



LIFE ENVIRONMENT - LIFE BIOREST  
LIFE ENVIRONMENT AND BIOREST  
WITH THE CONTRIBUTION OF THE LIFE PROGRAM  
OF THE EUROPEAN UNION

# LIFE BIOREST

## *Environmental guideline for contaminated soil bioremediation*

LA STRATÉGIE POUR RAMENER DES TERRES VERTES À LA COMMUNAUTÉ





**Environmental  
Guideline  
for  
Contaminated Soil  
Bioremediation**

*La stratégie pour ramener des  
terres vertes à la communauté*

## Notes de version

Cette publication a été réalisée par Consorzio Italbiotec ([www.italbiotec.it](http://www.italbiotec.it)) dans le cadre du projet européen LIFE BIOREST Project - Bioremediation and Revegetation to restore the public use of contaminated land ([www.lifebiorest.com](http://www.lifebiorest.com)), dont il est chef de file en collaboration avec Actygea Srl, l'Agenzia regionale dell'Emilia-Romagna per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia - ARPAE, l'Université de Turin, l'Université catholique du Sacré-Cœur, l'Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Cientificas (Espagne) et SATT-SAYENS (France).

Toute réutilisation du présent document doit être autorisée à condition que la source soit citée correctement et que le message original soit respecté.

@ Consorzio Italbiotec, 2020

ISBN: 978-88-907628-6-4

Conception: UNDERGROUND way Srl

Impression: Graphidea Srl

PDF: Environmental guideline for contaminated soil bioremediation

## Table des matières

Glossaire .....	4
Acronymes .....	5
Résumé .....	6
<b>1. Présentation .....</b>	<b>7</b>
1.1 Portée de la présente ligne directrice .....	8
1.2 Cadre législatif européen sur la contamination des sols .....	8
1.3 Droit de l'environnement pour la pollution des sols en Italie .....	11
1.4 Droit de l'environnement pour la pollution des sols en Espagne .....	12
1.5 Droit de l'environnement pour la pollution des sols en France .....	13
<b>2. Cartographie des sites pollués dans les zones d'essai du projet LIFE BIOREST de l'UE</b> .....	<b>14</b>
<b>3. Techniques de bioremédiation .....</b>	<b>18</b>
3.1 In situ .....	18
3.2 Ex situ .....	19
<b>4. La bioremédiation du sol en trois étapes : la méthode LIFE BIOREST .....</b>	<b>20</b>
4.1 Optimisation de la bioremédiation des sols .....	20
4.2 Production de biomasse à l'échelle industrielle .....	22
4.3 Bioremédiation et revégétalisation in situ .....	22
<b>5. Recommandations en matière de bioremédiation .....</b>	<b>24</b>
Références bibliographiques .....	26

## Glossaire

<b>Aérobic</b>	Un environnement qui a une pression partielle d'oxygène similaire aux conditions atmosphériques normales.
<b>Anaérobic</b>	Un environnement sans oxygène.
<b>Andain</b>	Technique spécifique de réhabilitation ex situ basée sur le retournement périodique des sols pollués empilés pour augmenter la bioremédiation en augmentant l'activité de dégradation des micro-organismes.
<b>Biodégradation</b>	La décomposition des substances organiques par les micro-organismes.
<b>Bioémulsifiant</b>	Les molécules capables d'émulsionner efficacement deux liquides non miscibles tels que les hydrocarbures ou d'autres substrats hydrophobes, même à de faibles concentrations, mais qui sont par contre moins efficaces pour réduire la tension superficielle.
<b>Biopile</b>	Pile de sols contaminés utilisée pour réduire les concentrations de polluants (par exemple constituants pétroliers) dans les sols excavés par le biais de la biodégradation.
<b>Bioréacteur</b>	Il s'agit de tout dispositif ou système fabriqué qui soutient un environnement biologiquement actif. Un bioréacteur est un récipient dans lequel s'effectue un processus chimique impliquant des micro-organismes ou des substances biochimiquement actives dérivées de ces organismes. Ce processus peut être aérobic ou anaérobic.
<b>Bioremédiation</b>	Le procédé utilisé pour traiter les matrices contaminées, y compris l'eau, le sol et les matériaux souterrains, en modifiant les conditions environnementales pour stimuler la croissance des micro-organismes qui dégradent ou transforment les contaminants organiques cibles.
<b>Bioslurping</b>	Combinaison d'éléments de bioventilation et de pompage sous vide de produits libres pour récupérer les produits libres des eaux souterraines et du sol, et pour bio-restaurer les sols.
<b>Biosparging</b>	Technologie d'assainissement in situ qui utilise des micro-organismes indigènes pour biodégrader les constituants organiques dans la zone saturée. De l'air (ou de l'oxygène) et des nutriments (si nécessaire) sont injectés dans la zone saturée pour augmenter l'activité biologique des micro-organismes indigènes.
<b>Biostimulation</b>	Un processus impliquant la modification de l'environnement pour stimuler les bactéries existantes capables de bioremédiation. Par exemple, l'ajout de nutriments, d'oxygène ou d'autres donneurs et accepteurs d'électrons.
<b>Champignons</b>	Groupe d'organismes eucaryotes unicellulaires et multicellulaires divers et répandus. De nombreuses espèces sont bien connues pour leur capacité à dégrader différents types de polluants aromatiques et aliphatiques.
<b>Ex situ</b>	Hors de la position d'origine (c.-à-d. excavé).
<b>In situ</b>	En place, sans excavation.
<b>L'agriculture paysanne</b>	Procédé de traitement ex situ des déchets réalisé dans la zone supérieure du sol ou dans des cellules de biotraitement. Les sols, sédiments ou boues contaminés sont transportés jusqu'au site d'élevage, incorporés à la surface du sol et retournés périodiquement (labourés) pour aérer le mélange.
<b>Mycoremédiation</b>	Procédé d'utilisation de champignons pour dégrader ou séquestrer des contaminants dans l'environnement. Par la stimulation de l'activité microbienne et enzymatique, le mycélium réduit les toxines in situ.
<b>Phytoremédiation</b>	Traitement des polluants ou des déchets (p. ex. dans un sol ou une nappe phréatique contaminée) au moyen de plantes vertes qui éliminent, dégradent ou stabilisent les substances indésirables, comme les métaux toxiques et autres contaminants.
<b>Tensioactif</b>	Des tensioactifs peuvent être ajoutés pour modifier les propriétés des interfaces de solution, permettant l'accès des hydrocarbures aux micro-organismes. C'est ce qu'on appelle la "Bioremédiation assistée par tensioactifs" ou "Bioremédiation améliorée par tensioactifs" (BAT).

## Acronymes

<b>BTEX</b>	Benzène, toluène, éthylbenzène et xylène
<b>HCC</b>	Hydrocarbures chlorés
<b>CSIC</b>	Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Conseil supérieur de la recherche scientifique)
<b>DRE</b>	Directive relative à la responsabilité environnementale
<b>FAO</b>	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
<b>ICPE</b>	Installation Classée pour la protection de l'environnement
<b>IPCC</b>	Directive relative à la prévention et réduction intégrées de la pollution
<b>ITPS</b>	Groupe technique intergouvernemental sur les sols
<b>MTES</b>	Ministère de la Transition écologique et solidaire
<b>ORC</b>	Composé libérant de l'oxygène
<b>HAP</b>	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
<b>BPC</b>	Biphényles polychlorés
<b>PCDD</b>	Polychlorodibenzo-p-dioxines
<b>PCDF</b>	Dibenzofuranes polychlorés
<b>PCE</b>	Perchloroéthylène, tétrachloroéthylène ou tétrachloroéthane
<b>POS</b>	Sulfonate de perfluorooctane
<b>POP</b>	Polluant organique persistant
<b>SIN</b>	Site contaminé d'intérêt national
<b>STS</b>	Stratégie thématique en faveur de la protection des sols
<b>COSV</b>	Composé organique semi-volatil
<b>TCE</b>	Trichloréthylène, trichloréthène
<b>COV</b>	Composé organique volatil

## Résumé

L'adoption des 17 Objectifs de Développement Durable (ODD) par les 193 pays membres de l'ONU en 2015, a contribué à la définition de solutions intégrées pour faire face aux principaux défis mondiaux pour protéger la planète et assurer un avenir durable. La dégradation des sols représente l'un des principaux défis reconnus tant au niveau européen qu'au niveau mondial, et de nombreuses ODD concernent la préservation et la protection des terres et des sols. Comme le sol est considéré comme une ressource non renouvelable, le maintenir en bonne santé est essentiel pour promouvoir les fonctions de base qui consistent à fournir les nutriments essentiels, l'eau, l'oxygène et un soutien aux plantes. Malgré la grande importance du sol, son utilisation et sa gestion inadéquates, principalement dues à des activités anthropiques, ont conduit à des niveaux élevés de pollution pouvant avoir de graves conséquences. La gestion non durable des sols a poussé la Commission européenne à adopter, en 2006, la Stratégie<sup>1</sup> thématique en faveur de la protection des sols (22 septembre 2006) afin de protéger tous les sols dans l'UE. En 2014, la Commission a décidé de retirer la proposition de directive-cadre sur les sols mais, avec le Septième programme d'action pour l'environnement (7<sup>e</sup> PAE) de janvier 2014, la dégradation des sols a été reconnue comme un défi majeur.

Comme l'a indiqué le Centre commun de recherche de la Commission européenne, 650 000 sites contaminés ont été enregistrés dans les inventaires des 28 États membres où des traitements de régénération ont été effectués ou sont en cours. Actuellement, 65 500 sites ont fait l'objet de mesures correctives. Les principaux contaminants présents dans les sols sont représentés par les métaux lourds, les huiles minérales, les composés organiques volatils et les hydrocarbures aromatiques polycycliques. Malgré ces initiatives de haut niveau, les politiques visant à prévenir la dégradation des terres et des sols restent fragmentées et reposent sur des politiques sectorielles.

Cette ligne directrice a pour objectif de présenter aux autorités locales les recommandations recueillies et élaborées ainsi que les résultats obtenus dans le cadre du projet LIFE BIOREST.

Le projet LIFE BIOREST a été conçu pour démontrer l'efficacité et la rentabilité d'une solution innovante et durable de bioremédiation des sols contaminés aux hydrocarbures, basée sur l'utilisation de souches bactériennes et fongiques à fort potentiel de dégradation, par la valorisation de sous-produits agroalimentaires. L'objectif final du projet est représenté par la restauration des fonctions écologiques des sols, la prévention de la perte de fertilité, de biodiversité et de résilience et le rétablissement de nouveaux espaces verts pour la communauté.

6

Ce document a été élaboré afin de fournir un modèle d'application d'une technique de bioremédiation dans les municipalités affectées par des sites contaminés, en utilisant l'étude de cas du site de Fidenza, où le projet LIFE BIOREST a été réalisé.

Le partenariat peut compter sur l'expérience de Consorzio Italbiotec, en tant que coordinateur du projet, d'Actygea Srl, de l'Agenzia regionale per la Prevenzione, de l'Ambiente e l'Energia - ARPAE, de l'Université de Turin, de l'Université catholique du Sacré-Cœur, du Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Espagne) et de SATT- SAYENS (France).

Au cours du projet LIFE BIOREST, les activités de diffusion au niveau européen ont joué un rôle très important pour soutenir la Stratégie thématique en faveur de la protection des sols et montrer les avantages de l'approche biologique aux législateurs, aux autorités publiques, aux industries et à la communauté.

Pour cette raison, LIFE BIOREST propose un modèle d'application du traitement de bioremédiation aux sites contaminés, avec un grand potentiel de diffusion en Europe.

<sup>1</sup> Stratégie thématique en faveur de la protection des sols (COM(2012) 46) - 2006: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A52012DC0046>

## 1. Présentation

Comme l'ont signalé la FAO et l'ITPS, la pollution du sol est l'état dans lequel la présence d'un produit chimique ou d'une substance hors place et/ou présente à une concentration supérieure à la normale avec des effets néfastes sur tout organisme non visé peut être observée.<sup>2</sup> Comme elle ne peut souvent pas être perçue visuellement ou directement évaluée, la pollution des sols est considérée comme un « danger caché », provoquant de graves conséquences.

Elle altère le métabolisme des plantes, ce qui a un impact sur la sécurité alimentaire et réduit le rendement des cultures, et elle rend également les cultures impropres à la consommation. Les principales sources de pollution des sols sont d'origine anthropique, ce qui entraîne l'accumulation de contaminants dans les sols qui peuvent atteindre des niveaux préoccupants (Cachada, Rocha-Santos et Duarte, 2018). Les sols contaminés par des éléments dangereux, tels que les métaux lourds et les produits chimiques organiques tels que les BPC (biphényles polychlorés), les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) ou les produits pharmaceutiques, contribuent à causer des risques graves pour la santé humaine. La diversité des contaminants est soumise à une évolution constante due aux développements agrochimiques et industriels, et la transformation des composés organiques des sols en métabolites secondaires par activité biologique rend l'identification des contaminants à la fois difficile et coûteuse. De plus, les propriétés physiques du sol comme la structure, la texture, la disposition des particules, la porosité, etc. influent également sur la mobilité, la biodisponibilité et le temps que contaminants passent dans le sol.

