convaincus + sceptiques + dubitatifs	38 %	38 %	33 %	36 %
Positifs	enthousiastes + curieux + intéressés	17 %	25 %	34 %	25 %
Total		100 %	100 %	100 %	100 %

Khi² significatif

Pour ce qui est de l'âge, l'hostilité s'accroît (et l'attitude positive diminue) au fur et à mesure que l'âge s'élève. Si les 18-24 ans sont 31 % et les 25-34 ans 26 % à être hostile à la suggestion, les 65 ans et plus le sont à 60 % (les 55-64 ans le sont déjà à 54 %). Parallèlement, si dans les deux classes d'âge les plus jeunes une personne sur trois a une réaction positive, le chiffre tombe à une personne sur vingt chez les soixante-cinq ans et plus, et environ une personne sur dix pour les 55-64 ans.

3.9.2. Approfondir la question de l'acceptabilité à l'aide d'une Analyse des correspondances multiples (ACM)

Pour poursuivre l'exploitation du matériau recueilli par le questionnaire, nous avons réalisé une analyse des correspondances multiples (ACM) avec 26 variables actives issues de plusieurs questions portant sur l'acceptabilité sociale de la culture sur sols pollués et de l'utilisation de produits qui en sont issus⁵ (Figure 31).

D'autres variables sont portées sur les graphiques, mais uniquement de manière illustrative : Q13, Q14, Q15, Q16, Q17.

Le premier axe F1 est largement prédominant, avec 13 % d'inertie. L'axe F2 en représente de son côté environ 7% et porte sur les personnes sans avis (ou dont l'avis est manquant). Il présente peu d'intérêt pour notre présente étude et sera laissé de côté. Les axes suivants ont des pourcentages d'inertie négligeables et ne seront donc pas non plus étudiés ici.

L'axe F1 met clairement en évidence un gradient d'acceptabilité globale de l'utilisation des sols pollués pour les cultures. Sur sa partie gauche se concentre l'essentiel des réponses positives à des projets d'utilisation de sols pollués, alors qu'en progressant vers la droite on trouve des opinions d'abord hésitantes puis hostiles.

A la gauche de l'axe, on trouve une bonne acceptation de l'utilisation de produits issus de cultures sur sols pollués, et ce même s'ils sont destinés aux soins corporels. Ce dernier point est important, puisque, comme vu plus haut, c'est un des deux usages qui déclenchent le plus de scepticisme voire de résistance. A droite apparaissent les opinions des personnes méfiantes, qui ont tendance à refuser l'utilisation des sols pollués pour quelque usage que ce soit. Par ailleurs, leur foi dans les scientifiques ou élus communaux est faible, alors que ces deux acteurs bénéficient en général d'une très bonne ou plutôt bonne confiance pour cultiver les sols pollués (respectivement 85 % et 42 %).

Les variables supplémentaires (qui s'ajoutent au graphique sans le construire) viennent confirmer cette opposition entre pôle gauche et pôle droit : près du premier l'accord pour l'utilisation d'alcools, HE et autres substances issues de sols pollués, près du second le refus.

Par ailleurs, quand on examine plus finement les choses dans les tableaux qui accompagnent l'ACM, on constate que chez les plus jeunes, ceux âgés de 18 à 24 ans et souvent étudiants de Master, le fait d'être favorable à l'écologie (ils votent souvent et toujours pour des candidats écologistes) est largement associé au fait d'être favorable à la culture sur sols pollués et à l'utilisation relativement large des produits qui en sont issus. Néanmoins, cette dépendance entre les deux positions ne concerne pas toute la classe d'âge des 18-24 ans, puisque pour une minorité de celle-ci, le vote écologique est au contraire associé à une hostilité à ce type de projet.

Notons que le phénomène est de même nature mais de manière moins prononcée pour la catégorie suivante des 25-34 ans.

Chez les 55-64 ans – assez souvent proches des idées écologistes dans notre échantillon –, c'est le contraire : être favorable à l'écologie et voter pour les candidats s'en revendiquant est associé à une hostilité à l'utilisation de sols pollués. Et cette association est encore plus fréquente que celle, inverse, des catégories les plus jeunes. Pour la catégorie des plus âgés – les 65 ans et plus –, aucune tendance ne se dessine dans un sens ou dans l'autre. Une partie adopte la même position que la majorité des 18-24 ans (favorable à la culture sur sols pollués même quand elle vote pour des candidats écologistes), une autre partie est proche de la position des 55-64 ans (défavorable à cette pratique quand elle adhère à l'écologie par les urnes).

Dans le second graphique tiré de l'ACM et l'interprétation de son axe F1, apparaissent les propos spontanés émis en marge des questions posées ; ces verbatim ont été notés dans l'instant par l'enquêtrice. Au moment du traitement des données, ils ont été parfois raccourcis pour tenir en entier dans les étiquettes projetées sur le graphique. Seuls les verbatim très bien représentés sur l'axe F1 sont repris ; ils permettent ainsi de conforter ou d'enrichir la compréhension du plan factoriel.

⁵ Les Q12 (pistes de productions sur sols pollués), Q18 (cultures sur sols pollués pour produits non alimentaires), Q19 (confiance envers les gestionnaires du risque) et Q20 (émotion ressentie face à des projets de culture sur sols pollués).

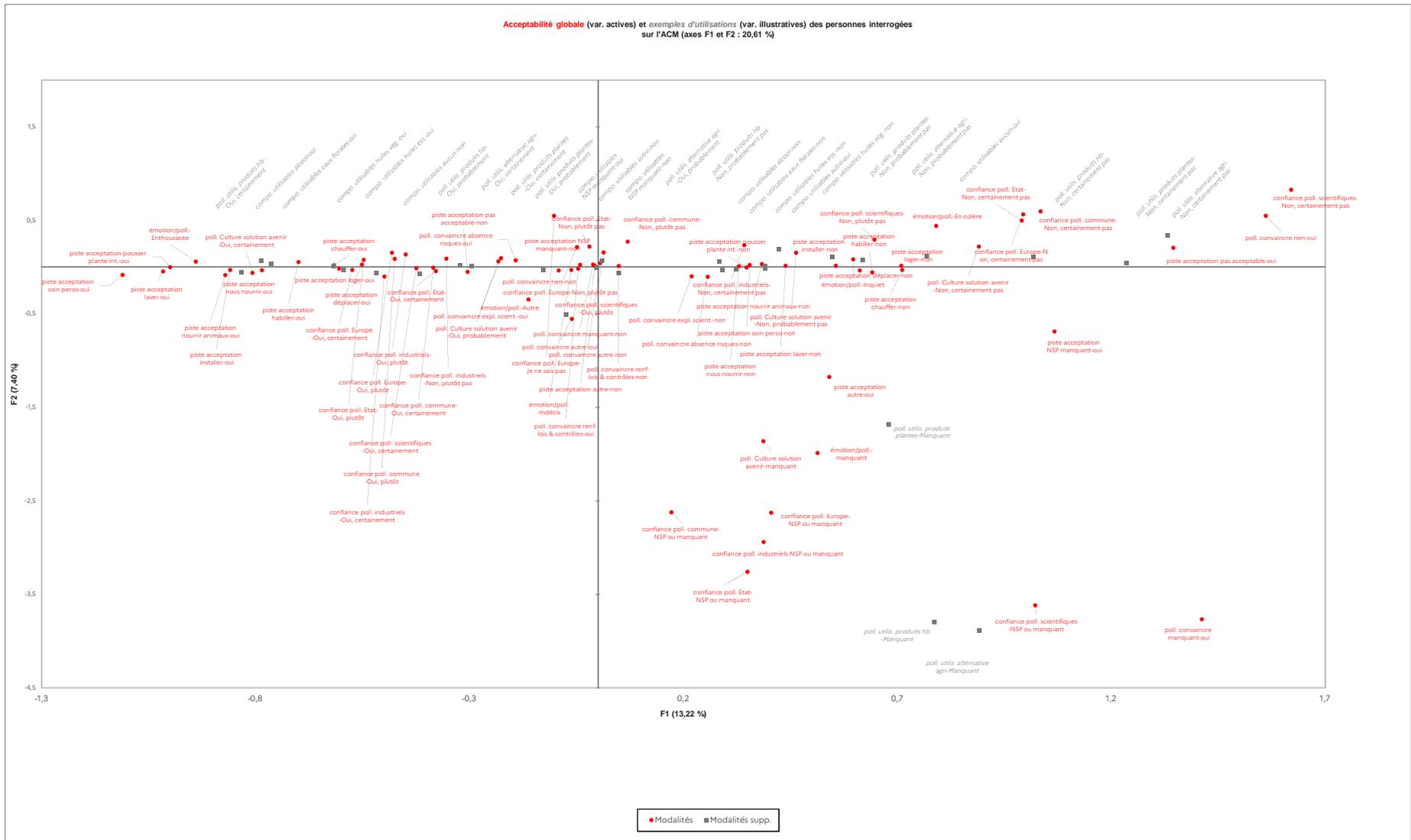


Figure 31 : Représentation des variables actives et illustratives sur le premier plan factoriel.

3.9.3. Conclusion

L'enquête sociologique auprès des trois sous-échantillons de consommateurs potentiels de produits incluant des substances issues de cultures sur sols pollués permet d'établir, avec un degré de certitude variable, plusieurs éléments à propos de l'acceptabilité.

D'abord, on n'a pas constaté de refus massif de ces substances, de leur utilisation des produits non alimentaires ; leur usage est envisagé sans trop de craintes. En revanche des réticences plus marquées existent pour les produits entrant en contact direct avec le corps (cosmétiques, produits d'hygiène). Dans les deux cas, l'acceptabilité des HE par rapport à celle d'autres substances issues de cultures sur sols pollués est plus grande.

L'enquête montre aussi qu'une minorité est hostile à tout usage de substances issues de sols dégradés. Plutôt plus âgée et moins diplômée que la moyenne de l'échantillon, cette minorité n'envisage pas une nouvelle utilisation de ces sols sans dépollution préalable. Dans cette minorité, l'âge est un facteur plus actif que l'engagement environnementaliste (vote écologique, participation à de manifestations environnementales). Ces « opposants » expriment aussi une plus grande défiance envers les potentiels acteurs de la réutilisation de ces sols et de la transformation des matières premières qui en seraient issues. Ainsi l'enquête confirme que cacher les choses aux futurs consommateurs finaux (voir 2.7.2), serait prendre un risque certain. Si l'opposition est minoritaire, il y a en son sein des personnes dont le refus est très affirmé, et donc susceptibles de dénoncer l'utilisation d'HE produites sur sols pollués et rétives à admettre que la pollution des sols ne passe pas dans ces HE. Se sentant investies d'une mission de lanceur d'alerte, elles pourraient alors être actives sur les réseaux sociaux et autres médias, numériques ou pas.

Pour ce qui est de la communication envers le public des résultats de projets tels PhytEO, il est évident qu'elle ne peut passer uniquement par les industriels bénéficiant d'une faible confiance chez les consommateurs. Ils sont en effet facilement soupçonnés de dissimuler ce qui les gêne pour préserver leur production et leurs profits. Les associations de consommateurs sont plus indiquées pour communiquer, puisque non soupçonnées d'autre but que la sécurité des consommateurs et la préservation de l'environnement. Notons que si le monde de la science, malgré son bon score, inspire un peu moins confiance que les associations, c'est probablement que certains le soupçonnent d'être parfois sous influence des industriels, grands pourvoyeurs de crédits de recherche.

Il semble *in fine* que l'acceptabilité serait moins problématique, l'appropriation de la remise en culture de sols dégradés meilleure si tous les acteurs, des industriels aux consommateurs en passant par le monde associatif, les organismes de contrôle de l'Etat et bien sûr les scientifiques échangeaient très en amont sur leurs expériences. Au contraire, une information tardive pourrait renforcer une méfiance déjà présente chez la minorité la plus hostile à ce type de projet. Elle lui donnerait l'impression qu'« on lui cache quelque chose », qu'on privilégie l'objectif économique à la sécurité des consommateurs.

