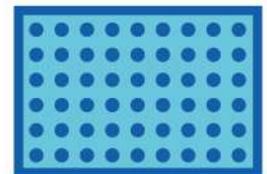
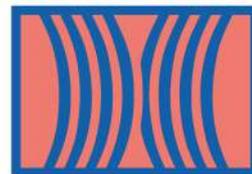


## COMMUNICATIONS ORALES

# 5<sup>e</sup> RENCONTRES NATIONALES

de la Recherche sur  
les sites et sols pollués

**04 et 05 février 2025 - Paris**



### Recueil des résumés

ATELIER 5A : Compatibilité des  
indicateurs environnementaux  
dans la gestion des sites pollués

En partenariat avec :



# Atelier 5A

---

## Compatibilité des indicateurs environnementaux dans la gestion des sites pollués

[Approches environnementales des solutions de gestion des sols pollués]

### Retour d'expérience : les sols comme axe directeur du projet d'aménagement urbain ? 3

Expérimentation à la pointe sud-ouest de l'Île de Nantes

### Diagnostic fonctionnel des sols industriels : de la sélection d'un minimum d'indicateurs à leurs applications *in situ* 8

### Ecological restoration of biodiversity, functions and ecosystemic services of urban-contaminated soils 13

Refonctionnalisation écologique des sols urbains pollués en faveur de la biodiversité et des services écosystémiques

### CO2POL – Empreinte carbone des projets et chantiers de dépollution 17

Établir un référentiel national sur la méthodologie des calculs d'émissions et donner des chiffres clés

# Retour d'expérience : les sols comme axe directeur du projet d'aménagement urbain ?

## Expérimentation à la pointe sud-ouest de l'Île de Nantes

Maiwenn Lothodé<sup>1\*</sup>, Thomas Beilvert<sup>1</sup>, Julie Aumont<sup>1</sup>, Julien Toutain<sup>1</sup>, Geoffroy Séré<sup>2</sup>, Antoine Tribotté<sup>1</sup>, Olivier Hugues<sup>3</sup>, Enzo Miottini<sup>3</sup>

<sup>1</sup>: SCE Environnement et Aménagement, 4 rue René Viviani, CS 26220, 44262 Nantes Cedex 2

<sup>2</sup>: Université de Lorraine, INRAE, LSE, F-54000 Nancy, France.

<sup>3</sup>: SAMOA, 2 Ter Quai François Mitterrand, 44000 Nantes

\* : auteure à contacter : maiwenn.lothode@sce.fr

## Résumé

DESTISOL a été développé par SCE, le LSE et le Cerema. C'est un outil d'aide à la décision qui vise la promotion de la préservation des sols urbains et de leur multifonctionnalité. Dans le cadre du réaménagement du secteur sud-ouest de l'Île de Nantes, les auteurs proposent un retour d'expérience sur son utilisation, en lien avec les besoins d'une société d'aménagement. Cette expérimentation a démarré au printemps 2024 et est quasiment terminée. L'outil permet de mieux définir les potentialités des sols du site, d'évaluer leurs compatibilités avec les usages futurs du projet d'aménagement et, au-delà, d'estimer les contributions de ce projet par le prisme des services écosystémiques. Ce retour d'expérience montre également les difficultés à intégrer les enjeux sols dans l'espace urbain du fait des contraintes de phasage des projets et d'accès au sol dans un milieu déjà aménagé. Au-delà de ces contraintes, nous avons pu montrer qu'un certain nombre de données peuvent être remobilisées mais qu'il faut bien prendre en compte l'incertitude au moment d'interpréter les résultats. Nous proposons un certain nombre de mesures permettant d'optimiser les projets d'aménagement en intégrant les sols le plus en amont possible.

## Introduction

L'Île de Nantes fait l'objet d'un vaste programme de réaménagement piloté par la SAMOA (Société d'Aménagement de la Métropole Ouest Atlantique) depuis 2003. Dernier grand secteur de l'île à renouveler, la pointe sud-ouest est une zone à la fois industrielle et portuaire. De ce fait, lors des aménagements, la question de la gestion des sols sur site et/ou hors site se pose systématiquement. Il est alors nécessaire de prendre en compte la compatibilité entre usages et qualité des sols en place, pas seulement du point de vue de la contamination et des risques sanitaires mais aussi du point de vue de la multifonctionnalité des sols et de l'apport d'un projet en termes de services écosystémiques. L'outil DESTISOL, développé par SCE, le LSE et le Cerema, est un outil d'aide à la décision qui vise la promotion de la préservation des sols urbains et de leur multifonctionnalité (Schwartz et al., 2013-2017 ; Séré et al. 2024). L'objectif est de permettre aux aménageurs de mieux prendre en compte dans leur réflexion amont d'aménagement les caractéristiques techniques des sols (contraintes, opportunités) et les services qu'ils rendent dans le but d'atteindre une adéquation optimale entre potentialités, couverture et usages des sols en place. Cette présentation a pour vocation de faire le retour d'expérience de l'application de la méthode DESTISOL, sur le terrain, en lien avec les besoins et les attentes d'une société d'aménagement. Cette expérimentation a démarré au printemps 2024 et est en cours de finalisation.