Comme l'a signalé le Centre commun de recherche de la Commission européenne (Van Liedekerke et al., 2014), les métaux lourds et les huiles minérales représentent environ 39 % et 29 % des contaminants des sols européens, respectivement, à cause du transport, du stockage et du raffinage du pétrole ou d'accidents (Gallego et al., 2001). Le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et le xylène (BTEX) forment une catégorie de composés organiques volatils (COV) que l'on retrouve dans les produits dérivés du pétrole comme l'essence et représentent 11 % des contaminants du sol. Les BTEX ont une grande mobilité parce qu'ils sont solubles dans l'eau et volatils. Les hydrocarbures chlorés (CHC) sont principalement utilisés pour la fabrication de solvants et d'insecticides synthétiques. Puisqu'ils sont également capables de bioaccumulation, on peut les trouver dans les tissus humains. Ils représentent 9 % des contaminants du sol. Les anciens sites de travail au gaz La source la plus courante de contamination au cyanure. Cependant, la contamination au cyanure est également associée aux usines de galvanoplastie, aux installations de stockage des sels de voirie et aux résidus miniers aurifères (Kjeldsen, 1999) et, avec les polluants phénoliques liés à l'industrie du schiste bitumineux, elle représente 2 % des contaminants du sol. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), qui représentent 12 % des contaminants du sol, sont des polluants environnementaux omniprésents générés principalement par la combustion incomplète de matières organiques (p. ex. charbon, pétrole, essence et bois). Les HAP s'accumulent dans le sol en raison de leur persistance et de leur hydrophobicité ; ils ont tendance à être retenus dans le sol pendant de longues périodes. Pour cette raison, la plupart des HAP sont des composants de polluants organiques persistants (POP) et sont répandus dans l'air, l'eau, le sol et les sédiments (Lin et al., 2013). Bien que les émissions d'HAP provenant d'activités anthropiques prédominent, certains HAP présents dans l'environnement proviennent de sources naturelles telles que les feux à ciel ouvert, les pertes naturelles ou l'infiltration de gisements de pétrole ou de charbon, et les activités volcaniques. Les principales sources anthropiques de HAP incluent le chauffage résidentiel, les usines de gazéification et de liquéfaction du charbon, le noir de carbone, la production d'asphalte, les activités connexes de l'industrie pétrolière ainsi que les échappements des véhicules automobiles. Les émissions du trafic et la combustion de combustibles fossiles sont les principales sources identifiées de HAP dans les zones urbaines (Fabińska et al., 2016 ; Keyte et al., 2013).

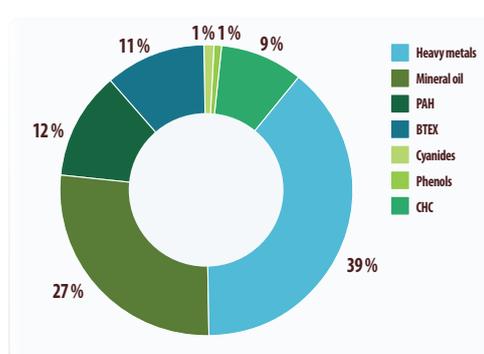


Schéma 1. Aperçu des contaminants affectant les sols Européens

<sup>2</sup> État des ressources en sols du monde - Résumé technique. FAO et ITPS, 2015. <http://www.fao.org/3/a-i5126f.pdf>

### 1.1 Portée de la présente ligne directrice

Les économies industrialisées et les pays en développement sont touchés par la pollution des sols due aux activités extractives et industrielles, à l'élimination inappropriée des déchets et à l'agriculture mécanisée qui pourrait avoir des effets sur la productivité des cultures et la santé humaine. Parce que la pollution des sols représente un problème important et, parfois, sous-estimé, cette ligne directrice vise à présenter aux autorités locales les recommandations recueillies et élaborées ainsi que les résultats obtenus dans le cadre du projet LIFE BIOREST. Le projet a été conçu pour démontrer l'efficacité et la rentabilité d'une solution innovante et durable pour la bioremédiation des terres contaminées par des hydrocarbures, basée sur l'utilisation de souches bactériennes et fongiques à fort potentiel de dégradation, par la valorisation de sous-produits agroalimentaires.

L'information contenue dans ce document n'a pas pour but de fournir une indication détaillée sur la conception d'un programme de traitement de bioremédiation, mais de fournir un modèle d'application d'une technique de bioremédiation dans les municipalités qui sont touchées par des sites contaminés, en utilisant l'étude de cas du site de Fidenza, où le projet LIFE BIOREST a été réalisé.

En outre, la directive vise à soutenir le partenariat public-privé et à montrer les avantages et les inconvénients de la technique implantée qui peut être présentée aux industries, aux organismes publics, aux gouverneurs des pays et à la communauté.

Le cadre législatif européen relatif à la contamination des sols a été analysé dans le but de comparer l'adaptation législative des trois pays où LIFE BIOREST a été mis en œuvre (Italie, Espagne et France) aux directives européennes.

Comme analysé en profondeur dans le document, dans les 3 pays de l'UE, la pollution par les hydrocarbures est l'urgence la plus fréquente en termes de pollution et de besoin d'assainissement.

Ces polluants, comparés aux oligo-éléments, peuvent être dégradés par les micro-organismes et les plantes. Pour cette raison, LIFE BIOREST pourrait constituer un modèle d'application du traitement de bioremédiation aux sites contaminés, avec un grand potentiel de diffusion en Europe.

### 1.2 cadre législatif européen sur la contamination des sols

8

Les exigences juridiques relatives à la protection générale des sols n'ont pas fait l'objet d'un accord au niveau de l'Union européenne (UE) et, actuellement, seuls quelques États membres de l'UE possèdent une législation spécifique sur la protection des sols.

Par conséquent, le sol n'est pas soumis à un ensemble complet et cohérent de règles dans l'UE. Les politiques communautaires existantes dans des domaines tels que l'agriculture, l'eau, les déchets, les produits chimiques et la prévention de la pollution industrielle contribuent indirectement à la protection des sols, mais elles ne sont pas suffisantes pour garantir un niveau de protection approprié pour tous les sols présents en Europe. Étant donné que les sols sont continuellement utilisés de manière non durable, la Commission européenne a adopté en 2006 une stratégie thématique sur la protection des sols<sup>3</sup> (22 septembre 2006) dans le but de protéger tous les sols de l'UE. En 2014, la Commission a décidé de retirer la proposition de directive-cadre sur les sols mais, avec le Septième programme d'action pour l'environnement<sup>4</sup> de janvier 2014, la dégradation des sols a été reconnue comme un défi majeur. Il indique que d'ici 2020, les terres devraient être gérées de manière durable dans tous les États membres de l'UE, les sols devraient être convenablement protégés et l'assainissement des sites contaminés devrait être bien développé. Différentes directives européennes prévoient des contrôles indirects de la contamination du sol ainsi que des conseils pour sa gestion, comme la directive relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution (IPPC 2008/1/CE), la directive-cadre relative aux déchets (2008/98/CE) et la directive concernant la mise en décharge (99/31/CE). En outre, la directive sur les émissions industrielles (IED 2010/75/UE), qui a abrogé la directive de l'IPCC en 2014, fournit un cadre réglementaire pour prévenir les émissions dans le sol des grandes installations industrielles.

Le tableau ci-dessous donne un aperçu des objectifs nationaux existants. Il s'agit notamment de divers formulaires, comme le renvoi à des échéanciers pour l'assainissement de la contamination historique ou à des mesures de gestion précises ou à des listes de sites prioritaires nationaux. Au total, 17 pays font état d'objectifs stratégiques officiels pour la gestion des sites contaminés.

<sup>3</sup> Stratégie thématique en faveur de la protection des sols (COM(2012) 46) - 2006: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A52012DC0046>

<sup>4</sup> 7e PAE - 2013 : <https://ec.europa.eu/environment/action-programme/>

**Tableau 1.** Vue d'ensemble des politiques nationales et des directives de l'UE concernant spécifiquement la contamination des sols (Source: Status of local soil contamination in Europe - Rapport technique du CCR, 2018).

1986	Directive sur les boues d'épuration <sup>5</sup> Réglementation de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture afin de prévenir les effets nocifs sur les sols et de fixer des valeurs limites pour les métaux lourds dans les sols.
1987	<b>Pays-Bas</b> - Loi sur la protection des sols
1988	
1989	<b>Autriche</b> - Loi sur l'assainissement des sites contaminés
1990	
1991	Directive sur les nitrates <sup>6</sup> Protection des eaux de surface et des eaux souterraines contre la pollution par les nitrates d'origine agricole.
1992	Directive Habitats <sup>7</sup> Atteindre un état de conservation favorable dans l'ensemble de l'aire de répartition naturelle de l'UE et réduire la pollution des habitats, réduisant ainsi la contamination des sols.
1993	
1994	<b>Finlande</b> - Loi sur les déchets <b>Estonie</b> - Gestion des sites contaminés
1995	<b>Belgique (Flandre)</b> - Décret relatif à l'assainissement et à la protection des sols <b>Suisse</b> - Loi sur la protection de l'environnement (LPE)
1996	<b>Hongrie</b> - La décision n° 2205/1996 (VII.24) a adopté le programme national d'assainissement de l'environnement (avant de faire partie de l'UE) <b>Slovénie</b> - Décret sur les valeurs limites, les seuils d'alerte et les niveaux critiques de substances dangereuses dans le sol
1997	
1998	<b>Allemagne</b> - Loi fédérale sur la protection des sols
1999	Directive sur la mise en décharge <sup>8</sup> Prévention/réduction des effets négatifs de la mise en décharge des déchets sur l'environnement tout au long du cycle de vie de la décharge. <b>Danemark</b> - Loi sur la contamination des sols <b>Italie</b> - Règlement établissant les critères, procédures et méthodes pour la sécurité, la régénération et la restauration des sites pollués <b>Luxembourg</b> - Loi sur les établissements classés
2000	Directive-cadre sur l'eau <sup>9</sup> Prévention et réduction de la pollution; les principaux polluants sont énumérés et des seuils sont fixés. <b>France</b> - Code de l'environnement <b>Royaume-Uni</b> - Régime des terres contaminées (Partie 2A de la loi sur la protection de l'environnement, 1990) <b>Finlande</b> - Loi sur la protection de l'environnement

<sup>5</sup> Directive 86/278/CEE du Conseil relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture: <https://eurlex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:31986L0278>

<sup>6</sup> Directive 91/676/CEE du Conseil concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?qid=1561542776070ri=CELEX:01991L0676-20081211>

<sup>7</sup> Directive 92/43/CEE du Conseil concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:31992L0043>

<sup>8</sup> Directive 1999/31/CE du Conseil concernant la mise en décharge des déchets: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX:31999L0031>

<sup>9</sup> Directive 2000/60/CE établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau: <https://eurlex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32000L0060>

2001	Directive sur l'évaluation environnementale stratégique <sup>10</sup> Réduction de l'impact environnemental des plans et programmes sur l'environnement, y compris les sols. <b>Lettonie</b> - Loi sur la pollution
2002 2003	<b>Chypre</b> - Loi sur la lutte contre la pollution de l'eau et du sol
2004	Directive sur la responsabilité environnementale (DRE) <sup>11</sup> Établissement d'un cadre fondé sur le principe du pollueur-payeur (PPP) pour prévenir et réparer les dommages environnementaux causés aux sols, aux écosystèmes et aux ressources en eau si la santé humaine est affectée. <b>Belgique (Bruxelles-Capitale)</b> - Ordonnance sur la gestion et l'assainissement des sols <b>Belgique (Wallonie)</b> - Décret sur la gestion des sols <b>Slovaquie</b> - Loi sur la protection des sols <b>Suède</b> - Règlement relatif à l'indemnisation des dommages dus à la contamination et aux aides d'État visant à remédier à la situation (application du code suédois de l'environnement de 1999)
2005	<b>Hongrie</b> - Décret relatif aux règles concernant les études de sélection sur la réhabilitation des sites à assainir <b>Espagne</b> - Décret relatif à la définition des activités et critères de pollution des sols
2006	Stratégie thématique en faveur de la protection des sols (STS) <sup>12</sup> Protection des sols par la prévention de la dégradation des sols et la restauration des sols dégradés, y compris ceux qui sont contaminés. Directive sur la gestion des déchets de l'industrie extractive <sup>13</sup> Introduction de mesures visant à prévenir ou à réduire au minimum tout effet négatif sur l'environnement et la santé résultant de la gestion des déchets de l'industrie extractive. <b>Irlande</b> - Loi sur l'énergie. Sites miniers historiques - inventaire et classification des risques <b>Italie</b> - Code environnemental <b>Lituanie</b> - Réglementation sur les procédures de traitement des sites contaminés
2007	<b>Bulgarie</b> - Loi sur les sols <b>Finlande</b> - Décret gouvernemental sur l'évaluation de la contamination des sols et des besoins d'assainissement <b>Roumanie</b> - Décret sur l'assainissement <b>Slovaquie</b> - Loi sur la prévention et la réparation des dommages environnementaux
2008	Directive-cadre sur les déchets <sup>14</sup> Mise à disposition de la base pour l'assainissement des sites d'élimination des déchets historiques contaminés. <b>République tchèque</b> - Loi relative à la prévention des dommages environnementaux et à leur réparation
2009	Directive-cadre sur les pesticides <sup>15</sup> Prévention de la contamination de l'environnement par les pesticides. <b>Belgique (Bruxelles-Capitale)</b> - Arrêté du 5 mars 2009 relatif à l'assainissement et à la gestion des sols modifié le 23 juin 2017