4. Recommandations

Le retour d'expérience sur le projet PhytEO a permis de montrer la faisabilité technico-économique et la pertinence de la culture de PPAM dans le cadre du phytomanagement des sols historiquement pollués par les ETM à des fins de production d'HE à activités biologiques. Les huiles essentielles issues de la distillation de la phytomasse produite sur ces sols pollués présentent une qualité satisfaisante aussi bien en termes d'activités biologiques qu'en terme de présence d'ETM et de pesticides (traces) avec des applications potentielles dans les domaines de la protection des plantes et de la santé humaine. Afin de répliquer ce mode de gestion sur d'autres territoires, il est nécessaire de :

- Caractériser le site pollué avant tout projet de phytomanagement : nature, niveau de pollution et hétérogénéité de la pollution dans la parcelle concernée et caractères pédo-agronomiques et biologiques du sol
- Bien choisir les PPAM à cultiver en se basant sur de nombreux critères (adaptation aux conditions pédo-climatiques, disponibilité et coût des semences, valeur marchande de l'HE produite, cycle de végétation, tolérance et comportement exclure vis-à-vis des ETM...) et des filières de valorisation des HE (filières non alimentaires de préférence)
- Travailler en collaboration avec un producteur d'HE situé à proximité du site pollué en établissant un contrat avec lui (achat de la biomasse ou prestation de service)
- Maitriser les itinéraires techniques de la culture des PPAM (dates de semis et de récolte, intrants, mode de récolte...). Un rapprochement avec un institut technique ou une chambre d'agriculture est conseillé

- Suivre régulièrement les cultures
- Bien coordonner les actions entre les agriculteurs, le producteur d'HE et les scientifiques
- Procéder rapidement à la distillation des HE après récolte (délai très court entre la récolte et la distillation pour cause de biomasse non stockable)
- Prévoir l'analyse des HE afin de vérifier leur qualité (composition, teneurs en ETM et en résidus de pesticides)
- Définir la filière de valorisation des résidus de distillation en fonction de leur niveau de contamination en ETM (épandage, compostage, fourrage...)
- Etablir un bilan socio-économique et environnemental de la filière (c-à-d qu'au-delà de la rentabilité économique de la filière, il faudra intégrer les bénéfices non monétisables comme la restauration écologique des sols pollués dans le bilan final).

Le projet PhytEO a apporté des réponses aux questionnements quant à la faisabilité et à l'intérêt de la filière de phytomanagement PPAM/HE sur des sols fortement pollués par des ETM. Des démonstrateurs ont été mis en place pour promouvoir ce mode de gestion. Le soutien de l'ADEME a été précieux pour lancer et alimenter les réflexions de cette filière éco-innovante. Cependant, le développement de cette filière de phytomanagement dans le territoire des HdF et à l'échelle nationale dépend de la volonté politique. Une profonde réflexion est à mener en associant la profession agricole, les collectivités locales et régionales en vue de dégager les orientations et les conditions à mettre en place pour accompagner cette mutation. Sans cet accompagnement, ces filières de phytomanagement risquent de disparaître sous l'emprise des contraintes... L'avenir des filières de phytomanagement nécessite un engagement affirmé des instances locales et régionales, la définition d'une stratégie à moyen terme et une aide pour accompagner la mutation tant sur le plan économique que scientifique.

5. Conclusion / Perspectives

Les travaux réalisés dans le cadre du projet PhytEO avaient pour principale ambition de développer une filière éco-innovante de valorisation non alimentaire de biomasse produite sur les sols agricoles du site atelier de Metaleurop, pollués par des ETM. En s'appuyant sur des démonstrateurs *in situ* à l'échelle de l'hectare, ce projet avait pour vocation d'évaluer, en intégrant les aspects techniques, environnementaux et socio-économiques, l'intérêt d'un mode de gestion combinant la phytostabilisation aidée par des PPAM et la production d'HE dans un contexte de phytomanagement des sols historiquement pollués par des ETM. Les résultats obtenus (synthésés dans le Tableau 25), permettent de dresser un bilan sur le potentiel de la sauge sclarée et de la coriandre pour un usage en phytomanagement d'un sol pollué par les ETM. La coriandre ainsi que la sauge sclarée ont toutes deux montré une bonne capacité à germer, à lever, à se développer et à produire une quantité importante de biomasse sur des sols pollués par les ETM, soulignant l'aptitude de ces deux PPAM à tolérer les concentrations en ETM 6 à 17 fois supérieures au fond géochimique des sols agricoles régionaux.

Bien que l'ajout d'un amendement biologique à base de CMA ait permis d'augmenter de façon significative les taux de mycorhization des racines de coriandre et de sauge sclarée, aucun gain n'a été observé ni au niveau de la croissance de ces deux PPAM, ni au niveau de la quantité et de la qualité des HE. En sa présence, la concentration dans les inflorescences de sauge a été réduite tout comme la mobilité du Cd dans le sol associé.

D'autre part, les HE distillées à partir de la biomasse de sauge sclarée (inflorescences) ou de coriandre (parties aériennes ou graines) produite sur sols pollués présentent une qualité caractérisée par la présence d'ETM à l'état de traces ou en résidus de pesticides (traces), compatible avec un usage non alimentaire. Leurs compositions chimiques sont conformes à celles décrites dans la littérature et mettent en évidence divers principes actifs linalol, acétate de linalyle et germacrène (sauge sclarée), linalol, α -pinène et γ -terpinène (graines de coriandre) et 2-décénal, linalol, décanal et 2-dodécénal (parties aériennes de coriandre). La pollution du sol par les ETM et l'inoculation mycorhizienne n'ont pas modifié la composition des HE produites.

De nombreuses propriétés biologiques potentiellement valorisables dans des domaines à vocation non-alimentaire, tels que la protection des cultures (effets fongistatiques, anti-germinatifs et herbicides) ou la santé humaine (effets anti-inflammatoires et antioxydants) ont été mises en évidence pour l'ensemble des HE obtenues lors de ce travail. L'HE issue des parties aériennes de coriandre montre des activités biologiques, plus marquées, souvent équivalentes à certains produits phytosanitaires commerciaux et

antioxydants de référence. En revanche, en dépit de son fort pouvoir complexant des HE, la β -CD utilisée pour éviter la dégradation des HE et en améliorer les effets biologiques, n'a montré aucun effet positif sur les propriétés testées dans nos conditions expérimentales.

De plus, l'étude technico-économique réalisée dans ce travail a révélé un seuil de rentabilité assez faible au vu du coût de production et du faible prix de vente de l'HE de coriandre. Dans le cadre de la reconversion des sols pollués par les ETM sur le site Metaleurop, cette espèce végétale apporte donc de faibles garanties économiques aux agriculteurs, notamment en comparaison à des cultures de référence telles que le blé dont l'itinéraire technique est bien connu. De plus, cette espèce accumule le Cd dans ces parties aériennes ce qui n'a pas permis de trouver une voie de valorisation pour les résidus de distillation. La sauge sclarée, quant à elle, semble être un candidat plus prometteur pour la phytostabilisation aidée et la valorisation de la biomasse produite dans le cadre du phytomanagement de sols pollués par les ETM, et pourrait être envisagée comme filière de reconversion pour les agriculteurs. En effet, nos travaux ont montré que la valeur ajoutée de la sauge sclarée résidait notamment dans la bonne marge brute dégagée, grâce à des coûts de production relativement faible expliqués en partie par le caractère pérenne de cette espèce végétale et des rendements élevés en HE qui possède une valeur marchande satisfaisante.

En raison des faibles taux de germination de l'angélique et d'épisodes de sécheresse récurrents, les résultats concernant cette dernière n'ont pu être exploités dans le cadre de cette thèse. De par son caractère pérenne et un marché porteur pour la commercialisation de l'HE, cette PPAM semble toutefois prometteuse et sera évaluée dans le cadre du projet DEPHYTOP.

PERSPECTIVES

Ainsi, en s'appuyant sur les dispositifs expérimentaux *in situ* déjà existants (une parcelle de 2 ha, plusieurs microparcelles de 9 m² avec différentes modalités d'amendements) et de nouvelles expérimentations en microparcelles et en microcosmes au laboratoire dans des conditions contrôlées, le projet PhytEO va se poursuivre dans le cadre du projet DEPHYTOP. Ce dernier a pour objectif, outre la pérennisation de ces démonstrateurs, de proposer dans le respect des principes de l'économie circulaire, une optimisation de la filière PPAM/HE par :

1. L'amélioration des rendements de biomasse et du processus de phytostabilisation en testant des amendements minéraux et organiques (utilisation de sous-produits issus de certaines activités locales comme les laitiers sidérurgiques, le compost ou des digestats de méthanisation),
2. L'étude des adaptations aux changements climatiques des PPAM, notamment en poursuivant notre travail sur l'angélique et la coriandre et en menant des expériences au laboratoire dans des conditions de déficit hydrique ainsi qu'une réflexion sur le choix des itinéraires techniques qui pourrait permettre de limiter l'impact de épisodes de sécheresse,
3. L'étude de la valorisation des HE et d'autres extraits de la biomasse végétale dans le domaine de la bioprotection des plantes,
4. L'étude du cadre réglementaire de la qualité des HE,
5. L'exploration de différentes voies de valorisation des résidus de distillation (méthanisation, compostage, combustion).
6. L'étude de la résilience écologique des sols pollués et la structuration de cette filière dans le projet de territoire de l'ancien bassin minier de Metaleurop grâce à la consolidation de notre bilan socio-économique en évaluant et en intégrant les bénéfices environnementaux et les services écosystémiques rendus par la filière PPAM/HE
7. L'étude de l'acceptabilité de la filière HE auprès des agriculteurs.
8. L'évaluation des risques sanitaires liés à la filière PPAM/HE
9. L'élaboration d'un arbre d'aide à la décision.

Ce projet a pour ambition de fournir *in fine* des recommandations aux différents acteurs de la filière en vue de son développement dans le bassin de Metaleurop mais également dans d'autres territoires. Il serait intéressant de répliquer cette expérimentation sur d'autres sites pollués (par les ETM ou d'autres polluants), agricoles ou non.

Tableau 25 : Synthèse des résultats obtenus.

	Sauge sclérée <i>Salvia sclarea</i> L.	Coriandre <i>Coriandrum sativum</i> L.		
		Parties aériennes 	Graines 	
Germination des graines	+	+		
Taux de levée <i>in situ</i>	+	+		
Croissance des PPAM	+	+		
Production de biomasse	+	+		
Rendement en HE	Elevé	Moyen	Faible	
Qualité des HE produites	Contamination par les ET	Traces		
	Contamination par les résidus de pesticides	Traces		
	Composition chimique des HE	Acétate de linalyle (51-63 %), linalol (10-17 %), germacrène D (7-17 %)	2-decenal (38-51 %), linalol (22-39 %), décaneal (7-8 %) and 2-dodécénal (3-6 %)	Linalol (75-83 %), γ -terpinène (6-9 %), α -pinène (3-5 %)
		Non affectée ni par les ET, ni par l'inoculation mycorhizienne		
	Propriétés biologiques - Protection des cultures (antifongiques, anti-germinatives, herbicides) - Santé humaine (anti-inflammatoires, anti-oxydantes)	+	++	+
Capacité de phytostabilisation	Phytostabilisation	Réduction de la mobilité du Zn dans le sol (tendance)	Pas d'effet de la plante sur la mobilité des ET (sol)	
	Phytostabilisation aidée par l'inoculum mycorhizien	Mobilité réduite du Pb	Pas d'effet sur la mobilité des ET	
	Comportement des PPAM vis-à-vis des ET	« Excluer » pour le Cd, Pb et Zn BCF << 1	Accumulateur pour le Cd – BCF > 1 Accumulation moindre de Cd et de Pb dans les graines par comparaison aux parties aériennes	
	Effet de l'inoculation sur le transfert des ET	Transfert réduit de Cd et de Pb dans les parties aériennes	Pas d'effet sur le transfert	
	Contamination des résidus de distillation par les ET	Traces	Traces de Pb et Zn – teneurs relativement élevées en Cd	
Faisabilité technico-économique	++	+	-	
Acceptabilité sociale	+	+	+	

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abarca, R.L., Rodríguez, F.J., Guarda, A., Galotto, M.J., and Bruna, J.E. (2016). Characterization of beta-cyclodextrin inclusion complexes containing an essential oil component. *Food Chem.* 196, 968–975.
- Abu-Darwish, M. S., & Abu-Dieyeh, Z.H. (2009). Essential oil content and heavy metals composition of *Thymus vulgaris* cultivated in various climatic regions of Jordan. *Int. J. Agr. Biol.* 11, 59-63.
- Aćimović, M., Kiprović, B., Rat, M., Sikora, V., Popović, V., Koren, A., and Brdar-Jokanović, M. (2018). *Salvia sclarea*: Chemical composition and biological activity. *J. Agron. Technol. Eng. Manag.* 1, 18–28.