# Matériel et méthodes

## Méthodologie DESTISOL

L'outil DESTISOL s'utilise à l'échelle de l'aménagement opérationnel, il est donc bien adapté à l'échelle du secteur à aménager par la SAMOA. L'approche DESTISOL est basée sur la traduction des caractéristiques des sols en fonctions puis en services écosystémiques (SE). DESTISOL intègre d'autre part différents types d'usages des sols (appelés couvertures) communément définis dans les projets urbains. Il repose sur l'acquisition d'indicateurs de la qualité des sols sur le terrain et en laboratoire (qualité agronomique, géotechnique et contamination). Ces données sont obtenues grâce à l'ouverture de fosses pédologiques et à l'observation des profils de sols ainsi qu'au prélèvement et à l'analyse d'échantillons de sols. Ces indicateurs sont ensuite saisis dans un outil ACCESS permettant l'obtention d'une note entre 0 et 3 pour 15 fonctions du sol. Les notes des fonctions obtenues permettent ainsi d'identifier le niveau de comptabilité des couvertures avec les caractéristiques du sol en place parmi 13 types de couvertures. La couverture du sol affectant fortement le fonctionnement du sol, les fonctions sont recalculées pour le couple sol/couverture. L'utilisateur peut ensuite générer des scénarii d'aménagement en saisissant dans l'outil le pourcentage d'occupation du sol pour chacune des couvertures. L'outil fournit ainsi un résultat en termes de niveau de services écosystémiques rendus par les sols en fonction du scénario d'aménagement choisi. L'utilisateur peut ainsi comparer plusieurs scénarii et faire les choix d'aménagement qui lui semblent le plus pertinents en fonction des objectifs poursuivis par le projet et des caractéristiques des sols en place, évitant ainsi des surcoûts potentiels associés au remaniement des sols du site à aménager.

## Méthodologie de l'expérimentation

La première phase de l'étude a pour objectif d'identifier les grands enjeux présents sur le site et de parvenir à la définition d'un plan d'investigations pour l'étude de sol. Pour cela, nous réalisons une étude historique et documentaire associée à la reprise des études existantes menées sur le site. Ces données sont intégrées à un SIG pour en faciliter l'interprétation. L'objectif de cette phase est de définir des zones cohérentes en termes d'occupation du sol pour parvenir à un zonage du site grâce à la définition de zones de sol dites « homogènes ». Une fois, le zonage du site finalisé, le plan d'implantation des sondages est défini. Cependant, en contexte urbain, l'occupation des sols a contraint la réalisation de fosses et seule une zone homogène a pu être investiguée grâce à l'ouverture de 8 fosses pédologiques à la pelle mécanique. Chaque horizon de sol fait l'objet d'une description complète basée sur les observations morphologiques réalisées *in situ* par un.e pédologue.

Celles-ci sont complétées d'analyses (physico-chimiques, géotechniques et contamination) réalisées en laboratoire à partir d'échantillons de sols prélevés sur le terrain. 23 paramètres sont sélectionnés pour les besoins de cette étude (Tableau 1).

L'ensemble des données acquises est saisi dans l'outil. Le site a fait l'objet de nombreuses études de sols auparavant (diagnostic pollution, étude agronomique, étude géotechnique) mais aucune ne réunit l'ensemble des paramètres nécessaires au paramétrage de l'outil Destisol, nous avons cependant intégré du mieux possible les données existantes dans l'outil afin de pouvoir calculer les fonctions des sols, la compatibilité des couvertures avec les sols en place et les services rendus par les sols dans le projet d'aménagement. Nous avons généré une carte d'indices de confiance en fonction de la qualité des données par rapport aux exigences de l'outil (Figure 1) permettant de mettre en perspective la validité des résultats obtenus en fonction des zones.

Tableau 1 - Tableau des indicateurs de DESTISOL

Catégorie	Indicateurs du sol	Unité
Morphologique	Pente	%
	Profondeur de sol	Cm
	Couleur	Valeur
	Densité racinaire	%
	Activité biologique	Valeur
	Structure	Valeur
	Texture	Valeur
	Compacité	Valeur
	% éléments grossiers	%
	% artefacts	%
	Hydromorphie	Valeur
	Traces de contaminations	Valeur
	Physico-chimique	pH
P205 Olsen		g.kg-1
Matière organique		g.kg-1
Azote total		g.kg-1
C:N		-
CaCO3		g.kg-1
Géotechnique	Classification GTR	Valeur
Contamination	HCT C10-C40	mg.kg-1
	8 métaux	mg.kg-1
	HAP	mg.kg-1
	BTEX	mg.kg-1

Cet indice de confiance est estimé pour chaque indicateur en fonction du type d'étude réalisé, nous avons détaillé 4 catégories par paramètre : i) donnée inexistante ; ii) donnée utilisable mais référentiel différent, nécessitant une interprétation pour être intégrée ; iii) donnée exploitable en l'état mais protocole d'acquisition différent ; iv) donnée conforme. Ces éléments sont combinés pour chaque zone homogène afin de définir un indice de confiance par zone.