<sup>10</sup> Directive 2001/42/CE relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32001L0042>

<sup>11</sup> Directive 2004/35/CE sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM:l28120>

<sup>12</sup> Stratégie thématique en faveur de la protection des sols[SEC(2006)620][SEC(2006)1165]:<https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/FR/TXT/?uri=CELEX:52006DC0231>

<sup>13</sup> <https://ec.europa.eu/environment/waste/mining/index.htm>

<sup>14</sup> Directive 2008/98/CE relative aux déchets et abrogeant certaines directives: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/FR/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>

<sup>15</sup> Directive 2009/128/CE instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0128&from=FR>

2010	<p>Directive sur les émissions industrielles<sup>16</sup> Prévention, réduction et élimination (si possible) de la pollution résultant des activités industrielles. Les États membres se sont engagés à établir des inventaires des émissions de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et de poussières ainsi qu'à produire un rapport de référence pour établir l'état de la contamination des sols et des eaux souterraines. <b>Serbie</b> - Règlement relatif au programme de surveillance systématique de la qualité des sols, aux indicateurs d'évaluation de la dégradation des sols et à la méthodologie d'élaboration du programme d'assainissement</p>
2011	<p>Directive sur l'évaluation des incidences sur l'environnement<sup>17</sup> Évaluation des effets environnementaux des projets publics et privés susceptibles d'avoir des effets importants sur l'environnement. Stratégie de la biodiversité<sup>18</sup> Réduction de la perte de biodiversité et des services écosystémiques dans l'UE et contribution à l'arrêt du déclin de la biodiversité mondiale d'ici 2020, par la promotion de sols sains. <b>Espagne</b> - Loi sur les déchets et les sols contaminés</p>
2012	<b>Malte</b> - Politique nationale sur l'environnement
2013	
2014	<b>Croatie</b> - Ordonnance sur la protection des terres agricoles contre la pollution
2015	<b>Serbie</b> - Loi sur la protection des sols
2016	<p>Réglementation du mercure<sup>19</sup> Identification et évaluation des sites contaminés par le mercure, y compris un inventaire des sites contaminés et l'inclusion d'une liste des principaux composés du mercure. <b>Grèce</b> - Loi pour la protection et l'utilisation durable des sols (en préparation) <b>Pologne</b> - Évaluation de la contamination de la surface terrestre (en préparation)</p>
2017	<p><b>Portugal</b> - Régime juridique de prévention de la contamination et d'assainissement des sols (en préparation) <b>Slovénie</b> - Décret sur l'état des sols et les règles relatives à l'état des sols (en préparation)</p>

### 1.3 Droit de l'environnement pour la pollution des sols en Italie

En Italie, la pollution des sols représente un problème très répandu en raison des zones industrielles, des décharges et des zones commerciales et d'extraction. Malgré la gravité de l'incidence et des atteintes à la santé montrées par la littérature scientifique (Brevik, 2013 ; Burgess, 2013 ; Jordão et al., 2006), le problème de la pollution des sols ne semble pas être perçu par l'opinion publique de la même manière que la pollution atmosphérique et hydrique, même si elle y est indirectement liée. Une faible perception de l'urgence environnementale de l'opinion publique est démontrée par le rapport de la FAO (Rodríguez-Eugenio et al. 2018), qui définit la pollution des sols comme une "réalité cachée", étant plus difficile à identifier, à mesurer et à étudier au fil des ans.

L'évolution des dispositions légales, en matière de réduction et de traitement de la pollution, souffre de cette perception différente. La première mesure de lutte contre la contamination de l'environnement est inscrite dans la loi n° 615/1966<sup>20</sup> relative aux "Mesures contre la pollution atmosphérique", qui vise à réglementer et à réduire les émissions de fumées, gaz, poussières et odeurs des industries et des moyens de transport, en reconnaissant les dommages indirects pour la santé humaine. Avec l'introduction de la loi n° 319/1976<sup>21</sup> (alors abrogée par le

<sup>16</sup> Directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution):

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32010L0075>

<sup>17</sup> Directive 2004/35/CE sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:32004L0035>

<sup>18</sup> Communication de la Commission {COM/2011/244 final} Notre assurance vie, notre capital naturel : une stratégie de l'UE pour la biodiversité à l'horizon 2020

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0244&from=FR>

<sup>19</sup> Règlement (UE) 2017/852 sur le mercure et abrogeant le règlement (CE) n° 1102/2008 <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32017R0852>

<sup>20</sup> [https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=1966-08-13&atto.codiceRedazionale=066U0615&elenco30giorni=false](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=1966-08-13&atto.codiceRedazionale=066U0615&elenco30giorni=false)

<sup>21</sup> [http://www.reteambiente.it/repository/normativa/761\\_legge\\_merli.pdf](http://www.reteambiente.it/repository/normativa/761_legge_merli.pdf)

<sup>22</sup> [https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171)

décret-loi n° 152/2006<sup>23</sup>), les règles de protection de l'eau contre la pollution ont été définies, ce qui représente un point de départ pour une attention croissante aux questions environnementales qui a conduit à la création d'un ministère spécifique de la Politique environnementale. Le Ministère de l'Environnement, de la Protection du territoire et de la mer, créé en 1986 par la mesure n° 349<sup>23</sup>, a pour mission d'assurer que la promotion, la conservation et la restauration des conditions environnementales se font dans le respect des intérêts fondamentaux de la collectivité et de la qualité de vie, ainsi que la conservation et la valorisation du patrimoine naturel national et la défense des ressources naturelles contre la pollution (Art.1).

La création de cet organe directeur coïncide avec la définition d'un cadre politique pour une surveillance territoriale constante en matière de pollution de l'environnement.

Avec la loi n° 22/1997<sup>24</sup> (également abrogée par le décret-loi 152/2006), les directives de l'UE concernant les déchets ont été transposées, introduisant le concept de déchet comme ressource.

La première loi relative à l'assainissement environnemental des sols est représentée par le décret ministériel n° 471/1999<sup>25</sup>, qui définit les critères et procédures d'identification, de sécurisation, d'assainissement et de restauration environnementale des sites pollués.

Le décret-loi n° 152/2006<sup>26</sup>, en matière de législation environnementale, a remplacé le précédent décret n° 471/1999. La nouvelle réglementation redéfinit les procédures administratives dont l'objectif premier est de promouvoir le niveau de qualité de la vie humaine, qui doit être atteint par la protection et l'amélioration des conditions environnementales et l'utilisation rationnelle des ressources naturelles (art. 2).

Dans le décret-loi 152/2006, un site contaminé est défini comme un site dans lequel les valeurs des seuils de concentrations de risque, déterminées par l'application de la procédure d'analyse des risques, sont dépassées.

Cette définition se réfère à toutes les zones dans lesquelles, en raison d'activités humaines en cours ou achevées, un niveau modifié des caractéristiques du sol, du sous-sol et des eaux souterraines a été établi, représentant ainsi un risque pour la santé humaine. Le décret-loi 152/2006 précise la typologie des sols contaminés présents sur le territoire et les procédures administratives concernant leur identification et leur gestion.

### 1.4 Droit de l'environnement pour la pollution des sols en Espagne

12

En Espagne, les principales règles régissant la pollution des sols sont énoncées dans la loi n° 22/2011<sup>27</sup> sur les déchets et les sols pollués et dans le décret espagnol n° 9/2005<sup>28</sup> sur l'établissement d'une liste des activités potentiellement polluantes et les critères de déclaration des sols pollués.

Le décret espagnol sur les sols présente un cadre réglementaire pour la définition des activités industrielles potentiellement contaminantes et indique la méthodologie pour la détermination de repères génériques de contaminants, principalement dérivés par application de l'analyse des risques. Le décret comprend une liste de repères pour 60 substances prioritaires. Il considère les diversités écologiques et géologiques des sols dans les différentes régions espagnoles, défiant une approche flexible qui comprend des niveaux plus profonds.

Dans le décret, 3 typologies différentes d'utilisation des sols sont prises en considération : industrielle, résidentielle et naturelle, en tenant compte des objectifs humains et, pour la troisième typologie, également des objectifs écosystémiques.

La loi 22/2011 sur les déchets et les sols contaminés prévoit l'obligation d'établir un registre des sites assainis. Les autorités régionales en sont responsables. D'autres règles traitent de la pollution des sols sous différents angles, comme le décret-loi royal n° 1/2016<sup>29</sup>, sur la prévention et la réduction intégrées de la pollution ainsi que la loi n° 26/2007<sup>30</sup> sur la responsabilité environnementale.

<sup>23</sup> [https://www.minambiente.it/sites/default/files/legge\\_08\\_07\\_1986\\_349.pdf](https://www.minambiente.it/sites/default/files/legge_08_07_1986_349.pdf)

<sup>24</sup> [http://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1997\\_0022.htm](http://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1997_0022.htm)

<sup>25</sup> <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1999/12/15/099G0540/sg>

<sup>26</sup> [https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171)

<sup>27</sup> Déchets et sols contaminés <https://www.global-regulation.com/translation/spain/1436517/law-22-2011-2c-28-july-2c-wasteand-contaminated-soils.html>

<sup>28</sup> <https://www.global-regulation.com/translation/spain/1448611/royal-decree-9-2005-252c-of-14-january-252c-which-establishes-the-relationship-of-potentially-polluting-activities-of-the-soil-and-the-criteria-and-standards.html>

<sup>29</sup> <https://gettingthedealthrough.com/area/13/jurisdiction/21/environmentspain/#targetText=There%20is%20a%20system%20of,industries%20that%20meet%20certain%20parameters.>

<sup>30</sup> <https://iclg.com/practice-areas/environment-and-climate-change-laws-and-regulations/spain>

La déclaration d'une terre comme étant polluée, fondée sur la notion de risque (pour la santé humaine ou l'environnement) et l'utilisation des terres, doit être faite par les autorités régionales sur la base des critères énoncés dans le décret n° 9/2005, qui établit une distinction entre les utilisations industrielles, urbaines ou autres des terres.

Les personnes tenues de nettoyer le site sont les pollueurs, le propriétaire du site pollué et éventuellement le possesseur.

La déclaration d'un sol comme étant pollué doit être inscrite au registre foncier et ne peut être enlevée que lorsque les autorités régionales confirment que le nettoyage a été dûment effectué et qu'il n'y a pas de risque pour la santé humaine ou l'environnement.

### *1.5 Droit de l'environnement pour la pollution des sols en France*

La seule loi de gestion et de dépollution des sols en France est représentée par la loi n° 19/1976<sup>31</sup>, relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (loi ICPE) qui a été assimilée à la loi sur l'environnement du 21 septembre 2000<sup>32</sup> et par la directive 2004/35/CE<sup>33</sup> sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux (directive sur la responsabilité environnementale). Cette dernière a été mise en œuvre en France par la loi relative à la responsabilité environnementale et à l'adaptation de diverses dispositions à la loi environnementale de l'UE de 2008<sup>34</sup>, qui concerne les dommages environnementaux causés au sol qui présentent un risque pour la santé humaine.

En ce qui concerne la loi relative aux ICPE, une stratégie nationale comprenant l'inventaire des sites contaminés et des lignes directrices pour leur caractérisation a été introduite. Cette loi définit les activités productives, telles que les industries, les laboratoires, les chantiers, qui pourraient présenter des inconvénients pour la santé publique, l'agriculture, l'environnement et la protection du paysage.

La politique nationale et les mesures à appliquer sont définies par deux documents clés représentés par les circulaires du Ministère de l'Environnement de décembre 1993 et de décembre 1999<sup>35</sup>, définissant les principales caractéristiques d'une politique nationale pour les sites contaminés. En particulier, la circulaire de 1999 indique les principes d'identification des objectifs d'assainissement, sur la base d'une analyse détaillée des risques et d'une évaluation technico-économique des alternatives d'intervention.

Le Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES) est chargé de définir les politiques publiques en matière de terrains contaminés, que la contamination soit d'origine naturelle ou humaine et qu'elle soit liée ou non à la politique des ICPE.