- André L, Zdanevitch I, Pineau C, Lencauchez J, Damiano A, Pauss A, Ribeiro T (2019) Dry anaerobic co-digestion of roadside grass and cattle manure at a 60 L batch pilot scale. *Bioresource Technology* 289 , 121737.
- Affholder M.-C. (2013). Approche des mécanismes de tolérance du romarin aux éléments traces métalliques et métalloïdes : perspectives pour une phytostabilisation des sols méditerranéens pollués, Thèse, 325 p.
- Allied Market Research. Available online: <https://www.alliedmarketresearch.com/essential-oils-market/> accessed on 15th March 2020.
- Angelova, V.R., Grekov, D.F., Kisyov, V.K., and Ivanov, K.I. (2015). Potential of Lavender (*Lavandula vera* L.) for Phytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals. *Int. J. Biol. Food, Vet. Agric. Eng.* 9, 465–472.
- Angelova, V.R., Ivanova, R., Todorov, G.M., and Ivanov, K.I. (2016). Potential of *Salvia sclarea* L. for Phytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals.
- Badri, A., Stefani, F.O.P., Lachance, G., Roy-Arcand, L., Beaudet, D., Vialle, A., Hijri, M., (2016). Molecular diagnostic toolkit for *Rhizophagus irregularis* isolate DAOM-197198 using quantitative PCR assay targeting the mitochondrial genome. *Mycorrhiza* 26, 721–733.
- Bandoni, A.L., Mizrahi, I., and Juárez, M.A. (1998). Composition and quality of the essential oil of coriander (*coriandrum sativum* L.) from Argentina. *J. Essent. Oil Res.* 10, 581–584.
- Bessah, R., & Benyoussef, E. H. (2015). La filière des huiles essentielles Etat de l'art, impacts et enjeux socioéconomiques. *Revue des Energies Renouvelables*, 18(3), 513-528.
- Bhuiyan, M.N.I., Begum, J., Sultana, M., (2009). Chemical composition of leaf and seed essential oil of *Coriandrum sativum* L. from Bangladesh. *Bangladesh J. Pharmacol.* 4, 150–153.
- Bicaïs, M. (2007). Imaginaire de la fonctionnalité, de l'acceptabilité sociale à l'émergence du projet technicien, thèse de doctorat, sous la direction de Barbara Michel, université Pierre Mendès France, Grenoble.
- Bidar, G., Garçon, G., Pruvot, C., Dewaele, D., Cazier, F., Douay, F., and Shirali, P. (2007). Behavior of *Trifolium repens* and *Lolium perenne* growing in a heavy metal contaminated field: Plant metal concentration and phytotoxicity. *Environmental Pollution* 147, 546–553.
- Biswas, S., Koul, M., and Bhatnagar, A. K. (2011). Effect of salt, drought and metal stress on essential oil yield and quality in plants. *Natural Product Communications*, 6(10), 1934578X1100601036.
- Bonnier, G., and Layens, G. de (1986). Flore complète portative de la France et de la Suisse et de la Belgique, eds Belin, Paris, France.
- Braun-Blanquet, J. (1928). Zur Kenntnis der Vegetationsverhältnisse des Grossen Atlas.
- Bünemann, E. K., Schwenke, G. D., and Van Zwieten, L. (2006). Impact of agricultural inputs on soil organisms—a review. *Soil Research*, 44(4), 379-406.
- Burgess A, (2006). « Téléphones portables et stations-service, Rumeur, risque et précaution », *Diogenes*, 2006/1 n° 213, pp, 153-173.
- Burges, A., Alkorta, I., Epelde, L., and Garbisu, C. (2018). From phytoremediation of soil contaminants to phytomanagement of ecosystem services in metal contaminated sites. *Int. J. Phytoremediation* 20, 384–397.
- Burt, S. (2004). Essential Oils: Their Antibacterial Properties and Potential Applications in Foods– A Review', *International Journal of Food Microbiology*, 94, 223 – 253.
- Carrubba, A., La Torre, R., Piccaglia, R., and Marotti, M. (2002). Characterization of an Italian biotype of clary sage (*Salvia sclarea* L.) grown in a semi-arid Mediterranean environment. *Flavour Fragr. J.* 17, 191–194.
- Chateil, C., Goldringer, I., Tarallo, L., Kerbiriou, C., Le Viol, I., Ponge, J.-F., Salmon, S., Gachet, S., and Porcher, E. (2013). Crop genetic diversity benefits farmland biodiversity in cultivated fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 171, 25–32.
- Chavan, M.J., Wakte, P.S., and Shinde, D.B. (2010). Analgesic and anti-inflammatory activity of Caryophyllene oxide from *Annona squamosa* L. bark. *Phytomedicine* 17, 149-151.
- Chutia, M., Bhuyan, P. D., Pathak, M. G., Sarma, T. C., and Boruah, P. (2009). Antifungal activity and chemical composition of *Citrus reticulata* Blanco essential oil against phytopathogens from North East India. *LWT-Food Science and Technology*, 42(3), 777-780.
- Cundy, A.B., Bardos, R.P., Puschenreiter, M., Mench, M., Bert, V., Friesl-Hanl, W., Müller, I., Li, X.N., Weyens, N., Witters, N., et al. (2016). Brownfields to green fields: Realising wider benefits from practical contaminant phytomanagement strategies. *J. Environ. Manage.* 184, 67–77.
- Daget, P., & Poissonet, J. (1971). Une méthode d'analyse phytologique des prairies. In *Annales agronomiques*.

- Danh, L. T., Truong, P., Mammucari, R., and Foster, N. (2011). Effect of calcium on growth performance and essential oil of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) grown on lead contaminated soils. *International journal of phytoremediation*, 13(sup1), 154-165.
- Dazy, M., Jung, V., Féraud, J.-F., and Masfarau, J.-F. (2008). Ecological recovery of vegetation on a coke-factory soil: Role of plant antioxidant enzymes and possible implications in site restoration. *Chemosphere* 74, 57–63.
- Del Val, C., Barea, J. M., & Azcon-Aguilar, C. (1999). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungus populations in heavy-metal-contaminated soils. *Applied and environmental microbiology*, 65(2), 718-723.
- Denoroy, P., Dubrulle, P., Villette, C., and Colomb, B. (2004). REGIFERT, interpréter les résultats des analyses de terre (Paris, France: INRA Editions).
- Dergham, M., Lepers, C., Verdin, A., Billet, S., Cazier, F., Courcot, D., & Garçon, G. (2012). Prooxidant and proinflammatory potency of air pollution particulate matter (PM_{2.5-0.3}) produced in rural, urban, or industrial surroundings in human bronchial epithelial cells (BEAS-2B). *Chemical research in toxicology*, 25(4), 904-919.
- Douay, F., Pelfrène, A., Planque, J., Fourrier, H., Richard, A., Roussel, H., and Girondelot, B. (2013). Assessment of potential health risk for inhabitants living near a former lead smelter. Part 1: Metal concentrations in soils, agricultural crops, and homegrown vegetables. *Environ. Monit. Assess.* 185, 3665–3680.
- Fédoroff, É., Ponge, J.-F., Dubs, F., Fernández-González, F., and Lavelle, P. (2005). Small-scale response of plant species to land-use intensification. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 105, 283–290.
- Firmin, S., Labidi, S., Fontaine, J., Laruelle, F., Tisserant, B., Nsanganwimana, F. & Shirali, P. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungal inoculation protects *Miscanthus x giganteus* against trace element toxicity in a highly metal-contaminated site. *Science of the Total Environment*, 527, 91-99.
- Fischetti, F.Jr. (2010). Flavoring Materials, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.
- Flanquart, H., Hellequin, A.-P., et Vallet P. (2006). Un village bien tranquille. Vivre à Mardyck, à proximité d'usines Seveso, rapport à la DDE du Nord.
- Flanquart, H. (2016). Des risques et des hommes, Paris, Presses Universitaires de France.
- Freires, I.D.A., Murata, R.M., Furletti, V.F., Sartoratto, A., De Alencar, S.M., Figueira, G.M., Rodrigues, J.A.D.O., Duarte, M.C.T., Rosalen, P.L., 2014. *Coriandrum sativum* L. (Coriander) essential oil: Antifungal activity and mode of action on *Candida* spp., and molecular targets affected in human whole-genome expression. *PLoS One* 9.
- Gerdemann, J. W., & Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological society*, 46(2), 235-244.
- Golubkina, N., Logvinenko, L., Novitsky, M., Zamana, S., Sokolov, S., Molchanova, A., Shevchuk, O., Sekara, A., Tallarita, A., Caruso, G., (2020). Yield, essential oil and quality performances of *artemisia dracunculoides*, *hyssopus officinalis* and *lavandula angustifolia* as affected by arbuscular mycorrhizal fungi under organic management. *Plants* 9.
- Göhre, V., & Paszkowski, U. (2006). Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. *Planta*, 223(6), 1115-1122.
- Gonçalves, M.J., Cruz, M.T., Tavares, A.C., Cavaleiro, C., Lopes, M.C., Canhoto, J., and Salgueiro, L. (2012). Composition and biological activity of the essential oil from *Thapsia minor*, a new source of geranyl acetate. *Ind. Crops Prod.*
- Hajiboland, R., and Manafi, M.H. (2007). Flora of heavy metal-rich soils in NW Iran and some potential hyper-accumulator and accumulator species. *Acta Bot. Croat.* 66, 177–195.
- Hernández, A. J., & Pastor Piñeiro, J. (2008). Validated approaches to restoring the health of ecosystems affected by soil pollution.
- IRSN, 2020, Baromètre IRSN 2020 : La perception des risques et de la sécurité par les Français, https://www.irsn.fr/FR/IRSN/Publications/barometre/Documents/IRSN_Barometre_2020-analyse.
- Janoušková, M., Krak, K., Vosátka, M., Püschel, D., and Štorchová, H. (2017). Inoculation effects on root-colonizing arbuscular mycorrhizal fungal communities spread beyond directly inoculated plants. *PLoS One* 12, 1–21.
- Jeannin, T., Yung, L., Evon, P., Labonne, L., Ouagne, P., Lecourt, M., & Placet, V. (2020). Native stinging nettle (*Urtica dioica* L.) growing spontaneously under short rotation coppice for phytomanagement of trace element contaminated soils: Fibre yield, processability and quality. *Industrial Crops and Products*, 145, 111997.
- Joly, P.-B. (2003). « Les OGM en débat, Vers de nouveaux modes de gouvernance de l'innovation et des risques », *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, vol, 10, numéro 3, pp, 216-224.

- Kapoor, R., Giri, B., Mukerji, K.G., (2002). Mycorrhization of coriander (*Coriandrum sativum* L) to enhance the concentration and quality of essential oil. J. Sci. Food Agric.
- Kent, C., et Lane, L. (2009). « L'art de faire avaler la pilule, Enquête sur l'acceptabilité sociale », Revue Z, n°1
- Kfoury, M., Auezova, L., Greige-Gerges, H., and Fourmentin, S. (2015). Promising applications of cyclodextrins in food: Improvement of essential oils retention, controlled release and antiradical activity. Carbohydr. Polym. 131, 264–272.
- Kfoury, M., Hădărugă, N.G., Hădărugă, D.I., and Fourmentin, S. (2016). Cyclodextrins as encapsulation material for flavors and aroma. In encapsulation.
- Kfoury, M., Auezova, L., Greige-Gerges, H., and Fourmentin, S. (2019). Encapsulation in cyclodextrins to widen the applications of essential oils. Environ. Chem. Lett. 17, 129–143.
- Khajanchi, L., Yadava, R. K., Kaurb, R., Bundelaa, D. S., Khana, M. I., Chaudharya, M., Meenaa, R. L., Dara, S. R., Singha, G. (2013). Productivity, essential oil yield, and heavy metal accumulation in lemon grass (*Cymbopogon flexuosus*) under varied wastewater–groundwater irrigation regimes Ind. Crop. Prod., 45, 270– 278.
- Khaosaad, T., Vierheilig, H., Nell, M., Zitterl-Eglseer, K., and Novak, J. (2006). Arbuscular mycorrhiza alter the concentration of essential oils in oregano (*Origanum* sp., Lamiaceae). Mycorrhiza 16, 443–446.
- Koptsik, S., Koptsik, G., Livantsova, S., Eruslankina, L., Zhmelkova, T., and Vologdina, Zh. (2003). Heavy metals in soils near the nickel smelter: chemistry, spatial variation, and impacts on plant diversity. J. Environ. Monitor. 5, 441.
- Kostić, M., Kitić, D., Petrović, M.B., Jevtović-Stoimenov, T., Jović, M., Petrović, A., and Živanović, S. (2017). Anti-inflammatory effect of the *Salvia sclarea* L. ethanolic extract on lipopolysaccharide-induced periodontitis in rats. J. Ethnopharmacol. 199, 52–59.
- Kratky L, Jirout T (2015) Biomass size reduction machines for enhancing biogas production. Chem. Eng. Technol. 34 : 391–399.
- Kumar, R., Sharma, S., and Pathania, V. (2013). Effect of shading and plant density on growth, yield and oil composition of clary sage (*Salvia sclarea* L.) in north western Himalaya. J. Essent. Oil Res. 25, 23–32.
- Kuzma, Ł., Kalemba, D., Rózalski, M., Rózalska, B., Marzena, W.S., Krajewska, U., and Wysokinska, H. (2009). Chemical composition and biological activities of essential oil from *salvia sclarea* plants regenerated in vitro. Molecules 14, 1438–1447.
- Lal, K., Minhas, P. S., Chaturvedi, R. K., & Yadav, R. K. (2008). ExtrTâche of cadmium and tolerance of three annual cut flowers on Cd-contaminated soils. Bioresource technology, 99(5), 1006-1011.
- Le Blanc, A., Flanquart, H., et Méha, C. (2017). « Chapitre 5 – De la mémoire des accidents industriels à la confiance dans les acteurs de la gestion de ces risques », in Frère, S., et Flanquart, H. 2017, *La ville et ses risques. Habiter Dunkerque*, éd. du Septentrion, pp.111-128.
- Lee, E.H., Eo, J.K., Ka, K.H., and Eom, A.H. (2013). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and their roles in ecosystems. Mycobiology 41, 121–125.
- Leung, H. M., Zhen-Wen, Wang, Zhi-Hong, Y. E., Kin-Lam, Yung, Xiao-Ling, Peng, & Cheung, K. C. (2013). Interactions between arbuscular mycorrhizae and plants in phytoremediation of metal-contaminated soils: a review. Pedosphere, 23(5), 549-563.
- Lubbe, A., & Verpoorte, R. (2011). Cultivation of medicinal and aromatic plants for specialty industrial materials. Industrial Crops and Products, 34(1), 785-801.
- Madejón, P., Burgos, P., Cabrera, F., & Madejón, E. (2009). Phytostabilization of amended soils polluted with trace elements using the Mediterranean shrub: *Rosmarinus officinalis*. International journal of phytoremediation, 11(6), 542-557.
- Margalef R. 1958. Information theory in ecology. General Systems 3: 36–71.
- Masarovičová, E., Kráľová, K., and Kummerová, M. (2010). Principles of classification of medicinal plants as hyperaccumulators or excluders. Acta Physiol Plant 32, 823–829.
- Matasyoh, J.C., Maiyo, Z.C., Ngure, R.M., Chepkorir, R., (2009). Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil of *Coriandrum sativum*. Food Chem. 113, 526–529.
- Mench, M.J., Dellise, M., Bes, C.M., Marchand, L., Kolbas, A., Coustumer, P. Le, and Oustrière, N. (2018). Phytomanagement and remediation of cu-contaminated soils by high yielding crops at a former wood preservation site: Sunflower biomass and ionome. Front. Ecol. Evol. 6.
- Menhinick, E.F., (1964). A comparison of some species-individuals diversity indices applied to samples of field insects. Ecology 45, 859–861. doi:10.2307/1934933.
- Oehl, F., Sieverding, E., Mäder, P., Dubois, D., Ineichen, K., Boller, T., and Wiemken, A. (2004). Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. Oecologia 138, 574–583.

- Oudart, D. (2013). Modélisation de la stabilisation de la matière organique et des émissions gazeuses au cours du compostage d'effluents d'élevage (Doctoral dissertation).
- Pandey, J., Verma, R.K., and Singh, S. (2019). Suitability of aromatic plants for phytoremediation of heavy metal contaminated areas: a review. *Int. J. Phytoremediation* 21, 405–418.
- Park, J., Yoon, J. hyun, Depuydt, S., Oh, J.W., Jo, Y. min, Kim, K., Brown, M.T., Han, T. (2016). The sensitivity of an hydroponic lettuce root elongation bioassay to metals, phenol and wastewaters. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 126, 147–153.
- Parra, A., Zornoza, R., Conesa, E., Gómez-López, M. D., & Faz, A. (2014). Seedling emergence, growth and trace elements tolerance and accumulation by Lamiaceae species in a mine soil. *Chemosphere*, 113, 132-140.
- Paul, A.L., Daugherty, C.J., Bihn, E.A., Chapman, D.K., Norwood, K.L.L., Ferl, R.J., (2001). Transgene expression patterns indicate that spaceflight affects stress signal perception and transduction in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 126, 613–621.
- Phillips, J. M., Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British mycological Society*, 55(1), 158-161.
- Pitarokili, D., Couladis, M., Petsikos-Panayotarou, N., Tzakou, O., (2002). Composition and antifungal activity on soil-borne pathogens of the essential oil of *Salvia sclarea* from Greece. *J. Agric. Food Chem.* 50, 6688–6691.
- Priyadarshi, S., and Borse, B.B. (2014). Effect of the Environment on Content and Composition of Essential oil in Coriander.
- Quarré, F. (2018). Essential Oils and Pesticides: How to face the future with EFEO. In IFEAT Conference, Cartagena, Colombia, 9-13th September 2018.
- Raufflet, E. (2014). De l'acceptabilité sociale au développement local résilient, Vol, 14, Number 2, September 2014.
- Raveau, R., Fontaine, J., & Lounès-Hadj Sahraoui, A. (2020). Essential Oils as Potential Alternative Biocontrol Products against Plant Pathogens and Weeds: A Review. *Foods*, 9(3), 365.
- Renaut, S., Daoud, R., Masse, J., Vialle, A., & Hijri, M. (2020). Inoculation with *Rhizophagus irregularis* does not alter arbuscular mycorrhizal fungal community structure within the roots of corn, wheat, and soybean crops. *Microorganisms*, 8(1), 83.
- Rónyai, E., Simándi, B., Veress, T., Lemberkovics, É., & Patiaka, D. (1999). Comparison Between the Essential Oil and Supercritical Carbon Dioxide Extract of *Salvia fruticosa* Mill. *Journal of Essential Oil Research*, 11(4), 499-502.
- Sahmer, K., Deweer, C., Santorufo, L., Louvel, B., Douay, F., (2015). Utilisation d'une régression non linéaire pour des applications microbiologiques 1–35.
- Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., & Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710-721.
- Satyal, P., Setzer, W.N., (2020). Chemical Compositions of Commercial Essential Oils From *Coriandrum sativum* Fruits and Aerial Parts. *Nat. Prod. Commun.* 15.
- Shah, V., & Daverey, A. (2020). Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 100774.
- Shannon C.E. & Weaver W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana, Illinois, pp. 1–117.
- Sharopov, F.S., & Setzer, W.N. (2012). The essential oil of *salvia sclarea* L. from Tajikistan. *Rec. Nat. Prod.* 6, 75–79.
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163(4148), 688-688.
- Singh, V., & Garg, A. N. (2006). Availability of essential trace elements in Indian cereals, vegetables and spices using INAA and the contribution of spices to daily dietary intake. *Food chemistry*, 94(1), 81-89.
- Smallfield, B. M., Perry, N. B., Beauregard, D. A., Foster, L. M., & Dodds, K. G. (1994). Effects of postharvest treatments on yield and composition of coriander herb oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42(2), 354-359.
- Smith, S., and Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*.
- Sterckeman, T., Douay, F., Proix, N., Fourrier, H., Perdrix, E., Labidi, S., Fontaine, J., Laruelle, F., Tisserant, B., Dalpé, Y. (2002). Assessment of the contamination of cultivated soils by eighteen trace elements around smelters in the north of France. *Appl. Soil Ecol.* 85, 173–194.
- Sterckeman, T., Douay, F., Fourrier, H., & Proix, N. (2002). Référentiel pédo-géochimique du Nord-Pas de Calais. Conseil Régional du Nord-Pas de Calais.

- Tascone, O., Roy, C., Filippi, J.-J., and Meierhenrich, U.J. (2014). Use, analysis, and regulation of pesticides in natural extracts, essential oils, concretes, and absolutes. *Anal Bioanal Chem* 406, 971–980.
- Tilston, E.L., Sizmur, T., Dixon, G.R., Otten, W., and Harris, J.A. (2010). The Impact of Land-Use Practices on Soil Microbes. In *Soil Microbiology and Sustainable Crop Production*, G.R. Dixon, and E.L. Tilston, eds. (Dordrecht: Springer Netherlands), pp. 273–295.
- Triolo JM, Pedersen L, Qu H, Sommer SG (2012) Biochemical methane potential and anaerobic biodegradability of non-herbaceous and herbaceous phytomass in biogas production. *Bioresource Technology* 125: 226-232.
- Triolo JM, Sommer SG, Møller HB, Weisbjerg MR, Jiang XY (2011) A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresource Technology* 102(20): 9395-9402.
- Turek, C. & Stintzing, F. C. (2013). Stability of essential oils: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(1), 40-53.
- Vangronsveld, J., Colpaert, J. V., and Van Tichelen, K.K. (1996). Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: Physico-chemical and biological evaluation of the durability of soil treatment and revegetation. *Environ. Pollut.* 94, 131–140.
- Verma, S. K., Singh, K., Gupta, A. K., Pandey, V. C., Trivedi, P., Verma, R. K., & Patra, D. D. (2014). Aromatic grasses for phytomanagement of coal fly ash hazards. *Ecological Engineering*, 73, 425-428.
- Wan, X., Lei, M., and Chen, T. (2016). Cost–benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 563, 796-802.
- Włóka, D., Placek, A., Smol, M., Rorat, A., Hutchison, D., and Kacprzak, M. (2019). The efficiency and economic aspects of phytoremediation technology using *Phalaris arundinacea* L. and *Brassica napus* L. combined with compost and nano SiO₂ fertilization for the removal of PAH's from soil. *Journal of environmental management*, 234, 311-319.
- Yang, Y., Song, Y., Scheller, H. V., Ghosh, A., Ban, Y., Chen, H., Tang, M., 2015. Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Robinia pseudoacacia* in uncontaminated and heavy metal contaminated soils. *Soil Biol. Biochem.* 86, 146–158.
- Yaseen, M., Kumar, B., Ram, D., Singh, M., Anand, S., Yadav, H. K., and Samad, A. (2015). Agro morphological, chemical and genetic variability studies for yield assessment in clary sage (*Salvia sclarea* L.). *Industrial Crops and Products*, 77, 640-647. Yield and Composition of Coriander Herb Oil. *J. Agric. Food Chem.* 42, 354–359.
- Yu, L., Yan, J., and Sun, Z. (2017). D-limonene exhibits anti-inflammatory and antioxidant properties in an ulcerative colitis rat model via regulation of iNOS, COX-2, PGE2 and ERK signaling pathways. *Mol. Med. Rep.*
- Zak, J.C., Danielson, R.M., and Parkinson, D. (1982). Mycorrhizal Fungal Spore Numbers and Species Occurrence in Two Amended Mine Spoils in Alberta, Canada. *Mycologia* 74, 785–792.
- Zhang, C. (2019). *Soil and Groundwater Remediation: Fundamentals, Practices, and Sustainability* (John Wiley & Sons, Inc.).
- Zheljazkov, V. D., Craker, L. E., and Xing, B. (2006). Effects of Cd, Pb, and Cu on growth and essential oil contents in dill, peppermint, and basil. *Environmental and Experimental Botany*, 58(1), 9-16.
- Zheljazkov, V. D., Jeliakova, E. A., Kovacheva, N., and Dzhurmanski, A. (2008). Metal uptake by medicinal plant species grown in soils contaminated by a smelter. *Environmental and experimental botany*, 64(3), 207-216.
- Zhou, W., Lee, M.B., and Goodale, E. (2018). The relationship between the diversity of herbaceous plants and the extent and heterogeneity of croplands in noncrop vegetation in an agricultural landscape of south China. *Glob. Ecol. Conserv.* 14, e00399.
- Znini, M., Cristofari, G., Majidi, L., El Harrak, A., Paolini, J., Costa, J., 2013. *In vitro* antifungal activity and chemical composition of *Warionia saharae* essential oil against 3 apple phytopathogenic fungi. *Food Sci. Biotechnol.* 22, 113–119.
- Zutic, I., Nitzan, N., Chaimovitsh, D., Schechter, A., and Dudai, N. (2016). Geographical location is a key component to effective breeding of clary sage (*Salvia sclarea*) for essential oil composition. *Isr. J. Plant Sci.* 63, 134–141.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