<sup>31</sup> [https://aida.ineris.fr/consultation\\_document/2193](https://aida.ineris.fr/consultation_document/2193)

<sup>32</sup> [http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?e=183&Ca=1&Cy=3&DocID=B&DocTitle=Policy\\_and\\_regulatory&T=France#targetText=France%20has%20no%20specific%20legislation,%2C%201977%20\(see%20below\)](http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?e=183&Ca=1&Cy=3&DocID=B&DocTitle=Policy_and_regulatory&T=France#targetText=France%20has%20no%20specific%20legislation,%2C%201977%20(see%20below))

<sup>33</sup> Directive 2004/35/CE sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM:l28120>

<sup>34</sup> [https://www.citizensinformation.ie/en/environment/environmental\\_law/eu\\_environmental\\_law.html#targetText=Environmental%20crime%20covers%20acts%20that,the%20environment%20and%20human%20health.&targetText=Directive%202008%2F99%2FEC%20on,adopted%20on%2028%20October%202008](https://www.citizensinformation.ie/en/environment/environmental_law/eu_environmental_law.html#targetText=Environmental%20crime%20covers%20acts%20that,the%20environment%20and%20human%20health.&targetText=Directive%202008%2F99%2FEC%20on,adopted%20on%2028%20October%202008)

<sup>35</sup> [http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?e=183&Ca=1&Cy=3&DocID=B&DocTitle=Policy\\_and\\_regulatory&T=France](http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?e=183&Ca=1&Cy=3&DocID=B&DocTitle=Policy_and_regulatory&T=France)

## 2. Cartographie des sites pollués dans les zones d'essai du projet LIFE BIOREST de l'UE

Le projet LIFE BIOREST est l'auteur d'un instantané de l'étendue des sites pollués en Italie, en Espagne et en France où le projet a été réalisé. Il s'est avéré que la situation était fragmentée, notamment en ce qui concerne l'harmonisation des critères et des informations disponibles dans les registres nationaux et régionaux.

Les sites pollués les plus importants en Italie sont les sites d'intérêt national (Siti di Interesse Nazionale, SIN), classés en fonction de l'ampleur de la contamination environnementale, du risque sanitaire et de l'alarme sociale (DM 471/1999<sup>36</sup>). Ces zones sont définies par le décret-loi 152/2006<sup>37</sup>, qui indique les caractéristiques du site, la concentration et les dangers des polluants actuels et l'impact environnemental au niveau sanitaire et environnemental. Le programme national d'assainissement, établi par le ministère de l'Environnement, fournit périodiquement un cadre à jour sur l'état de contamination du SIN. Actuellement, 41 SIN (mis à jour jusqu'en 2018) ont été classés, y compris le site de Fidenza où se déroulent les activités d'essai du projet LIFE BIOREST.

Les SIN comprennent les sites industriels désaffectés, où des activités de conversion sont en cours, qui font l'objet d'accidents impliquant le déversement de polluants chimiques ainsi que les zones soumises à l'élimination incontrôlée de déchets, même dangereux. Presque toutes les 20 régions italiennes ont au moins un SIN, à l'exception de Molise. Le sol contaminé occupe une superficie totale de 51 403,5 hectares, soit environ trois fois l'extension de la ville métropolitaine de Milan. Les plans de caractérisation ont jusqu'à présent concerné 57,3% de l'ensemble des zones périmétriques (29 453,9 hectares), et dans 94,7% des cas ils ont été mis en œuvre. Il y a 1 574,5 hectares affectés par les mesures de prévention, soit environ 3% du périmètre total, où des solutions sont appliquées pour réduire l'impact des substances toxiques sur l'environnement et la santé humaine.

En résumé, les activités d'assainissement n'ont jusqu'à présent concerné que 12,6% du total des zones de SIN (6,513,1 hectares, selon la dernière analyse nationale de juin 2018).

**Tableau 2.** État de l'art des superficies pour les matrices de sol concernant 41 SIN, les chiffres se réfèrent aux superficies en hectares (ha), le % d'assainissement est calculé sur les superficies totales (données élaborées à partir du rapport du ministère de l'Environnement sur les SIN, 2018<sup>38</sup>).

14

SIN	% d'assainissement 2018	Mesures préventives	Projets d'assainissement Présentés	Projets d'assainissement Approuvés	Zones assainies	Superficies totales
1 - Venise	15%	0	1146	1055	241	1618
2 - Naples Orientale	6%	89	174	127	50	834
3 - Gela	0%	0	120	101	4	795
4 - Priolo	8%	11	1000	733	449	5814
5 - Manfredonia	18%	8	67	42	38	216
6 - Brindisi	6%	0	723	692	378	5851
7 - Tarente	8%	12	341	335	347	4383
8 - Cengio et Saliceto	0%	0	77	77	0	77
9 - Piombino	45%	0	239	121	422	931
10 - Massa et Carrare	5%	0	46	29	5	116
11 - Casale Monferrato	aucune donnée	aucune donnée	aucune donnée	aucune donnée	aucune donnée	aucune donnée
12 - Balangero	0%	305	52	16	0	314
13 - Pieve Vergonte	0%	0	42	42	0	42
14 - Sesto San Giovanni	32%	56	215	113	82	255
15 - Pioltello-Rodano	13%	36	72	28	11	85
16 - Naples Bagnoli Coriglio	0%	0	234	234	0	249
17 - Tito	4%	25	25	25	13	315

<sup>36</sup> <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1999/12/15/099G0540/sg>

<sup>37</sup> [https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171)

<sup>38</sup> <https://annuario.isprambiente.it/ada/downreport/html/6798>

18 - Crotona-Cassano-Cerchiara	13%	7	150	135	69	544
19 - Fidenza	8%	11	23	23	2	25
20 - Caffaro Torviscosa	0,49%	0	200	10	1	201
21 - Trieste	7%	0	162	124	29	435
22 - Cogoleto	0%	0	33	10	0	45
23 - Bari	0%	1	11	11	0	14,5
24 - Sulcis Iglesias Guspinese	8%	117	1029	922	904	19751
25 - Biancavilla	1%	25	25	25	0	330
26 - Livourne	0%	0	206	0	0	206
27 - Terni	28%	638	6	6	181	655
28 - Émarèse	0%	15	16	16	0	23
29 - Trento Nord	0%	0	11	11	0	24
30 - Brescia	1%	0	43	43	4	262
31 - Broni	1%	13,5	9,8	9,8	0,1	15
32 - Falconara Marittima	0%	0	3	3	0	101
33 - Serravalle Scrivia	0%	0	7	7	0	74
34 - Lacs de Mantoue	3%	0	188	63	19	614
35 - Orbetello	0%	0	0	0	0	204
36 - Porto Torres	12%	0	944	157	226	1874
37 - Val Basento	88%	96	30	23	2925	3330
38 - Milazzo	20%	59	110	110	111	549
39 - Bussi sul Tirino	1%	50	12	0	2	232
40 - Bassin de la rivière Sacco	aucune donnée					
41 - Bologne Officine Grandi Riparazioni ETR	aucune donnée					
<b>TOTAL</b>	<b>13%</b>	<b>1574,5</b>	<b>7791,8</b>	<b>5478,8</b>	<b>6513,1</b>	<b>51403,5</b>

Les principales causes de contamination dans 66 % des SIN sont liées aux activités industrielles (46 %) et aux anciennes zones industrielles abandonnées (20 %). 12 % des SIN sont composés d'anciennes zones d'extraction de l'amiante : Casal Monferrato, Broni, Emarese et le Baliano Amiantifera dans le Piémont, la plus grande mine d'amiante en Europe avec un risque élevé d'apparition de maladies oncologiques pulmonaires. 10% des SIN sont représentés par des zones portuaires (Tarente et Venise, Falconara Marittima et Trieste) fortement polluées par des métaux lourds et des hydrocarbures. Les décharges (5%) et les zones d'activités industrielles et minières complexes (7%) sont également incluses et présentent une variété de contaminants différents (Val Basento, Crotona-Cassano-Cerchiara).

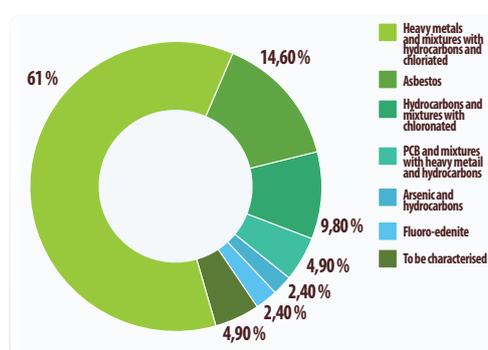


Schéma 2. Contamination des SIN selon la typologie des polluants prévalents.

L'analyse chimique des SIN a révélé une prédominance des métaux lourds, des composés chlorés, des hydrocarbures, des pesticides et des herbicides, qui représentent 61 % du total des contaminants. Les polluants les plus répandus sont l'amiante (dans 14,6 % des SIN), les hydrocarbures (9,8 %), les biphényles polychlorés (4,9 %), l'arsenic (2,4 %) et le fluoro-édénite (2,4 %). Les hydrocarbures sont présents dans 53,7 % des SIN. Les sites de Gela, Fidenza, des Lacs de Mantoue, de Val Basento et Sulcis Iglesias Guspinese présentent une importante contamination aux hydrocarbures. Il s'agit de données traitées à partir de l'évaluation des sources de pollution enregistrées dans les rapports de caractérisation technique effectués aux SIN et à partir des informations mises à disposition par les bureaux d'enregistrement régionaux.

En ce qui concerne la cartographie de la pollution des sols en Espagne, le tableau ci-dessous indique le nombre total de sites contaminés recensés dans la région d'Andalousie, divisé par provinces : Cordoue est la ville avec le nombre le plus élevé de sites (5 676), suivie de Séville (4 986) et Grenade (4 238).

Tableau 3. Nombre total de sites contaminés recensés dans les 8 provinces de la région d'Andalousie. (Données issues de <http://descargasrediam.cica.es/>)

	Almería	Cádiz	Córdoba	Granada	Huelva	Jaén	Málaga	Sevilla	TOTAL
N. emplazamientos inventariados	2841	2404	5676	4238	1580	2540	4712	4986	29277

Il manque des informations détaillées sur la typologie de la pollution. Une carte au niveau national du ministère de l'Énergie (Schéma 3) montre cependant une large répartition des zones avec des concessions pour les hydrocarbures. La carte montre en effet plusieurs zones à risques pour les activités liées aux hydrocarbures en Espagne, avec une très forte concentration dans la région d'Andalousie. Ce résultat est particulièrement pertinent pour les activités du projet LIFE BIOREST étant donné l'emplacement de l'unité de la CSIC dans cette région, ce qui peut permettre une meilleure diffusion des protocoles à élaborer dans les prochaines étapes du projet.

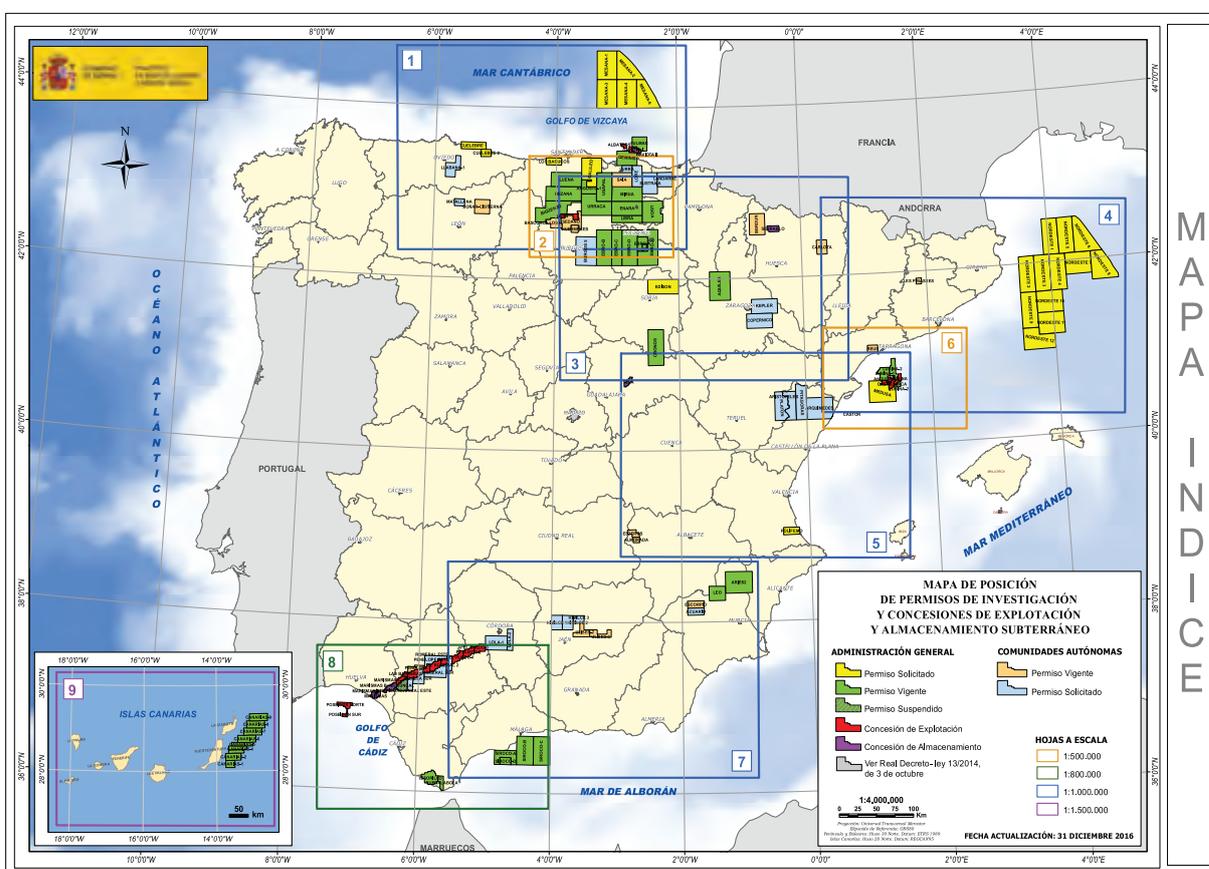
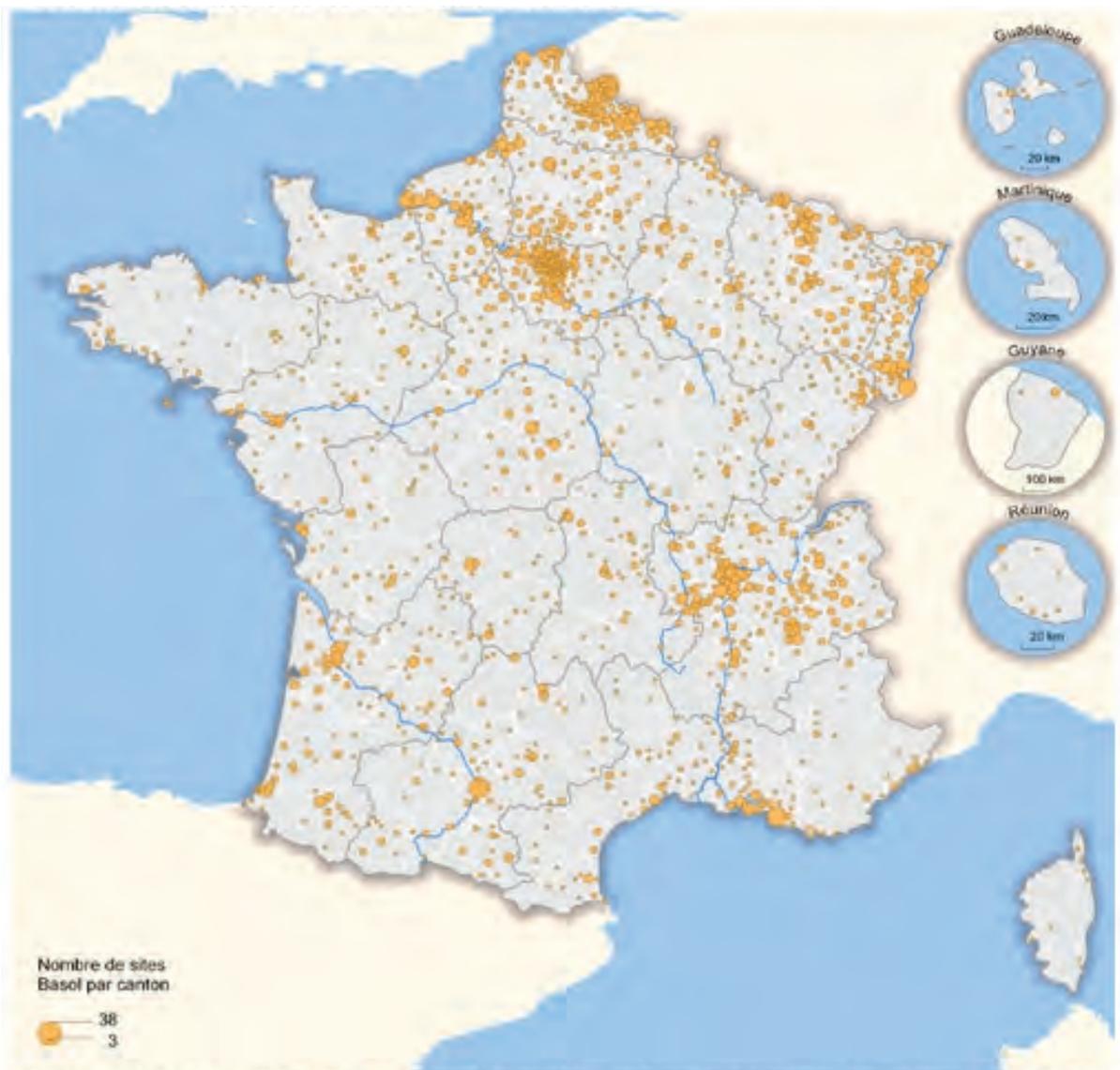


Schéma 3. Carte de l'Espagne montrant la concession et les licences totales pour les hydrocarbures.

Un inventaire de la pollution des sols en France recense 4 142 sites (mise à jour en 2012) répartis sur le territoire national. Les hydrocarbures sont la principale cause de pollution, affectant 33 % des sols et des eaux contaminés. Ce pourcentage ne concerne cependant que les hydrocarbures linéaires: en incluant les hydrocarbures aromatiques, les hydrocarbures chlorés et les BTEX, il atteint 67 % tant pour les sols que pour les eaux.

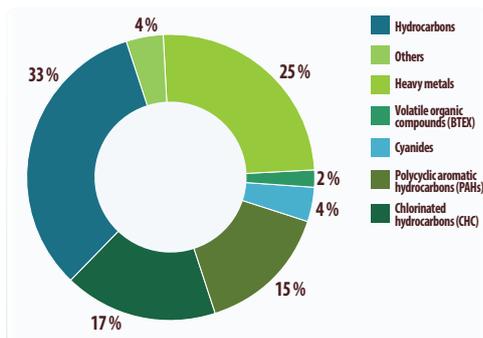
Les sites et sols pollués début 2012  
 (sites sur lesquels l'état a entrepris des actions de remédiation au 16 janvier 2012)



Note: sites de la base de données Basol faisant l'objet d'action de surveillance ou de réhabilitation.  
 Source: Medde, DGPR (Basol au 16 janvier 2012), 2012. Traitements: SOeS, 2012

Schéma 4. Carte de la France montrant l'emplacement des sites pollués.

### SOL



### EAU

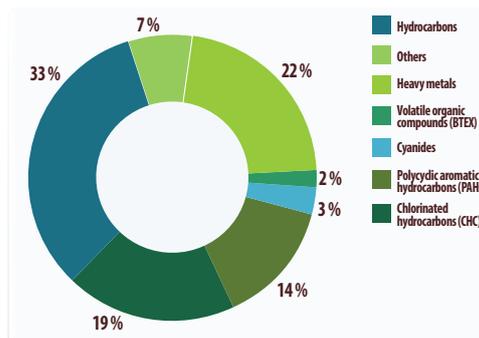


Schéma 5. Classification des sites pollués selon les classes chimiques: les sols sont indiqués à gauche, l'eau à droite.

## 3. Techniques de bioremédiation

La polyvalence nutritionnelle des micro-organismes peut être exploitée pour le processus de biodégradation des polluants ou bioremédiation. Ce processus est basé sur la capacité de certains micro-organismes à convertir, modifier et utiliser les polluants toxiques pour leur développement et leur croissance (Tang et al., 2007). La bioremédiation est une activité micro-biologique bien organisée appliquée pour décomposer ou transformer les contaminants en composés moins toxiques ou non toxiques (Abatenh et al., 2017). Le choix de la technique de bioremédiation doit tenir compte de la nature des polluants (produits agrochimiques, composés chlorés, hydrocarbures, métaux lourds), de l'ampleur de la pollution, des concentrations de contaminants, des propriétés physico-chimiques du sol à traiter, du coût du traitement et des politiques environnementales.

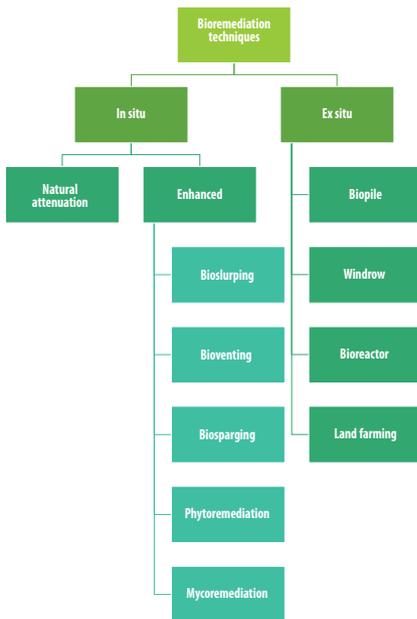


Schéma 6. Techniques d'assainissement des sols in situ et ex situ.

Les micro-organismes représentent une alternative écologique aux procédés d'assainissement conventionnels et un matériel génétique prometteur et précieux pour résoudre les menaces environnementales.

La bioremédiation peut se faire par des techniques in situ ou ex situ, en fonction de plusieurs facteurs tels que le coût, les caractéristiques du site ainsi que le type et la concentration des polluants.

**In situ** les techniques de bioremédiation comprennent le traitement des substances polluées sur le site de la pollution, sans aucune excavation. Elles représentent une alternative moins coûteuse aux technologies ex situ, puisque le coût du processus d'excavation n'est pas nécessaire et que la dispersion des contaminants est négligeable. Les techniques de bioremédiation in situ ont été appliquées avec succès dans le traitement du sol à partir de solvants chlorés, de colorants, de métaux lourds et d'hydrocarbures (Azubuike et al., 2016 ; Frascari et al., 2015 ; Kim et al., 2014).

**Ex situ** es techniques de bioremédiation impliquent l'excavation de polluants provenant de sites pollués et leur transport ultérieur vers un autre site pour y être soumis au traitement. La réalisation des objectifs d'assainissement en termes de coûts et de délais compétitifs dépend d'un large éventail de paramètres d'optimisation, dont le suivi nécessite une grande expertise applicative (Sofo, 2010).

18

### 3.1 In situ

On peut distinguer deux grandes catégories parmi les techniques de bioremédiation in situ :

**L'atténuation naturelle:** es contaminants sont laissés sur place, ce qui permet aux processus naturels de nettoyer le site. Le succès de l'atténuation naturelle dépend de la géologie, de l'hydrologie et de la microbiologie du sous-sol et elle est sujette à des changements hydrologiques, prenant un temps considérable pour éliminer les contaminants du sol. Elle est principalement utilisée pour les BTEX et les hydrocarbures chlorés (Mulligan, 2004).

**L'amélioration de la bioremédiation:** des champignons, des bactéries et des végétaux ou des nutriments (oxygène, nitrates) sont ajoutés afin d'accélérer le processus naturel de biodégradation. Ces techniques ont été appliquées avec succès à l'assainissement des sols et des eaux souterraines contaminés par du carburant, des composés organiques volatils et semi-volatils (COV et COSV), du perchlorate et des pesticides<sup>39</sup> Les techniques de bioremédiation améliorées comprennent différentes solutions de rechange, qui sont énumérées ci-dessous.

**Bioventing:** également défini comme le Venting bio-améliorée du sol, est une technologie in situ basée sur la stimulation naturelle de l'activité biologique normale présente dans le sol grâce à l'injection d'oxygène par un flux d'air. L'air est directement injecté à faible débit par un ou plusieurs puits reliés à des pompes à vide qui assurent la circulation forcée de l'air dans les sols contaminés non saturés. Lorsque le sol est très pollué, les pores du sol peuvent être obstrués, ce qui entraîne une réduction des niveaux d'oxygène. Pour résoudre ce type de problème, différentes stratégies ont été développées comme l'augmentation des niveaux d'oxygène par des injections<sup>40</sup>. d'air pulsé. Les avantages sont les faibles coûts de réalisation et de gestion de l'installation, au détriment du temps nécessaire, qui varie de quelques mois à plusieurs années. Cependant, elle est capable d'augmenter jusqu'à 40 fois<sup>41</sup> la capacité normale de biodégradation du sol.

<sup>39</sup> FRTR - Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, version 4.0:

[https://frtr.gov/matrix2/section4/4-2.html#targetText=Description:,them to innocuous end products.](https://frtr.gov/matrix2/section4/4-2.html#targetText=Description%2Cthem%20to%20innocuous%20end%20products.)

<sup>40</sup> [https://www.crccare.com/files/dmfile/CTechguide\\_Bioremediation\\_Rev0.pdf](https://www.crccare.com/files/dmfile/CTechguide_Bioremediation_Rev0.pdf)

<sup>41</sup> [http://www.arpa.umbria.it/Resource/docs/micron%2025/micron\\_25\\_45.pdf](http://www.arpa.umbria.it/Resource/docs/micron%2025/micron_25_45.pdf)

**Bioslurping:** technique qui a appliqué des technologies de déshydratation améliorées sous vide à l'assainissement de sites pollués par des hydrocarbures, en combinant l'extraction des vapeurs du sol et la bioventilation par apport indirect d'oxygène et stimulation subséquente de la biodégradation du contaminant actuelle (Gidakaros et al., 2007). Ce système utilise un « slurp » qui s'allonge dans la couche et qui aspire les liquides (produits libres et gaz du sol) et autres substances. Ce mécanisme permet la récupération de composés libres, organiques volatils ou semi-volatils et de liquides légers en phase non aqueuse (LLPNA) (Kim et al., 2014). Bien que le bioslurping ne soit presque jamais utilisé pour les sols à faible perméabilité, il permet de réaliser des économies en raison de la moindre quantité d'eau souterraine résultant de l'opération, minimisant les coûts de stockage, de traitement et d'élimination (Philip et al, 2005).