- Tableau 1** : Caractéristiques des PPAM cultivées dans le projet PhytEO
- Tableau 2** : Chronologie des semis des PPAM dans le projet PhytEO
- Tableau 3** : Synthèse des échantillons prélevés sur les sites pollués d'Evin-Malmaison et non pollués de Rodelinghem (L : lavé ; NL : non lavé)
- Tableau 4** : Date de récolte des différentes PPAM selon l'année de culture
- Tableau 5** : Liste des professionnels enquêtés par entretiens semi-directifs
- Tableau 6** : Principaux paramètres pédo-physico-chimiques des sites pollués d'Evin-Malmaison et non pollués de Rodelinghem
- Tableau 7** : Espèces végétales inventoriées, cycle de vie et abondance sur le site pollué d'Evin-Malmaison
- Tableau 8** : Indices de biodiversité végétale mesurés sur le site pollué d'Evin-Malmaison.
- Tableau 9** : Taux de levée de la coriandre et de la sauge
- Tableau 10** : Rendement de distillation et rendement des HE obtenues à partir des parties aériennes et de graines de coriandre
- Tableau 11** : Rendement de distillation et rendement des HE obtenues à partir des parties aériennes et de graines de coriandre
- Tableau 12** : Concentrations d'ETM dans les HE issues des parties aériennes et des graines de coriandre et des feuilles et inflorescences de sauge
- Tableau 13** : Quantités résiduelles de pesticides dans les HE distillées de coriandre et de sauge
- Tableau 14** : Composition des HE distillées à partir des parties aériennes et de graines de coriandre et des sommités fleuries de sauge scolarée cultivées sur la parcelle polluée et non polluée.
- Tableau 15** : Concentration d'ETM dans les résidus de distillation
- Tableau 16** : Valeurs de CI50 (g.L⁻¹) résultant des essais biologiques in vitro de contact direct et de test de volatilité contre *F. culmorum*
- Tableau 17** : Valeurs de CI50 (g.L⁻¹) résultant des essais biologiques in vitro de contact direct et de test de volatilité contre *Z. tritici*
- Tableau 18** : Valeurs de CI50 (g.L⁻¹) résultant de tests anti-germinatifs chez la laitue et le ray-grass
- Tableau 19** : Valeurs de CI50 (g.L⁻¹) résultant de tests herbicides chez la laitue et le ray-grass
- Tableau 20** : Pourcentages de rétention des HE en présence de β-CD
- Tableau 21** : Attention aux composants des produits selon leur type et usage
- Tableau 22** : Acceptabilité, selon la classe d'âge, des produits non alimentaires issus de sols pollués
- Tableau 23** : Raisons évoquées pour le refus du traitement des plantes avec des produits « naturels » issus de sols pollués
- Tableau 24** : Grandes catégories de sentiment face à l'idée que cultiver des sols pollués peut être une opportunité économique.
- Tableau 25** : Synthèse des résultats obtenus

FIGURES

- Figure 1** : Délimitation des trois zones du site Metaleurop Nord (DRAAF Hauts-de-France, 2017)
- Figure 2** : Localisation de la parcelle polluée par des ETM située à Evin-Malmaison (62)
- Figure 3** : Localisation de la parcelle non polluée par les ETM située à Rodelinghem (62)
- Figure 4** : Délimitation du parcellaire de la parcelle non polluée (Site de Rodelinghem) et de la parcelle polluée (Site d'Evin-Malmaison)
- Figure 5** : Frise chronologique des interventions sur les parcelles d'Evin-Malmaison et de Rodelinghem
- Figure 6** : Cartographie des points de prélèvement réalisés pour caractériser l'état initial des parcelles
- Figure 7** : Pilote d'extraction des huiles essentielles
- Figure 8** : Procédé de distillation des HE par entraînement à la vapeur
- Figure 9** : Activité antifongique par contact direct contre *Fusarium culmorum*
- Figure 10** : Représentation schématique du dispositif utilisé pour les tests antifongiques par volatilité
- Figure 11** : Activité antifongique par volatilité contre *Fusarium culmorum*
- Figure 12** : Activité herbicide par contact direct contre la laitue
- Figure 13** : Activité herbicide par contact direct contre le ray-grass
- Figure 14** : Poids sec et hauteur de la coriandre avant récolte des parties aériennes (A) ou des graines (B)
- Figure 15** : Poids sec et hauteur de la sauge scolarée avant récolte

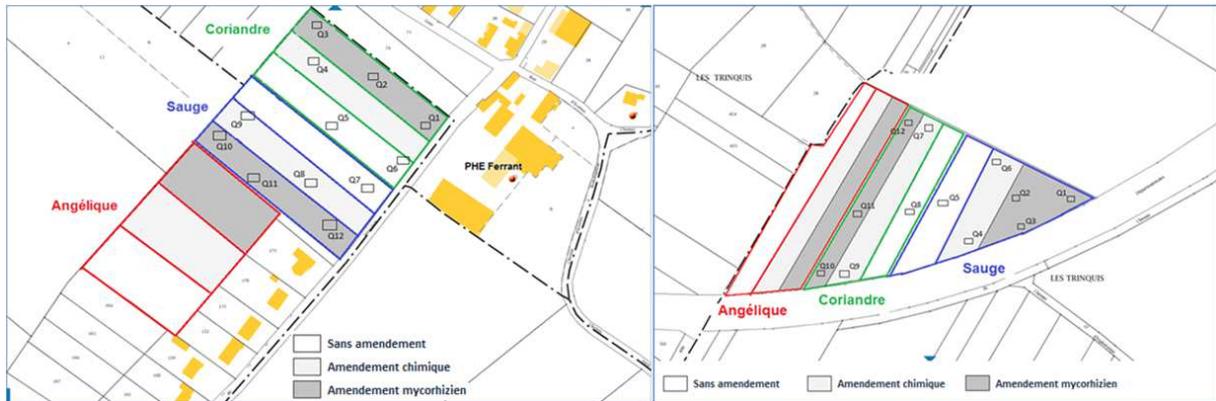
- Figure 16** : Taux de mycorhization de la coriandre avant récolte des parties aériennes (A) et des graines(B)
- Figure 17** : Taux de mycorhization de la sauge sclarée avant récolte (B)
- Figure 18** : Concentrations de Zn (A), Cd (B), Pb (C) et Cu (D) dans les parties aériennes (vert) et les graines (orange) de la coriandre inoculée (I) et non-inoculée (NI)
- Figure 19** : Concentrations de Zn (A), Cd (B), Pb (C) et Cu (D) dans les feuilles (année 1, orange) et les inflorescences (année 2, vert) de la sauge inoculée (I) et non-inoculée (NI)
- Figure 20** : Concentrations extractibles de Zn (A), Cd (B), Pb (C) et Cu (D) dans le sol pollué végétalisé par la coriandre
- Figure 21** : Concentrations extractibles de Zn (A), Cd (B), Pb (C) et Cu (D) dans le sol pollué végétalisé par la sauge. Les modalités représentées sont : sauge inoculée
- Figure 22** : Valeurs de CI50 (g.L-1) résultant de la capacité de piégeage de radicaux du DPPH
- Figure 23** : Niveaux de cytokines dans les cellules BEAS-2B exposées pendant 48 h à des PM_{2.5} en présence d'HE libres ou encapsulées dans des β -CD
- Figure 24** : Hiérarchie des problèmes environnementaux
- Figure 25** : Souvenirs de pollutions de sols
- Figure 26** : Les usages acceptables pour les végétaux issus de sols pollués
- Figure 27** : Acceptabilité des produits alimentaires issus de sols pollués
- Figure 28** : Acceptabilité de différents composants issus de sols pollués pour les produits d'hygiène et beauté
- Figure 29** : Acceptabilité de l'utilisation de produits « naturels » issus de sols pollués pour traiter les plantes
- Figure 30** : Sentiment face à l'idée que cultiver des sols pollués peut être une opportunité économique
- Figure 31** : Représentation des variables actives et illustratives sur le premier plan factoriel

SIGLES ET ACRONYMES

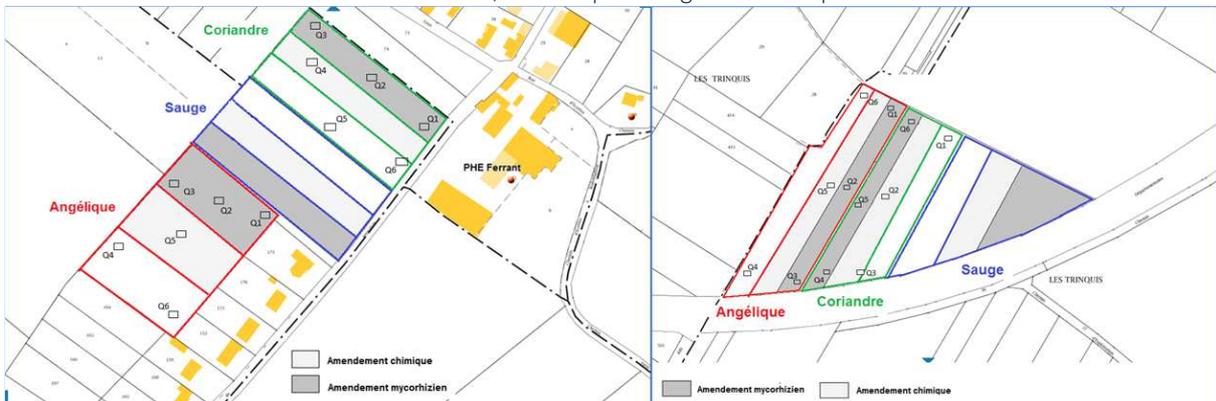
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
UCEIV	Unité de Chimie Environnementale et Interactions sur le Vivant
ULCO	Université du Littoral Côte d'Opale

ANNEXES

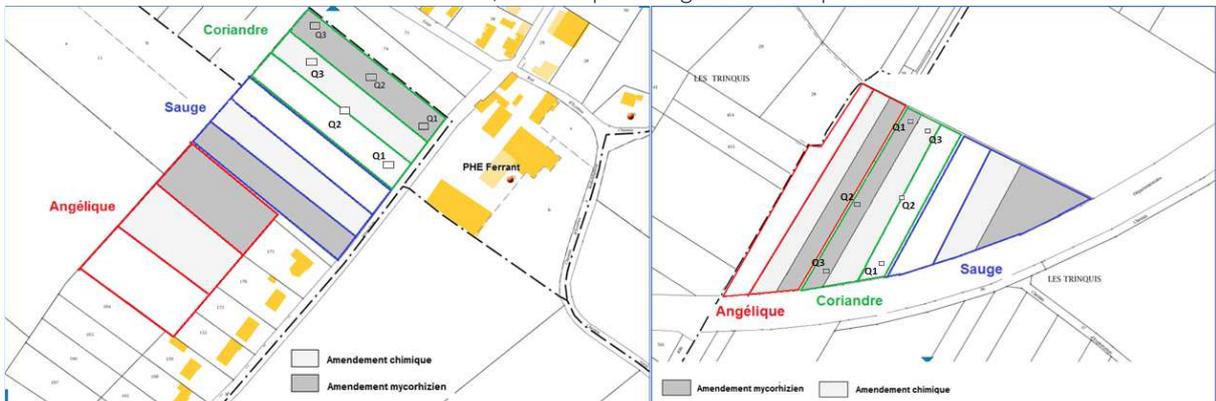
Annexe 1 : Cartographie des comptages par la méthode des quadrats



Année de culture : 2017, site non pollué à gauche – site pollué à droite.



Année de culture : 2018, site non pollué à gauche – site pollué à droite.

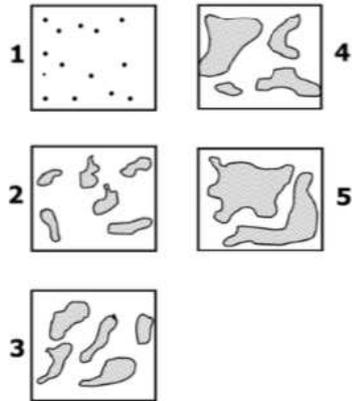


Année de culture : 2019, site non pollué à gauche – site pollué à droite.