**Biosparging:** technique analogue au bioventing, dans laquelle de l'air est injecté sous la surface du sol. Cette action est capable de stimuler les activités microbiennes afin de permettre l'élimination des polluants des sites contaminés. Dans le biosparging, l'air (ou l'oxygène) et les nutriments sont injectés dans la zone saturée pour augmenter l'activité biologique des micro-organismes, favorisant ainsi l'augmentation des composés organiques volatils vers la zone non saturée afin d'augmenter la biodégradation.

Deux facteurs principaux régulent son efficacité : la biodégradabilité du polluant et la perméabilité du sol qui régule la biodisponibilité des contaminants pour les micro-organismes. Il est souvent utilisé pour traiter les aquifères contaminés par des produits pétroliers mais aussi par le benzène, le toluène, l'éthylbenzène, le xylène (BTEX) (Kao et al., 2008).

**Phytoremédiation:** technique basée sur l'utilisation de plantes dans les zones polluées pour réduire la concentration des contaminants. Les composés organiques sont éliminés par dégradation, rhizoremédiation, stabilisation et volatilisation, tandis que les métaux lourds sont éliminés par transformation, extraction et séquestration (Azubuiké et al., 2016).

Les mécanismes suivants sont utilisés dans le processus de phytoremédiation:

- la biodégradation accrue de la rhizosphère: libération de substances naturelles à partir des racines des plantes pour fournir des nutriments aux micro-organismes qui favorisent l'activité biologique;
- la phyto-accumulation: l'absorption des contaminants par les racines des plantes et leur transfert aux pousses et aux feuilles de la plante;
- la photodégradation: métabolisme des contaminants dans les tissus végétaux;
- la phytostabilisation: production de produits chimiques par la plante qui immobilise les contaminants à l'interface entre les racines et le sol (Azubuiké et al., 2016).

**Assainissement microbien:** des bactéries et/ou des champignons sont utilisés pour transformer les contaminants dans le sol et les eaux souterraines. Les micro-organismes sont également capables de libérer des enzymes oxydatives spécifiques qui peuvent décomposer les contaminants organiques. Le type de microbes utilisés est étroitement lié à la température, au pH du sol et à la disponibilité de l'oxygène. Les micro-organismes sont capables de dégrader les hydrocarbures pétroliers, les composés chlorés mais ils peuvent également accumuler des métaux lourds dans la paroi cellulaire.

### 3.2 Ex situ

**Biopiles:** application ex situ de la technologie d'assainissement qui utilise les micro-organismes du sol pour en éliminer la contamination.

Habituellement, cette technique est appliquée aux sols contaminés par des hydrocarbures pétroliers, où l'excavation est effectuée, puis le sol est mélangé à des amendements du sol, formant des tas de compost pour permettre au micro-organisme d'accélérer le processus de dégradation. Les produits pétroliers plus légers ont tendance à s'évaporer de la pile en raison de l'aération, mais les hydrocarbures pétroliers moyens et lourds sont dégradés par voie aérobie. Pour rendre le processus plus efficaces et productifs, certains paramètres et caractéristiques peuvent être contrôlés tels que la température, l'oxygène, le pH, l'aération et les nutriments.

La biopile est l'une des techniques de bioremédiation ex situ les plus utilisées, principalement pour sa rentabilité, même si de nombreux paramètres doivent être contrôlés pour établir une biodégradation efficace (Whelan et al., 2015).

**Andain:** technique spécifique de réhabilitation ex situ basée sur le retournement périodique des sols pollués empilés afin d'augmenter la bioremédiation en augmentant l'activité de dégradation des micro-organismes. Le retournement périodique des sols contaminés et l'ajout d'eau permettent d'augmenter l'aération et d'uniformiser la distribution des polluants, des nutriments et des activités de dégradation microbienne. Cela peut accélérer la bioremédiation (Barr, 2002). En revanche, ce n'est peut-être pas la meilleure option à adopter en présence de composés volatils. L'utilisation du traitement en andain a en effet été impliquée dans le rejet de CH<sub>4</sub> (gaz à effet de serre) en raison du développement d'une zone anaérobie dans les sols pollués empilés, qui survient habituellement après une réduction de l'aération (Hobson et al, 2005).

**Bioréacteur:** Lorsque le matériau est retiré de l'environnement, il peut être mis dans des bioréacteurs, représentés par de grands récipients dans lesquels le matériau contaminé peut être surveillé et les conditions de la bioremédiation peuvent être fixées. Il existe différents modes de fonctionnement des bioréacteurs : batch, fed-batch, batch de séquençage, continu et multi-étagé. Dans les bioréacteurs, il est possible de contrôler le taux de mélange, la température, le pH et les niveaux de nutriments, en favorisant le processus naturel des micro-organismes en imitant et en maintenant leur environnement naturel afin de fournir des conditions de croissance optimales (Azubuike et al., 2016).

**L'agriculture terrestre:** un système conçu de bioremédiation utile pour le traitement des sites éloignés en raison de l'équipement minimal requis, qui utilise généralement l'aération passive en labourant le sol contaminé pour réduire les niveaux de contaminants (EPA 2014). La bioremédiation en agriculture est considérée comme l'une des techniques les plus simples, facile à concevoir et à mettre en œuvre, permettant de traiter une grande surface de sol pollué avec un faible impact environnemental et énergétique (Azubuike et al., 2016).

## 4. La bioremédiation du sol en trois étapes : la méthode LIFE BIOREST

Le projet LIFE BIOREST implique trois pays européens : l'Italie, la France et l'Espagne. Il a été développé pour démontrer l'efficacité et le rapport coût-efficacité de l'approche de bioremédiation des sols contaminés par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), le benzène, le toluène, l'éthylbenzène, le xylène (BTEX) et les alcanes à longue chaîne contribuant ainsi aux connaissances scientifiques nécessaires au développement des politiques environnementales et de protection des sols européennes. Le projet a prévu la collaboration entre le Consorzio Italbiotec, en tant que coordinateur du projet, Actygea Srl, l'Agenzia regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia - ARPAE, l'Université de Turin, l'Université catholique du Sacré-Cœur, l'Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Cientificas (Espagne) et SATT-SAYENS (France).

L'approche biotechnologique développée est basée sur les micro-organismes, les sous-produits agricoles et les plantes, dans le but de revégétaliser, restaurer le sol pollué et le rendre à l'usage public. Les activités expérimentales du LIFE BIOREST visent à valider un modèle de bioremédiation durable capable de traiter les HAP, les BTEX et les alcanes qui représentent, avec les métaux lourds, 45% de tous les contaminants en Europe. C'est également le cas sur le site de Fidenza (Emilia Romagna, Italie), où la bioremédiation a été réalisée.

20

Les activités expérimentales ont commencé en juillet 2016, dans la zone d' "ex-Carbochimica", Site d'intérêt national (SIN) à Fidenza, grâce au soutien de la Municipalité qui a fourni des infrastructures et des espaces déjà affectés par d'autres activités de régénération.

### 4.1 Optimisation de la bioremédiation des sols

La première étape du projet LIFE BIOREST s'est concentrée sur la sélection des souches microbiennes qui ont été exploitées pour le traitement des contaminants. L'approche de la bioremédiation a prévu l'utilisation de micro-organismes autochtones, qui peuplent naturellement le site contaminé ; les souches allochtones n'ont pas été sélectionnées car leurs effets pourraient être imprévisibles lorsqu'elles sont introduites dans l'écosystème. Même si le sol contaminé est compromis par rapport à un sol propre, son biome vivant peut contenir des micro-organismes fortement adaptés aux conditions extrêmes.

Des études préliminaires ont permis d'évaluer la vitalité du sol recueilli sur le site de Fidenza. La communauté bactérienne et fongique est moins abondante que celle d'un sol non anthropisé, mais elle peuplera sûrement cette niche écologique: 107 et 104 ufc/100 g de bactéries et de champignons respectivement sont détectés. Les contaminants sont capables de créer un environnement extrême, mais la nature a appris à s'adapter à ces conditions difficiles. Pour cette raison, l'intérêt du projet s'est concentré sur la sélection des souches capables de survivre dans des conditions extrêmes et qui sont également capables de coloniser le sol pollué. L'application d'une pression sélective au cours de la procédure d'isolement a permis d'isoler 309 champignons et 256 bactéries appartenant à une large biodiversité (78 taxons fongiques et 46 taxons bactériens). Cette richesse microbienne hétérogène a été réduite, identifiant les quelques souches qui pourraient être utilisées pour traiter le sol. L'évaluation de ce grand nombre de souches et de variables est nécessaire pour faire progresser les méthodes d'analyse traditionnelles qui sont trop longues et trop coûteuses. A l'origine, une technique innovante de miniaturisation est développée et optimisée pour tester le taux de croissance des micro-organismes en présence de polluants cibles (pyrène, phénanthrène, naphthalène, benzène, huile paraffine, heptadécane). Plusieurs souches ont montré leur capacité à utiliser efficacement au moins un des polluants comme source unique de carbone, mettant en évidence leur capacité à exploiter des sources d'alimentation complexes ainsi que des sources simples et biodisponibles (par exemple, le glucose).

De plus, de nombreuses souches sont également capables de produire des tensioactifs qui peuvent améliorer la biodisponibilité des polluants organiques dans le sol. Ce projet permet de révéler une richesse microbienne cachée qui pourrait trouver une application dans différents domaines biotechnologiques. Ces résultats confirment les capacités d'adaptation déclenchées par l'environnement extrêmement toxique du sol de Fidenza qui a conduit les micro-organismes à développer une voie métabolique unique. Plus de 30 bactéries et champignons ont été sélectionnés. Les micro-organismes ont été con-

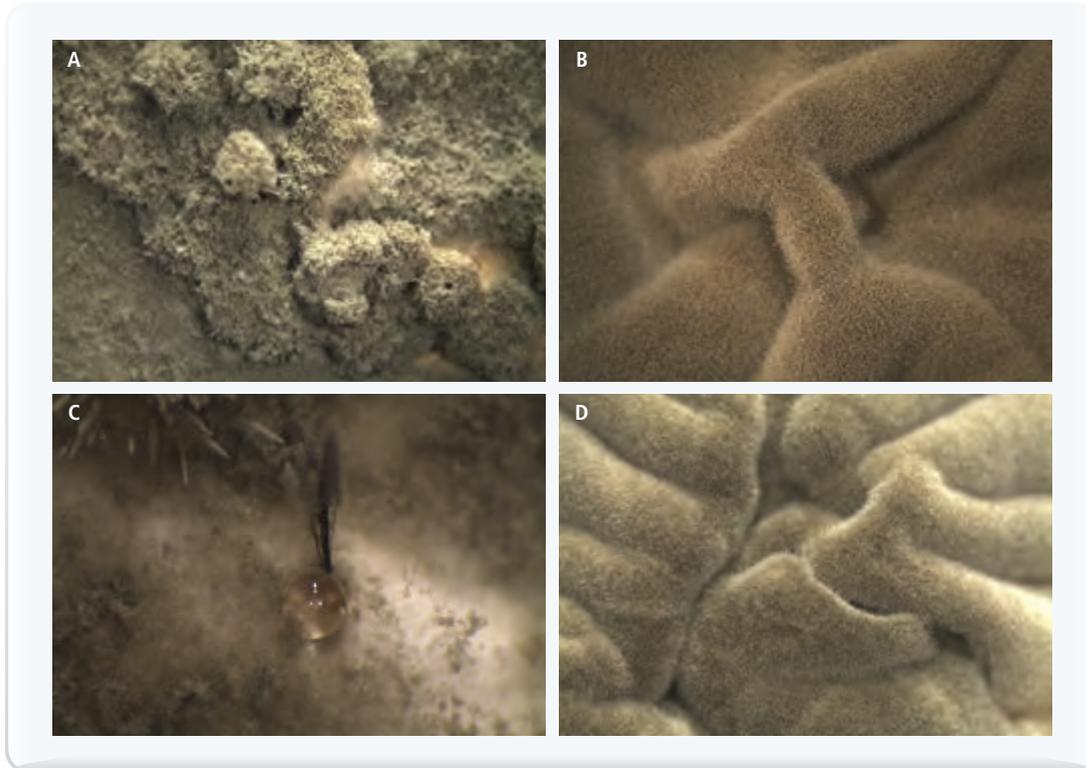


Tableau 4. (A) *Penicillium crustosum*; (B) *Cladosporium subuliforme*; (C) *Cephalotrichum stemonitis*; (D) *Cladosporium*