Annexe 2 : Liste des interventions phytosanitaires réalisées sur les parcelles expérimentales.

Parcelle	Passage	Plante	Produit commercial	Substance active	Dicotylédones	Graminées	
Evin-Malmaison	1er	Angélique	Challenge 600	Aclonifen	✓	✓	
			Lentagran	Pyridate	✓		
			Prowl 400	Pendimethaline	✓	✓	
		Coriandre	Challenge 600	Aclonifen	✓	✓	
			Lentagran	Pyridate	✓		
			Prowl 400	Pendimethaline	✓	✓	
		Sauge	Lontrel SG	Clopyralid	✓		
			Prowl 400	Pendimethaline	✓	✓	
			Tornado SC	Methamitron	✓	✓	
	2e	Angélique	Round-up	Glyphosate	✓	✓	
			Challenge 600	Aclonifen	✓		
		Coriandre	Prowl 400	Pendimethaline	✓	✓	
			Challenge 600	Aclonifen	✓		
		Sauge	Prowl 400	Pendimethaline	✓	✓	
			Challenge 600	Aclonifen	✓		
Rodelinghem	1er	Coriandre	Prowl 400	Pendimethaline	✓	✓	
			Linuron	Linuron	✓	✓	
			Centurion (2000 ou 240 EC)	Quizalofop clethodime	+	✓	
		Sauge	Prowl 400	Pendimethaline	✓	✓	
			Linuron	Linuron	✓	✓	
			Centurion (2000 ou 240 EC)	Quizalofop clethodime	+	✓	
		2e	Coriandre	Prowl 400	Pendimethaline	✓	✓
				Challenge 600	Aclonifen	✓	
				Asulox	Asulame	✓	
	Centurion (2000 ou 240 EC)			Quizalofop clethodime	+	✓	
	Sauge		Asulox	Asulame	✓		
			Challenge 600	Aclonifen	✓		
				Defi	Prosulfocarbe	✓	✓
				Lentagran	Pyridate	✓	

Annexe 3 : Echelle des coefficients d'abondance-dominance de Braun-Blanquet (1951)



Taux de couverture (%)	Coefficient de Braun-Blanquet
< 1	+
< 5	1
5 – 25	2
25 – 50	3
50 – 75	4
75 – 100	5

La sociabilité prend en compte le mode d'organisation et de regroupement des espèces au sein de la communauté végétale. Elle traduit un « degré de dispersion spatiale des individus » et exprime l'aptitude des espèces à former des groupements plus ou moins denses au sein d'un espace. Elle est complémentaire du coefficient d'abondance-dominance présenté ci-dessus.

La sociabilité s'apprécie suivant une échelle graduée de 1 à 5 (1 : individus isolés, 2 : groupes, 3 : petites colonies - troupes, 4 : peuplement, 5 : peuplements denses) (Sturbois et Bioret, 2012)

Indices de diversité α :

- indice de Menhinick, D : tient compte du nombre d'individus et d'espèces (ou taxa) dénombrés dans un échantillon ou milieu donné. Il permet d'exprimer la richesse spécifique d'un milieu et est calculé de la manière suivante :

$$D = \frac{s}{\sqrt{N}}$$

Où s est égal au nombre d'espèces représentées (richesse) et N au nombre d'individus observés (Menhinick, 1964).

- indice de Margalef (1958) : permet de traduire la richesse spécifique d'un milieu (Choudhury et Choudhury, 2013 ; Gamito, 2009). Il s'exprime de la manière suivante :

$$D_{mg} = \frac{(s - 1)}{\ln N}$$

Où s est le nombre d'espèces total et N le nombre d'individus.

- indice de diversité de Shannon-Weaver (1948), H' , également appelé indice de Shannon-Wiener : au départ développé pour les systèmes de communication, cet indice est basé sur la théorie de l'information s'appuyant sur le fait qu'un message peut être transmis sous la forme d'un code binaire (Shannon, 1948 ; Shannon et Weaver, 1964 ; Thukral, 2017).

$$H' = - \sum_{i=1}^s \frac{n_i}{N} \ln\left(\frac{n_i}{N}\right)$$

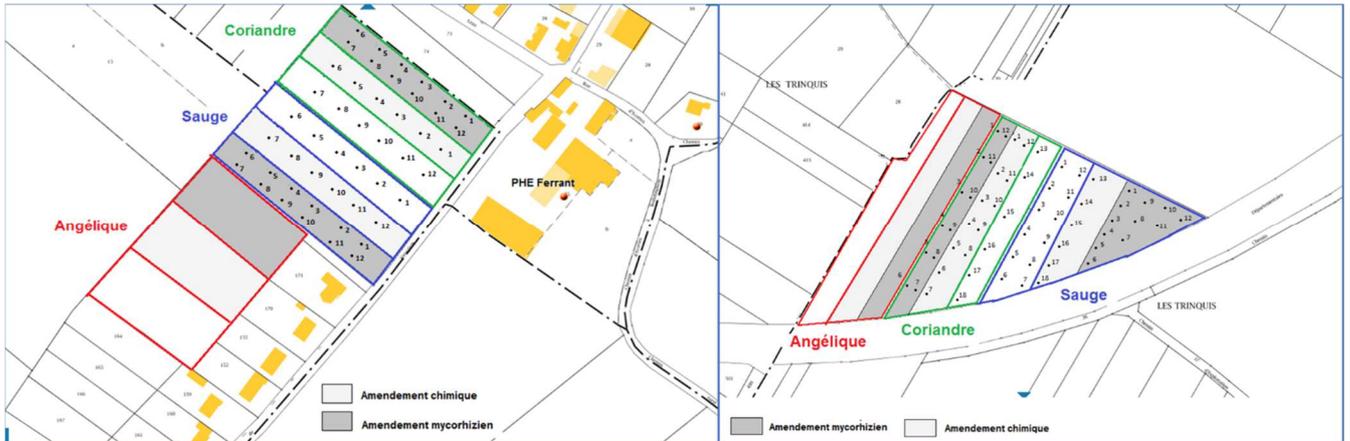
Où n_i correspond au nombre d'individus au sein d'une espèce i et N au nombre total d'individus observés.

- indice de diversité de Simpson (1949) : représente le complémentaire de l'indice de Simpson original, lorsqu'exprimé sous la forme ci-dessous. Il traduit ainsi la probabilité que deux individus, choisis au hasard dans la population, appartiennent à des espèces différentes. Transformé ainsi, l'indice retranscrit de manière plus intuitive un accroissement de la diversité (Morris et al., 2014).

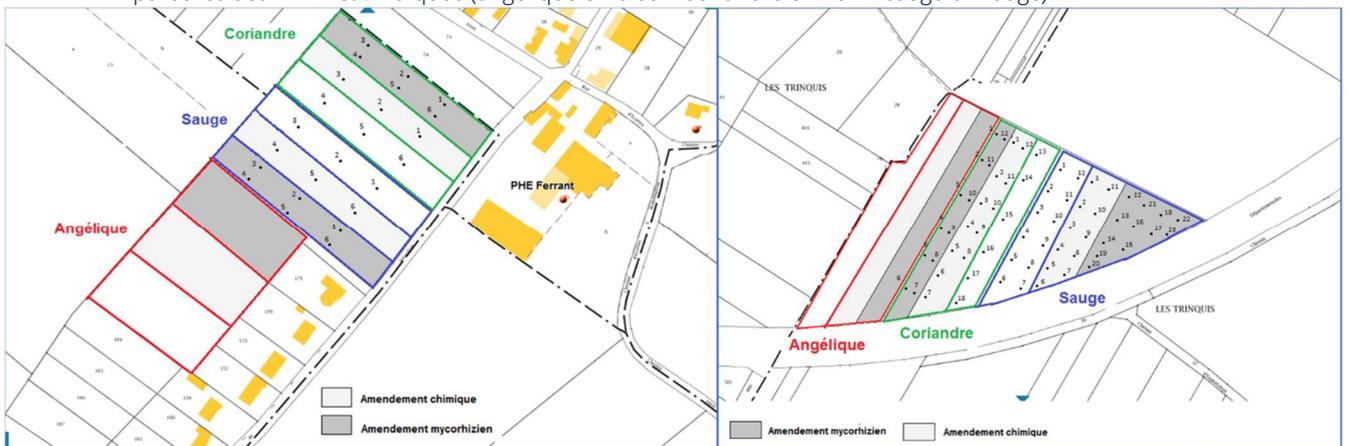
$$D_s = 1 - \sum_{i=1}^s \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$$

Où n_i correspond au nombre d'individus au sein d'une espèce i et N au nombre total d'individus observés. L'expression de la diversité est souvent le résultat du calcul de différents indices, car ceux-ci, de par leur expression, sont plus ou moins sensibles et plus ou moins affectés par l'échantillonnage (méthode, taille de la population échantillonnée – Thukral, 2017 ; Wagner et al., 2018).

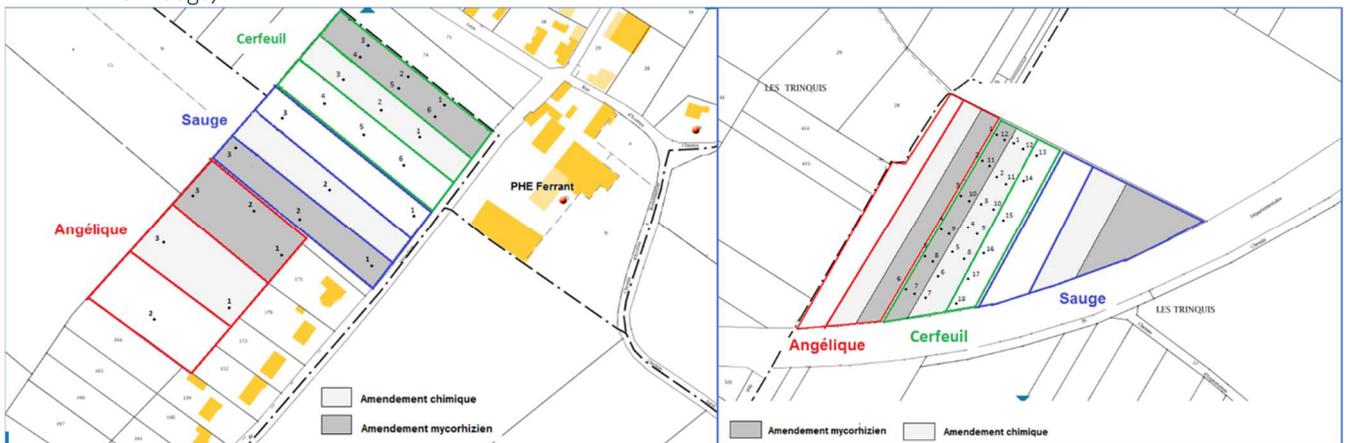
Annexe 4 : Cartographie des points de prélèvement réalisés avant récolte



2017 - Parcelle non polluée à gauche ; parcelle polluée à droite. Les contours correspondant à la délimitation des parcelles des PPAM est indiquée (angélique en bleu – coriandre en noir – sauge en rouge).



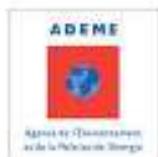
2018 - Parcelle non polluée à gauche ; parcelle polluée à droite. Les contours correspondant à la délimitation des parcelles des PPAM est indiquée (angélique en bleu – coriandre en noir – sauge en rouge).



2019 - Parcelle non polluée à gauche ; parcelle polluée à droite. Les contours correspondant à la délimitation des parcelles des PPAM est indiquée (angélique en bleu – coriandre en noir – sauge en rouge).

Date : ___ / ___ / ___ Ville : _____ Lieu : _____ N° _____ E- TIPIV

Environnement et habitude de consommation



L'Université du Littoral Côte d'Opale et l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) souhaitent connaître votre avis dans le cadre d'une étude sur l'environnement et les habitudes de consommation. Pourriez-vous répondre à ce questionnaire d'une durée d'environ 10 minutes ? Vos réponses sont anonymes. Il n'y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses, c'est votre avis qui compte.



1. Vous êtes : Un homme Une femme

Selon vous...

2. ... que devrait-on favoriser en priorité ?

Choisissez 3 items et classez-les par ordre d'importance en indiquant 1, puis 2, puis 3

- L'égalité et la solidarité Le niveau de vie La santé
 La préservation de la nature Le progrès scientifique Autre, précisez :
 La liberté La sécurité

3. ... qu'est-ce qui vous semble le plus préoccupant parmi ces sujets environnementaux ?

Choisissez 3 items et classez-les par ordre d'importance en indiquant 1, puis 2, puis 3

- La pollution de l'air Le réchauffement climatique Les dommages liés aux catastrophes naturelles
 La disparition d'espèces animales La destruction des forêts La diminution de la couche d'ozone
 La pollution de l'eau La dégradation des paysages La pollution des sols
 Les nuisances sonores
 Je ne sais pas

4. ... agir pour préserver l'environnement c'est d'abord l'affaire de qui ?

Choisissez 3 items et classez-les par ordre d'importance en indiquant 1, puis 2, puis 3

- De l'Etat De tous les citoyens Des associations de protection de la nature
 Des agriculteurs De l'Europe Des scientifiques
 De la commune Des industriels Des organisations politiques internationales
 Je ne sais pas Autre, précisez :

5. ... être en bonne santé dépend d'abord de quoi ?

Choisissez 3 items et classez-les par ordre d'importance en indiquant 1, puis 2, puis 3

- De l'alimentation Des conditions de travail
 De l'environnement De l'exercice physique
 De l'héritage génétique Autre, précisez :
 Je ne sais pas

6. ... des composants mauvais pour la santé sont-ils présents dans les produits industriels suivants ?

	Produits alimentaires (biscuit, plat préparé...)	Habillement (T-shirt, pantalon...)	Produits d'hygiène, de beauté (shampoing, crème pour le visage...)	Aménagement intérieur (moquette, coussin...)	Produits pour les plantes d'intérieur et potager (herbicide, antiparasite...)
Beaucoup	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Un peu	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très peu	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Presque pas ou pas du tout	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Je ne sais pas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Voici une liste d'actions du quotidien...

7. ... lesquelles faites-vous déjà, avez-vous prévu de faire ou n'avez-vous pas prévu de faire ?

	Je le fais déjà	J'ai prévu de le faire	Je n'ai pas prévu de le faire	Je ne sais pas
Utiliser des ampoules basse consommation dans toutes les pièces de mon logement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Installer un économiseur d'eau sur mon pommeau de douche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Trier systématiquement mes déchets (alimentaires, de bricolage, piles, ampoules...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Régler la température du chauffage chez moi, à 20°C ou moins	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Utiliser des multiprises pour couper les veilles de tous mes appareils	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Utiliser une gourde plutôt qu'acheter une bouteille d'eau	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Quand vous achetez les produits suivants...

8. ... entre deux paquets de biscuits, vous choisissez celui qui est ?

Choisissez 3 items et classez-les par ordre d'importance en indiquant 1, puis 2, puis 3

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Le moins cher | <input type="checkbox"/> Le plus local ou made in France |
| <input type="checkbox"/> De marque | <input type="checkbox"/> Le plus rémunérateur pour les producteurs |
| <input type="checkbox"/> Le moins emballé | <input type="checkbox"/> Labellisé bio |
| <input type="checkbox"/> Sans additifs artificiels (colorants, conservateurs...) | <input type="checkbox"/> Le plus agréable (goût, consistance...) |
| <input type="checkbox"/> Habituel (vous avez l'habitude de l'utiliser) | <input type="checkbox"/> Autre, précisez : |

9. ... entre deux produits d'hygiène et de beauté (shampooing, crème pour le visage...), qu'est-ce qui compte le plus ?

Choisissez 3 items et classez-les par ordre d'importance en indiquant 1, puis 2, puis 3

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Le prix | <input type="checkbox"/> L'habitude d'utiliser un produit particulier |
| <input type="checkbox"/> La marque | <input type="checkbox"/> Un label écologique |
| <input type="checkbox"/> Le contenant (réutilisable, recyclable...) | <input type="checkbox"/> L'odeur, la couleur, le design, le packaging... |
| <input type="checkbox"/> L'efficacité | <input type="checkbox"/> Autre, précisez : |
| <input type="checkbox"/> Les ingrédients qui le composent | |

10. ... vous vous renseignez en regardant l'étiquette ou en utilisant une application pour en connaître la composition ?

	Produits alimentaires (biscuit, plat préparé...)	Habillement (T-shirt, pantalon...)	Produits d'hygiène, de beauté (shampooing, crème pour le visage...)	Aménagement intérieur (moquette, coussin...)	Produits pour les plantes d'intérieur et potager (herbicide, antiparasite...)
Oui, toujours	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Oui, souvent	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Non, rarement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Non, jamais	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

je n'en achète jamais je n'en achète jamais

Faites-vous confiance aux acteurs suivants...

11. ... lorsqu'ils vous donnent des informations sur les produits industriels que vous achetez ?

	Les scientifiques	Les médias (journaux, TV...)	Les industriels	Les associations de consommateurs ou écologistes	Les organismes de contrôle de l'Etat
Oui, certainement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Oui, plutôt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Non, plutôt pas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Non, certainement pas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Je ne sais pas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

A propos des sols pollués...

La remise en état des sols pollués est souvent très chère et très longue. Ce qui explique qu'une grande surface de sols est aujourd'hui abandonnée en France. Pour leur donner une nouvelle fonction, on cherche des solutions...

- Imaginez que l'on cultive des végétaux sur ces **sols pollués**
- que l'on parvienne à les utiliser sans **aucun risque** pour l'environnement et la santé,
- une **certification par des organismes publics** le garantirait,
- ce qui permettrait une reconversion des sols **plus facile et moins chère que la dépollution...**

Répondez aux questions 12 à 17 avec ces 4 conditions en tête

12. ...seriez-vous favorable à ce que l'on cultive, dans ces conditions, des végétaux pour :

Cocher tous les choix qui vous semblent acceptables

- Nous nourrir
- Nourrir les animaux
- Nous habiller (fibres végétales : t-shirt, pantalon...)
- Nous laver (produits d'hygiène : shampoing...)
- Prendre soin de nous (produits de beauté : crème pour le visage...)
- Nous installer (aménagement intérieur : moquette, coussin...)
- Nous loger (matériaux de construction)
- Nous chauffer (combustibles...)
- Nous déplacer (carburants...)
- Faire pousser nos plantes d'intérieur et potager (herbicides, antiparasites...)
- Rien de tout cela, aucun usage agricole des sols pollués ne me paraît acceptable
- Autre, *précisez* :
- Je ne sais pas

Imaginez que l'on parvienne à fabriquer des produits non alimentaires, à partir de végétaux **toujours cultivés dans ces mêmes conditions** (sur des sols pollués, en sachant qu'ils ne sont pas contaminés, etc.)...

- s'il s'agissait de produits d'hygiène et de beauté...

13. ... seriez-vous prêt à les utiliser ?

- Oui, certainement
- Oui, probablement
- Non, probablement pas
- Non, certainement pas

13. BIS. Si Non probablement pas ou certainement pas, *précisez pourquoi* :

14. ... quels sont les composants issus de ces végétaux qu'il vous paraîtrait envisageable d'utiliser pour des produits d'hygiène et de beauté ?

Cocher tous les choix qui vous semblent acceptables

- Des alcools de plantes
- Des huiles essentielles
- Des eaux florales
- Des huiles végétales
- Aucun composant issu de végétaux cultivés sur des sols pollués ne devrait être utilisé dans ces produits
- Autre, *précisez* :
- Je ne sais pas

- s'il s'agissait de produits d'origine naturelle pour remplacer les pesticides chimiques...

15. ... seriez-vous prêt à les utiliser (pour des plantes d'intérieur, un potager, **que vous en ayez ou non**) ?

- Oui, certainement
- Oui, probablement
- Non, probablement pas
- Non, certainement pas

16. ... seriez-vous favorable à ce que les agriculteurs les utilisent, plutôt que des produits chimiques, pour protéger les plantes contre les maladies ?

- Oui, certainement
- Oui, probablement
- Non, probablement pas
- Non, certainement pas

16. BIS. Si Non probablement pas ou certainement pas, *précisez pourquoi* :

Vous êtes **étudiant** :

27.A. Votre formation est dans le domaine des...

- Sciences techniques (physique, maths, chimie, technologie, informatique)
- Sciences économiques et juridiques (droit, gestion, commerce)
- Sciences de la vie, santé (médecine, paramédical, pharmacie, biologie)
- Sciences humaines et sociales (lettres, histoire, sociologie, arts)
- Autre, *précisez* :

Indiquez la profession exacte et pas « retraité » ou « employé »...

28.A. Quelle est la **profession actuelle de vos parents – ou la dernière** qu'ils aient exercée ?

- Profession de votre père : Non concerné
- Profession de votre mère : Non concerné

OU

Vous n'êtes **pas étudiant** :

27.B. Quelle est votre profession actuelle **ou, si chômeur, retraité, inactif : la dernière que vous avez exercée ?**

Indiquez votre profession exacte et pas « fonctionnaire » ou « employé »...

28.B. Quel est (ou était) votre secteur d'activité ?

- Primaire (agriculture, exploitation forestières, pêche...)
- Secondaire (bâtiment, industrie, automobile...)
- Tertiaire (services, informatique, éducation...)

29. Lorsque vous votez aux élections, donnez-vous systématiquement votre voix à un parti dont l'écologie est au cœur du programme :

- Toujours Souvent Rarement Jamais Je ne vote pas Je n'ai encore jamais voté Je ne sais pas

30. Quels sont les revenus **nets mensuels** de votre **foyer** ?

Prenez en compte tous les revenus de votre foyer, après impôts (salaires, pensions, indemnités, prestations sociales, revenus du patrimoine)

- Moins de 500 € De 1.000 à 1.500 € De 2.000 à 3000 € De 4.000 € à 6000 € Je ne sais pas
- De 500 à 1.000 € De 1.500 à 2.000 € De 3.000 € à 4000 € 6.000 ou plus

31. Êtes-vous membre d'un ou plusieurs groupe(s), club(s), association(s) ou organisation(s) de tous types ?

- Oui Non

31. BIS. Si oui, précisez de quel(s) groupe(s), club(s), association(s) ou organisation(s) il s'agit :

.....

32. Avez-vous déjà participé à une ou plusieurs mobilisation(s) ou manifestation(s) de toutes sortes en lien avec l'environnement ou l'écologie ?

- Oui Non

32. BIS. Si oui, précisez de quelle(s) mobilisation(s) ou manifestation(s) il s'agissait :

.....

33. Avez-vous autre chose à ajouter sur la culture des sols pollués et notamment des sols pollués du fait de leur passé industriel ?

.....
.....
.....
.....

Un grand merci pour votre participation. Nous vous en sommes très reconnaissants.

Annexe 6 : Les formations auxquelles appartiennent les étudiant.e.s du 3ème sous-échantillon.

Domaine de formation	Année d'étude	Inclus dans l'échantillon « environnement »	Lieu de passation
<i>Sciences de la vie et de la santé</i>	M2	Oui	Calais
<i>Sciences de la vie et de la santé</i>	M1	Oui	Villeneuve d'Ascq
<i>Sciences de la vie et de la santé</i>	M1	Oui	Villeneuve d'Ascq
<i>Sciences économiques et juridiques</i>	M1	Non	Boulogne-sur-mer
<i>Sciences économiques et juridiques</i>	M2	Non	Boulogne-sur-mer
<i>Sciences économiques et juridiques</i>	M2	Non	Dunkerque
<i>Sciences économiques et juridiques</i>	M2	Non	Dunkerque
<i>Sciences économiques et juridiques</i>	M1	Oui	Dunkerque
<i>Sciences humaines et sociales</i>	M2	Non	Villeneuve d'Ascq
<i>Sciences humaines et sociales</i>	M1	Oui	Arras
<i>Sciences humaines et sociales</i>	M1	Oui	Villeneuve d'Ascq
<i>Sciences humaines et sociales</i>	M2	Oui	Villeneuve d'Ascq
<i>Sciences techniques</i>	M1	Non	Calais
<i>Sciences techniques</i>	M2	Non	Calais

Annexe 7 : Estimation des coûts de production des cultures de coriandre (parties aériennes et graines) et de sauge.