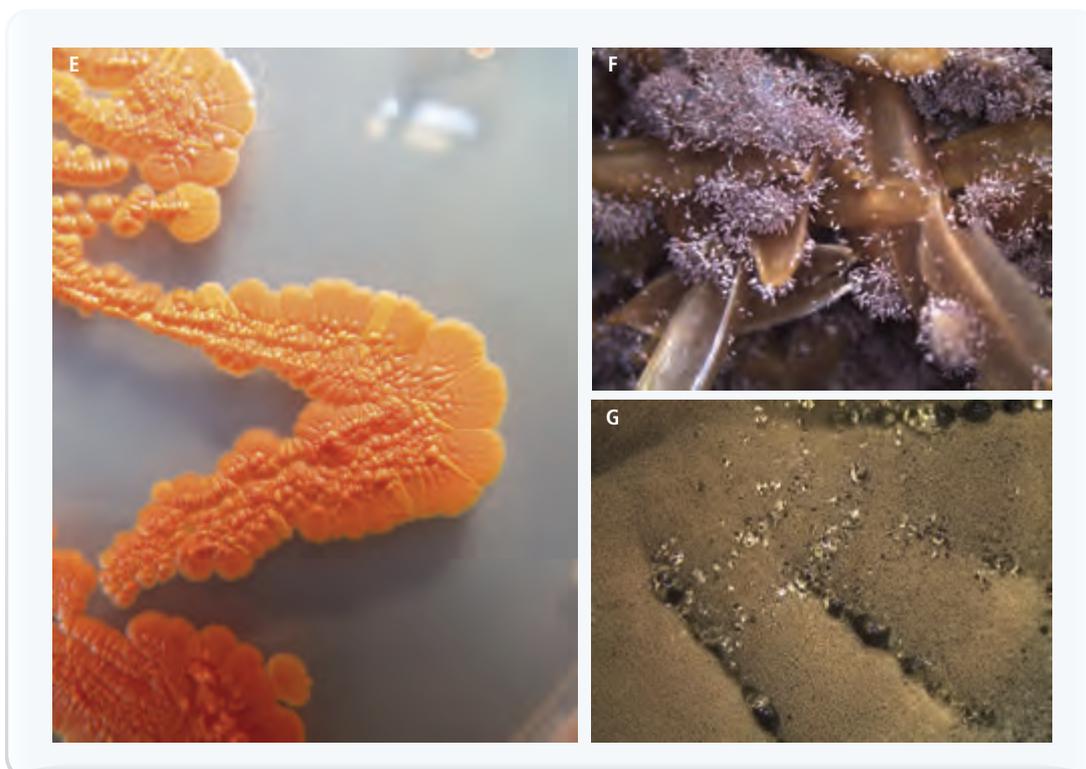


Tableau 5 (E) *Rhodococcus ruber*; (F) *Aspergillus terreus*; (G) *Cladosporium perangustum*

sidérés non seulement pour leur capacité à dégrader les polluants à fort impact, mais aussi pour leur capacité à produire des biosurfactants, des bioémulsifiants et des enzymes. En effet, ces composés pourraient être pertinents pour certains aspects de la biodégradation des polluants ainsi que pour la stimulation d'autres micro-organismes pertinents. Les 5 consortiums microbiens les plus performants appliqués à de plus grands volumes de sol : la bio-augmentation a conduit à une meilleure dégradation que les contrôles. Le consortium capable de maximiser la dégradation des hydrocarbures à longue chaîne et des HAP, réduisant la toxicité du sol, a été choisi.

#### 4.2 Production de biomasse à l'échelle industrielle

L'objectif principal du projet LIFE BIOREST a été de mettre à l'échelle la preuve de concept obtenue lors d'expériences en micro et mésocosme, à une véritable biopile avec le sol du site pollué de Fidenza. Les souches microbiennes sont utilisées pour la bioaugmentation d'une partie d'une biopile d'environ 530 tonnes en collaboration avec la municipalité de Fidenza. Une quantité considérable de micro-organismes a été nécessaire pour atteindre cet objectif. Pour cette raison, la deuxième étape du projet LIFE BIOREST a prévu la création de conditions économiques et pratiques pour la croissance des micro-organismes les plus appropriés, permettant l'application de la technique également pour des applications sur le terrain. La réalisation d'une production rentable, la production de micro-organismes dans des installations de fermentation

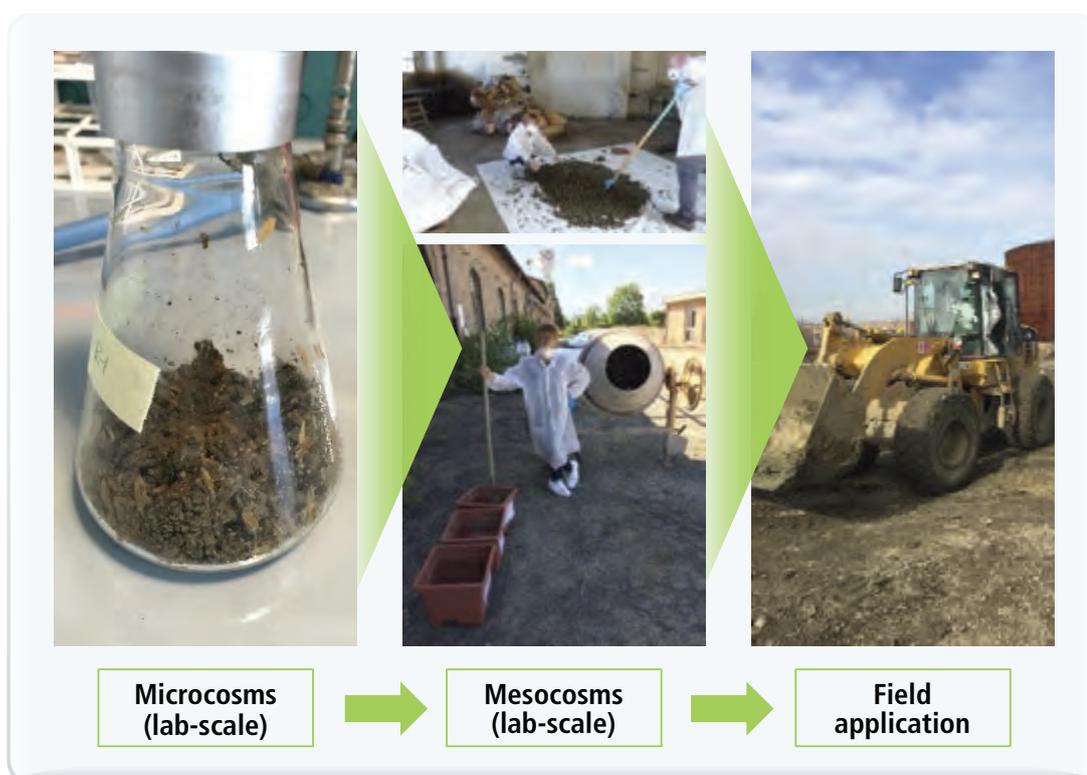


Schéma 7. L'upscaling de la procédure

polyvalentes et l'adaptation de l'équipement et de la logistique disponibles à la production de champignons ont été les principaux objectifs de la deuxième étape. Grâce à la disponibilité d'un système de sélection des milieux de fermentation pour la production industrielle (la base de données propriétaire ActyMedDat), le coût des produits de fermentation a été réduit à moins de 10 € pour la production des micro-organismes nécessaires au traitement d'une tonne de sol. Lors de la fermentation, des déchets végétaux (comme la cellulose, la balle de riz, de l'huile végétale usée) ont été utilisés. Les résultats ont permis d'identifier les meilleurs micro-organismes non seulement pour leur potentiel de biodégradation mais aussi pour la possibilité d'être produits à grande échelle et à faible coût. La production à grande échelle de micro-organismes est réalisée et permet l'application sur le terrain du procédé de bioremédiation. Un protocole général de mise à l'échelle a été élaboré et est prêt à être testé dans d'autres sites à remédier.

#### 4.3 Bioremédiation et revégétalisation in situ

Lors de la troisième étape, le projet LIFE BIOREST s'est concentré sur la préparation de biopile avec le meilleur

consortium microbien préalablement sélectionné. La biopile a été préparée avec 530 tonnes de sol contaminé et es bactéries et champignons appartenant au consortium le plus performant sont appliqués sur le sol. Le sol a ensuite été façonné dans une biopile standard de 3 m de hauteur. La biopile est continuellement aérée et l'humidité du sol est contrôlée tout au long de la période d'incubation. La fraction bio augmentée a montré une élimination plus rapide des polluants. Par exemple, après 60 jours, la concentration totale d'hydrocarbures n'est pas modifiée dans le contrôle, mais le traitement microbien permet déjà d'éliminer jusqu'à 40% des hydrocarbures. Les changements

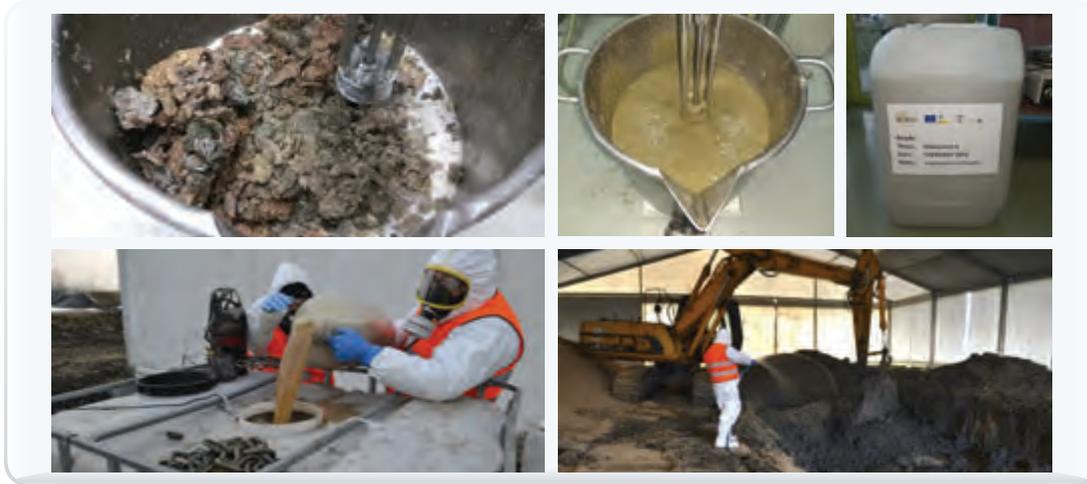


Schéma 8. Application des micro-organismes produits aux mésocosmes et à la biopile



Schéma 9. Préparation de biopile



Schéma 10. Expériences en pot de serre

Schéma 11. Zone de revégétalisation LIFE BIOREST

dans la composition chimique du sol sont également corrélés avec la toxicité de l'ensemble du sol. Encore une fois, la bio-augmentation a entraîné une diminution plus rapide de la toxicité. Par exemple, en ce qui concerne le sorgho et la bactérie luminescente *Vibrio fischeri*, la toxicité était jusqu'à deux fois plus faible en présence du sol traité microbiologiquement. Afin de coupler la bioremédiation avec la phytoremédiation, des expériences en pot ont été menées pour sélectionner les trois espèces végétales les plus adaptées à la revégétalisation après le traitement avec le biopile. Trois espèces sont les plus indiquées pour la phytoremédiation des sols contaminés par des HAP et des BTEX: *Sorghum bicolor*, *Trifolium pratense* et *Festuca arundinacea*.

## 5. Recommandations en matière de bioremédiation

Le sol est considéré comme une ressource dont le maintien de la santé est essentiel pour promouvoir les fonctions de base de l'approvisionnement en nutriments essentiels, en eau, en oxygène et en soutien aux plantes. Les sols représentent une part critique du cycle hydrologique et contiennent de grandes quantités de carbone qui, si elles sont libérées dans l'atmosphère, peuvent accélérer le rythme du réchauffement planétaire et, par conséquent, du changement climatique.

Malgré la grande importance du sol dans la vie de tous les jours, son utilisation et sa gestion inadéquates, telles que l'agriculture industrialisée non durable, l'ignorance et d'autres facteurs socio-économiques ont principalement conduit à la destruction des bons sols.

C'est la raison pour laquelle la question de la contamination et de la protection des sols a été placée au premier plan dans le cadre européen en raison de l'impulsion croissante donnée à la réalisation de la durabilité dans toutes ses déclinaisons et nuances. En effet, le 7e PAE a continué à promouvoir l'utilisation durable des sols: « les terres doivent être gérées de manière durable dans l'Union, les sols doivent être convenablement protégés et l'assainissement des sites contaminés doit être bien engagé »<sup>42</sup>.

Des progrès significatifs ont été réalisés ces dernières années dans la plupart des pays européens en ce qui concerne la gestion de la contamination des sites historiques et la fixation d'objectifs pour la gestion ou l'assainissement complet de ces sites. Selon les données du Centre commun de recherche, 650 000 sites contaminés ont été enregistrés dans les inventaires des 28 États membres où des traitements de réhabilitation ont été effectués ou sont en cours. Plus de 76 000 nouveaux sites ont été enregistrés depuis la précédente analyse de 2014. Actuellement, 65 500 sites ont fait l'objet de mesures correctives (Pérez et al., 2018).

24

Pour les pays industrialisés, l'assainissement des sites contaminés représente un véritable défi, grâce au développement d'une « conscience écologique » qui a fait prendre conscience de la gravité de la situation actuelle.

La gestion de la contamination des sols présente des aspects particuliers liés à la grande variabilité des cas et à la disponibilité des ressources économiques, qui permettent l'adoption de technologies plus innovantes et durables.

L'assainissement des sols est une combinaison complexe de différentes technologies et approches qui ont évolué au fil des ans. Les techniques traditionnelles d'assainissement reposent sur le transfert du sol contaminé vers des décharges, ce qui représente un simple déplacement de la pollution, ce qui est techniquement limité, inefficace et peu respectueux de l'environnement, compte tenu également des délais de gestion et de l'impact environnemental en jeu. Les techniques traditionnelles d'assainissement sont encore très répandues pour le traitement des sols contaminés, en particulier l'excavation et l'élimination des sols, qui représentent en moyenne 30 % de ces activités. Les mesures in situ et ex situ sont appliquées aux mêmes fréquences. Les coûts d'excavation et de transport de grandes quantités de matériaux contaminés pour le traitement ex situ rendent les méthodes physiques actuellement disponibles plus coûteuses.

Toutefois, l'augmentation des contrôles réglementaires des activités d'enfouissement et l'augmentation des coûts connexes, combinées à la mise au point de techniques novatrices d'assainissement ex situ et in situ, modifient le profil des pratiques d'assainissement.

Ce coût élevé a suscité un intérêt croissant pour les technologies alternatives dans le cadre d'applications in situ, en particulier celles fondées sur la capacité de dégradation biologique des plantes et des micro-organismes (Chaudhry et al., 2005).

<sup>42</sup> Le 7e programme d'action pour l'environnement (PAE) - 2013:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32013D1386>

La bioremédiation offre une alternative intéressante aux approches traditionnelles, avec ses limites et ses avantages. Les champignons, les bactéries et les plantes peuvent développer des capacités d'adaptation qui les aident à peupler la niche écologique contaminée. Parmi les avantages de préférer les techniques de bioremédiation, il y a les exigences minimales en matière d'équipement et le faible coût de traitement par unité de volume de sol en comparaison avec les autres technologies de restauration. De plus, l'importance du sol en tant que ressource non renouvelable qui doit être protégée et préservée, fait de la bioremédiation une option plus durable avec des bénéfices à long terme, même si elle prend plus de temps que d'autres alternatives comme l'enfouissement et l'incinération. L'avantage le plus important du procédé de bioremédiation est sa contribution à l'environnement puisqu'il utilise la nature pour réparer la nature. La bioremédiation présente également des limites dans son application, puisque le contrôle des composés organiques volatils (COV) peut être difficile lorsqu'un procédé ex situ est utilisé et que les conditions - pH, température, oxygène - doivent être contrôlées et surveillées pour maintenir la viabilité et l'activité des micro-organismes.

Outre les connaissances et les applications actuelles, la bioremédiation a toujours couvert une part importante de la restauration de la qualité du sol. En effet, les micro-organismes (le moteur de la bioremédiation) évoluent, agissent et remédient de manière invisible depuis le début du processus de pollution. Ce n'est que ces dernières années que nous avons pris conscience du travail sous-estimé de ces machines invisibles. D'autre part, nous avons également acquis la conscience sur la façon d'alimenter nos machines microbiennes pour les faire fonctionner plus rapidement et leur permettre d'atteindre des niches incompatibles avec leur travail. L'objectif du projet LIFE BIOREST était de fournir du combustible aux micro-organismes indigènes dans leur action contre les polluants sur le site de Fidenza. Le projet a reproduit, à un rythme accéléré, l'évolution naturelle d'un environnement perturbé qui lutte pour un retour à la nature. L'application des micro-organismes indigènes a permis une dégradation plus rapide des polluants cibles.

Lorsque le processus de bioremédiation effectué dans les biopiles est raisonnablement terminé, la colonisation forcée du sol par des légumes a poussé plus loin la restauration d'un environnement sain. En effet, l'action mécanique des racines des plantes a engendré des "autoroutes du sol" le long desquelles les micro-organismes ont poursuivi leur action de dégradation des polluants.

Il convient de souligner que l'approche utilisée dans le cadre du projet LIFE BIOREST est pleinement compatible avec les technologies de biopile (testées dans le cadre du projet) ou d'enfouissement (non testées dans ce projet). Par conséquent, l'impact économique sur le processus d'assainissement lui-même est marginal, ne s'ajoutant que les coûts de production des micro-organismes (calculés dans la fourchette de 10 à 50 € par tonne de sol à traiter).

Même si l'approche LIFE BIOREST est facilement transposable à d'autres sites pollués, l'un des problèmes les plus importants dans l'élaboration de l'information sur les coûts est qu'il est très difficile d'extrapoler à d'autres sites les coûts déclarés dans un ensemble de conditions sur un premier site. Tout comme le rendement de la technologie, les coûts de la technologie sont sensibles aux conditions géologiques, géochimiques et contaminantes propres au site, en particulier pour les technologies in situ. L'assainissement des sols pollués par une approche biopile standard (comme celle utilisée initialement sur le site de Fidenza) a un coût qui est fortement influencé par le type de polluants présents et les exigences de confinement à appliquer (le coût pourrait varier de 200 à 1000 € par tonne de sol environ).

Cependant, à l'exception des polluants chlorés, l'application des micro-organismes par l'approche LIFE BIOREST est forfaitaire et indépendante du type de contaminant présent dans le sol. En conclusion, étant donné que l'assainissement des sols est une approche intégrée, le potentiel des micro-organismes indigènes et de la flore locale est d'une importance capitale pour la restauration de la qualité des sols et a un impact marginal, voire positif, sur les coûts de l'assainissement.

Le modèle d'assainissement des sols proposé par le projet LIFE BIOREST a inclus une compréhension de l'importance profonde des sols pour la vie humaine, visant à éduquer le public sur le rôle crucial de la terre. Pour cette raison, de nombreuses activités ont été organisées pour les étudiants, impliquant plus de 1000 d'entre eux dans des activités de recherche et de communication sur la prévention et le traitement des sols, et les encourageant à devenir actifs dans la sensibilisation du public.

## Références bibliographiques

- Abatenh E, Gizaw B, Tsegaye Z, et al. (2017) Application of microorganisms in bioremediation-review *Journal of Environmental Microbiology*. 1(1):02-09.
- Azubuikwe C.C., Chikere C.B., Okpokwasili G.C. (2016) Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World J Microbiol Biotechnol*. 32(11):180. doi: 10.1007/s11274-016-2137-x.
- Barr D., Finnamore J.R., Bardo R.P., Weeks J.M., Nathanail C.P. (2002) Biological methods for assessment and remediation of contaminated land: case studies. Construction Industry Research and Information Association, London
- Brevik, E.C. (2013) Soils and human health: An overview. In E.C. Brevik & L.C. Burgess, eds. *Soils and human health*, pp. 29-58
- Burgess, L.C. (2013) Organic pollutants in soil. *Soils and human health*, pp. 83-106. Boca Raton, Fla, CRC Press.
- Cachada A., Rocha-Santos T., Duarte A.C. (2018) Chapter 1 - Soil and Pollution: An Introduction to the Main Issues. *Soil Pollution*, pp. 1-28. Academic Press.
- Chaudhry Q, Blom-Zandstra M, Gupta S et al. (2005) Utilising the synergy between plants and rhizosphere microorganisms to enhance breakdown of organic pollutants in the environment. *Env Sci Pollut Res* 12:34-48.
- Chaudhry Q, Blom-Zandstra M, Gupta S et al. (2005) Utilising the synergy between plants and rhizosphere microorganisms to enhance breakdown of organic pollutants in the environment. *Env Sci Pollut Res* 12:34-48.
- Chaudhry Q, Blom-Zandstra M, Gupta S et al. (2005) Utilising the synergy between plants and rhizosphere microorganisms to enhance breakdown of organic pollutants in the environment. *Env Sci Pollut Res*, 12:34-48.
- Conte, P., Zena, A., Pilidis, G. & Piccolo, A. (2001) Increased retention of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils induced by soil treatment with humic substances. *Environmental Pollution*, 112(1): 27-31. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00101-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00101-9)
- EPA - United States Environmental Protection Agency, 2014 <http://www.epa.nsw.gov.au/resources/clm/140323landfarmbpn.pdf>
- Fabiańska, M.J., Kozielska, B., Koniecznyński, J. & Kowalski, A. (2016) Sources of organic pollution in particulate matter and soil of Silesian Agglomeration (Poland): evidence from geochemical markers. *Environmental Geochemistry and Health*, 38(3): 821-842. <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9764-2>
- Frasconi D., Zanolli G., Danko A.S. (2015) In situ aerobic co-metabolism of chlorinated solvents: a review. *J Hazard Mater* 283:382–399. doi:10.1016/j.jhazmat.2014.09.041
- Gallego J.L.R., Loreda J., Llamas J.F., Vázquez F., Sánchez J. (2001) Bioremediation of diesel-contaminated soils: evaluation of potential in situ techniques by study of bacterial degradation. *Biodegradation*, vol. 12, no. 5, pp. 325–335
- Gidaracos E., Aivalioti M. (2007) Large scale and long-term application of bioslurping: the case of a Greek petroleum refinery site. *J Hazard Mater* 149:574-581. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.06.110
- Hobson A.M., Frederickson J., Dise N.B. (2005) CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from mechanically turned windrow and vermicomposting systems following in-vessel pre-treatment. *Waste Manag* 25:345-352. doi:10.1016/j.wasman.2005.02.015
- Jordão, C.P., Nascentes, C.C., Cecon, P.R., Fontes, R.L.F., Pereira, J.L. (2006) Heavy Metal Availability in Soil Amended with Composted Urban Solid Wastes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 112(1–3): 309–326. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-1072-y>
- Kao C.M., Chen C.Y., Chen S.C., Chien H.Y., Chen Y.L. (2008) Application of in situ bioremediation to remediate a petroleum hydrocarbon spill site: field and microbial evaluation. *Chemosphere* 70:1492–1499. doi:10.1016/j.chemosphere.2007.08.029
- Keyte, I.J., Harrison, R.M. & Lammel, G. (2013) Chemical reactivity and long-range transport potential of polycyclic aromatic hydrocarbons - a review. *Chemical Society Reviews*, 42(24): 9333. <https://doi.org/10.1039/c3cs60147a>
- Kim S., Krajmalnik-Brown R., Kim J.O., Chung J. (2014) Remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated sites by DNA diagnosis-based bioslurping technology. *Sci Total Environ* 497:250–259. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.08.002

- Kjeldsen P. (1999) Behaviour of cyanides in soil and groundwater: a review. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 115, no. 1-4, pp. 279-307
- Kuppusamy S., Thavamani P., Venkateswarlu K., Lee Y.B., Naidu R., Megharaj M. (2017) Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: Technological constraints, emerging trends and future directions. *Chemosphere*, 168: 944–968.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.115>
- Lin, C., Liu, J., Wang, R., Wang, Y., Huang, B. & Pan, X. (2013) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils of Kunming, China: Concentrations, Distribution, Sources, and Potential Risk. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 22(7): 753–766.  
<https://doi.org/10.1080/15320383.2013.768201>
- Mulligan C.N., Yong R.N. (2004) Natural attenuation of contaminated soils. *Environment International*. 4:587-601.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.001>
- Pérez A.P. and Rodríguez Eugenio N. (2018) Status of local soil contamination in Europe: Revision of the indicator “Progress in the management Contaminated Sites in Europe”, EUR 29124 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/093804, JRC107508
- Philp J.C., Atlas R.M. (2005) Bioremediation of contaminated soils and aquifers. In: Atlas RM, Philp JC (eds) *Bioremediation: applied microbial solutions for real-world environmental cleanup*. American Society for Microbiology (ASM) Press, Washington, pp 139-236
- Rodríguez-Eugenio N., McLaughlin M. and Pennock D. 2018. *Soil Pollution: a hidden reality*. Rome, FAO. 142 pp.
- Sofo A. (2010) *Tecniche di biorisanamento in situ ed ex situ, con particolare riferimento alla biodegradazione in siti contaminati da idrocarburi*. Editore Adriano Sofo
- Tang CY, Criddle QS, Fu CS, Leckie JO (2007) Effect of flux (trans membrane pressure) and membrane properties on fouling and rejection of reverse osmosis and nano filtration membranes treating perfluorooctane sulfonate containing waste water. *J Environ Sci Tech*. 41:2008-14.
- Van Liedekerke M., Prokop G., Rabl-Berger S., Kibblewhite M., Louwagie G (2014) *Progress in the Management of Contaminated Sites in Europe*. Reference Report by the Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability - European Commission. Luxembourg: Publications Office of the European Union, doi:10.2788/4658
- Whelan M.J., Coulon F., Hince G., Rayner J., McWatters R., Spedding T., Snape I. Fate and transport of petroleum hydrocarbons in engineered biopiles in polar regions. *Chemosphere*. 2015;131:232-240. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.10.088.
- Zouboulis A.I., Moussas P.A., Nriagu E. (2001) Groundwater and soil pollution: Bioremediation. *Encyclopedia of Environmental Health*, pp. 1037 - 1044.

*www.lifebioest.com*



ISBN 978-88-907628-6-4



9 788890 762864