Estimation des coûts de production pour la culture de la coriandre parties aériennes (estimation des coûts sur un an)

	Description	Coût unitaire	Unité	Quantité	Coût de l'opération	Unité
Etape 1: préparation du sol						
Labour	Tracteur + charrue à 5 ciseaux	59,8	€/ha	1	59,8	€/ha
Préparation du sol avant semis	Tracteur + herse rotative	37,9	€/ha	1	37,9	€/ha
Total					97,7	€/ha
Etape 2: semis						
Semis	Tracteur + semoir à betteraves	67,8	€/ha	1	67,8	€/ha
Semences	300 000 graines/ha <=> 3-4 kg/ha	40	€/kg	4	160	€/ha
Total					227,8	€/ha
Etape 3: amendements						
Fertilisation	Tracteur + épandeur	14,5	€/ha	2	29	€/ha
Amendements	Sulfate de sodium	400	€/t	0,6	120	€/ha
Traitements	Tracteur + pulvérisateur	15	€/ha	2	30	€/ha
Produits phytosanitaires	2 traitements / an				104,9	€/ha
Autres amendement	Inoculum mycorhizien	1,36	€/g	125	170	€/ha
Total					453,9	€/ha
Etape 4: Récolte						
Récolte	Tracteur + faucheuse	37	€/ha	1	37	€/ha
Chargement de la biomasse	Tracteur + remorque	60	€/ha	1	60	€/ha
Total					97	€/ha
Coût de production					876,4	€/ha

Estimation des coûts de production pour la culture de la coriandre graine (estimation des coûts sur un an)

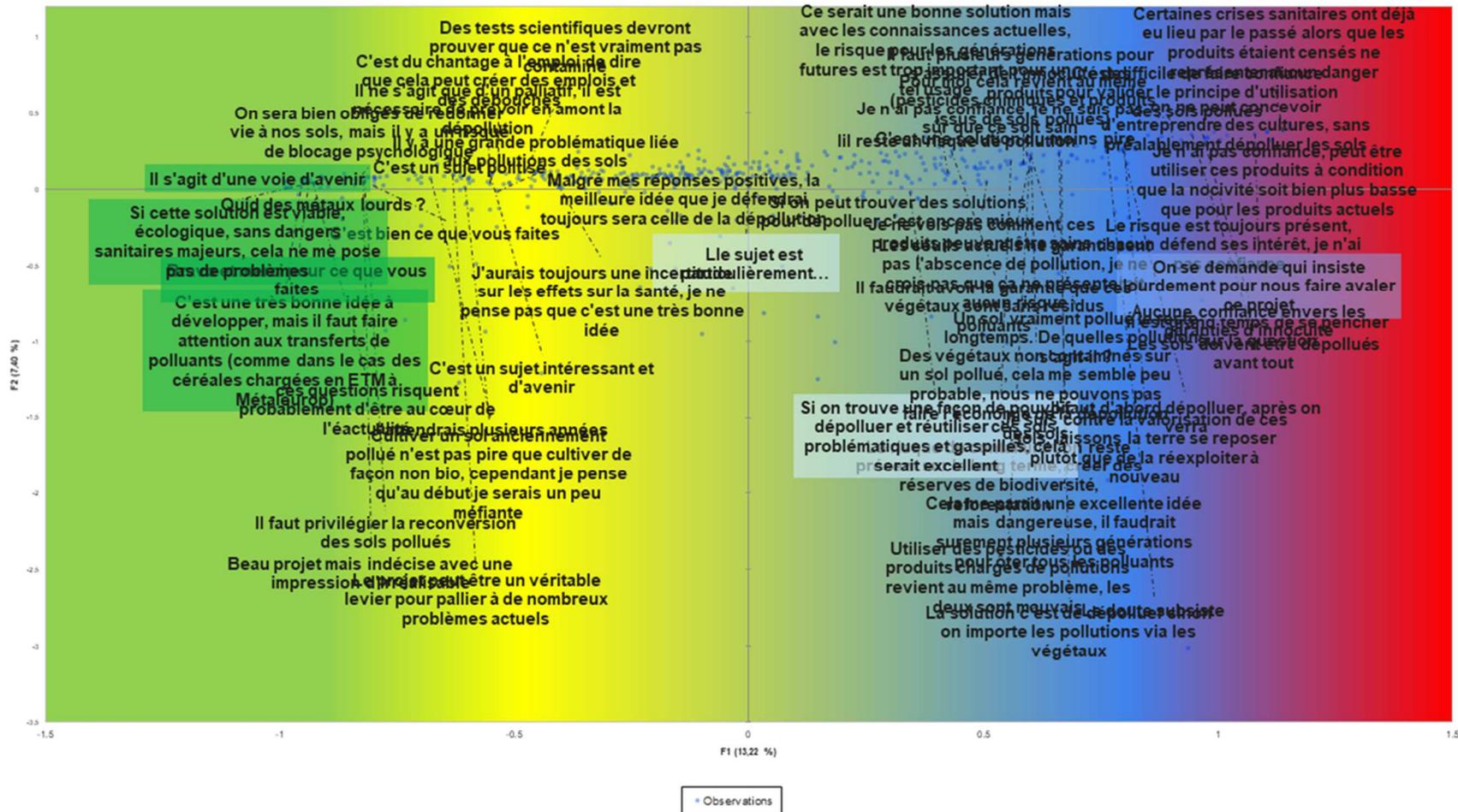
Description	Coût unitaire	Unité	Quantité	Coût de l'opération	Unité
Etape 1: préparation du sol					
Labour	Tracteur + charrue à 5 ciseaux	59,8	€/ha	1	59,8 €/ha
Préparation du sol avant semis	Tracteur + herse rotative	37,9	€/ha	1	37,9 €/ha
Total				97,7	€/ha
Etape 2: semis					
Semis	Tracteur + semoir à betteraves	67,8	€/ha	1	67,8 €/ha
Semences	300 000 graines/ha <=> 3-4 kg/ha	40	€/kg	4	160 €/ha
Total				227,8	€/ha
Etape 3: amendements					
Fertilisation	Tracteur + épandeur	14,5	€/ha	2	29 €/ha
Amendements	Sulfate de sodium	400	€/t	0,6	120 €/ha
Traitements	Tracteur + pulvérisateur	15	€/ha	2	30 €/ha
Produits phytosanitaires	2 traitements / an				104,9 €/ha
Autres amendement	Inoculum mycorhizien	1,36	€/g	125	170 €/ha
Total				453,9	€/ha
Etape 4: Récolte					
Récolte	Tracteur + faucheuse	114	€/ha	1	114 €/ha
Chargement de la biomasse	Tracteur + remorque	49	€/ha	1	49 €/ha
Total				97	€/ha
Coût de production				972.4	€/ha

Estimation des coûts de production pour la culture de sauge sclarée (estimation des coûts sur trois ans)

Description	Coût unitaire	Unité	Quantité	Coût de l'opération	Unité
Etape 1: préparation du sol					
Labour	Tracteur + charrue à 5 ciseaux	59,8	€/ha	1	59,8 €/ha
Préparation du sol avant semis	Tracteur + herse rotative	37,9	€/ha	1	37,9 €/ha
Total				97,7	€/ha
Etape 2: semis					
Semis	Tracteur + semoir à betteraves	67,8	€/ha	1	67,8 €/ha
Semences	300 000 graines/ha <=> 3-4 kg/ha	25	€/kg	4	100 €/ha
Total				167,8	€/ha
Etape 3: amendements					
Fertilisation	Tracteur + épandeur	14,5	€/ha	6	87 €/ha
Amendements	Sulfate de sodium	400	€/t	0,9	180 €/ha
Traitements	Tracteur + pulvérisateur	15	€/ha	4	60 €/ha
Produits phytosanitaires	2 traitements / an				215 €/ha
Autres amendement	Inoculum mycorhizien	1,36	€/g	125	170 €/ha
Total				712	€/ha
Etape 4: Récolte					
Récolte	Tracteur + faucheuse	37	€/ha	3	111 €/ha
Chargement de la biomasse	Tracteur + remorque	60	€/ha	3	180 €/ha
Total				291	€/ha
Etape 5 : post récolte					
Entretien des parcelles		60			60
Total				60	
Coût de production				1328.5	€/ha

Annexe 7 : Verbatim des personnes bien représentées sur F1.

Observations (axes F1 et F2 : 20,61 %)
 Verbatims des personnes bien représentée sur F1 (>moyenne cos2)



La partie droite de l'axe F1 :

En parfaite cohérence avec ce que montre la Figure 31, les verbatim évoquant le manque de confiance envers les cultures sur sols pollués et les acteurs qui les promeuvent se concentrent sur la droite de l'axe.

On y trouve l'idée que le préalable à toute nouvelle culture sur ces sols est leur dépollution :

- « Des végétaux non contaminés sur un sol pollué, cela me semble peu probable, nous ne pouvons pas faire l'économie de la dépollution des sols » ;
- « Rien ne peut être cultivé sur ces sols avant »,

Cela peut être exprimé avec moins de certitude ou plus de nuances :

- « Un sol vraiment pollué le reste longtemps, De quelles pollutions s'agit-il ? » ;
- « Je suis contre la valorisation de ces sols, laissons la terre se reposer plutôt que la ré-exploiter à nouveau »

La méfiance, éclairée par des expériences passées, semble aussi grande dans cette partie de l'axe F1 :

- « On se demande qui insiste lourdement pour nous faire avaler ce projet » ;
- « Certaines crises sanitaires ont déjà eu lieu par le passé alors que les produits étaient censés ne représenter aucun danger » ;
- « Le risque est toujours présent, chacun défend ses intérêts, je n'ai pas confiance »,

La défiance semble donc importante chez ceux qui refusent de l'utilisation agricole de sols pollués, qui n'imaginent pas ou très difficilement la remise en culture sans dépollution préalable,

La partie gauche de l'axe F1 :

Un certain nombre de remarques soulignent que la remise en culture des sols dégradés est un sujet d'avenir ; leurs auteurs se montrent optimistes allant jusqu'à féliciter l'enquêtrice de s'y attaquer :

- « C'est un sujet intéressant et d'avenir » ;
- « C'est bien ce que vous faites » ;
- « Bravo et merci pour ce que vous faites ».

Néanmoins, malgré l'existence de ces remarques teintées d'optimisme, sur la partie gauche de l'axe certains verbatim sont plus réservés, plus prudents ; et des conditions à la remise en culture peuvent même être énoncées :

- « Cultiver un sol anciennement pollué n'est pas pire que cultiver de façon non bio, cependant je pense qu'au début je serais un peu méfiante » ;
- « J'attendrais plusieurs années » ;
- « Il ne s'agit que d'un palliatif, il est nécessaire de prévoir en amont la dépollution » ;
- « C'est une très bonne idée à développer, mais il faut faire attention aux transferts de polluants (comme dans le cas des céréales chargées en ETM à Metaleurop) » ;

On voit donc que si sur cette partie gauche de l'axe la défiance envers les différents acteurs de la remise en culture de sols dégradés est beaucoup moins marquée que sur la partie droite, l'accord s'accompagne néanmoins de réserves et conditions.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, gaspillage alimentaire, déchets, sols, etc., nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

La production d'huiles essentielles : une filière éco-innovante de reconversion des sols historiquement pollués

Le projet PHYTEO avait pour objectif de proposer une nouvelle filière de valorisation non alimentaire de la biomasse végétale produite sur sols agricoles pollués par des éléments traces métalliques (ETM) sur le site atelier Metaleurop. IL s'agissait d'évaluer à l'échelle de l'hectare l'intérêt d'un mode de gestion reposant sur la phytostabilisation aidée par des champignons mycorhiziens et la production d'huiles essentielles extraites de PPAM (angélique, sauge et coriandre).

Les huiles essentielles issues de la distillation de phytomasse produite sur sols pollués présentent une qualité satisfaisante aussi bien en termes d'activités biologiques qu'en terme de présence d'ETM et de pesticides (traces) avec des applications potentielles dans les domaines de la protection des plantes et de la santé humaine.

Les résultats soulignent la pertinence de la sauge sclérée dans une démarche de phytomanagement de sols pollués par les ETM.

Le potentiel de l'angélique dont le développement a été retardé par les conditions météorologiques sera évalué dans le cadre d'une suite : le projet DEPHYTOP.

Le projet PHYTEO a permis de montrer la faisabilité technico-économique et la pertinence de la culture de Plantes à Parfums Aromatiques et Médicinales (PPAM, sauge, coriandre) dans le cadre du phytomanagement des sols historiquement pollués par les ETM à des fins de production d'huiles essentielles à activités biologiques.