Un scénario d'aménagement (figure 1) intégrant le plan masse proposé en première intention par la maîtrise d'œuvre du projet en 2023 est testé. Par ailleurs, ces données sont mises en confrontation systématique avec les diagnostics pollution réalisés sur le secteur. Les premiers résultats servent de base d'échange pour définir de nouveaux scénarii d'aménagement afin d'optimiser le projet en fonction des potentialités des sols.

Figure 1 - Plan d'aménagement projeté et indice de confiance des données utilisées

## Résultats et discussion

A l'issu de la première phase de localisation des études existantes et de zonage du site, plusieurs difficultés ont été rencontrées pour la réalisation du protocole « idéal ». En effet, la méthode nécessite l'ouverture de fosses pédologiques pour une observation optimale des horizons pédologiques (extension, succession). Or, le caractère intrusif de ces méthodes d'investigation dans une zone urbaine soulève de nombreuses difficultés d'accès. De plus, la maîtrise d'ouvrage n'a pas la maîtrise foncière de l'ensemble de la zone et les usages du site, intensifs à la période des investigations, ne permettaient pas l'implantation des sondages sur l'ensemble des zones homogènes identifiées. Ce sont finalement 8 fosses qui ont pu être réalisées, toutes dans la même zone homogène.

Il est à noter que l'île de Nantes est composée d'un chapelet d'îles alluvionnaires remblayées jusqu'à ne former qu'un grand ensemble. Les matériaux rencontrés en profondeurs sont donc assez semblables sur l'ensemble de l'île mais les matériaux ayant servi de remblais sont très divers. Tous les sols rencontrés rentrent dans la catégorie des technosols avec une série de couches graveleuses reposant sur des sables de Loire. L'ensemble a connu une activité industrielle intense et présente de nombreuses traces de pollutions confirmées par les analyses et les études antérieures. Les résultats des analyses des sols ont permis de calculer les notes des

Zone homogène	Profil	Fonction stockage Carbone	Fonction Circulation de l'eau	Fonction Retention de l'eau	Fonction protection contre l'érosion	Fonction fertilité végétation arborée	Fonction fertilité végétation arbustive	Fonction fertilité végétation herbacée	Niveau de contamination par des polluants	Fonction dégradation des polluants organiques	Fonction rétention des polluants	Fonction recyclage de la m.o. et des nutriments	Fonction support de réseaux	Fonction support de voirie légère	Fonction support de voirie lourde	Fonction support Bati
Z01	PM1	1,92	2,45	1,26	1,75	1,71	1,63	1,43			1,29	1,6	1,33			
	PM10	1,76	2,49	1,25	1,75	1,68	1,63	1,67	2,98	1,5	1,3	1,4	1,22	2,25	1,76	1,79
	PM11	1,74	2,42	1,18	2	2	1,62	1,75			1,18	0	0,86			
	PM2	1,99	2,34	1,52	2,25	1,41	1,62	1,62	2,6	2	1,09	2,1	1,67	1,97	2,35	2,11
	PM3	2,01	2,32	1,41	1,75	1,76	1,66	1,66			1,1	1,6	1,91			
	PM5	1,85	2,34	1,22	1,5	1,39	1,7	1,7	1,9	1,27	0,96	0	1,55	2,07	2,01	1,98
	PM6	1,94	2,27	1,54	1,75	1,9	1,58	1,42	1,57	1	1,29	1,8	1,75			
PM9	1,78	2,36	1,15	1,25	2,11	2,06	2,06			1,11	0	0,92				
Z02	Z02_A_Pmoy1		2,49	0,75	1,25				2,34			0	1,6			
	Z02_A_Pmoy2											0	0,74			
	Z02_B_Pmoy2		2,49	0,75	1,25				1,6			0	1,8			
Z03	Z03_A_P03	1,37	2,14	1,15		0,68	0,96	0,96			0,84	0	1,8			
	Z03_B_P04								1,25			0	1			
Z05	Z05_A_Pmoy1		2,29	1,5	1,75				3				2,2			
	Z05_B_Pmoy2	1,23	2,34	0,8	1,25	0,74	0,64	0,64	1,39		0,57	0	0,57			
Z06	Z06_A_CPO_NORD	1,84	2,26	1,35	1,25	1,5	1,69	1,69			1,01	0	1,42			
	Z06_B_CPO_MID		2,3	1,34	1,25							0	1,78			
	Z06_C_Pmoy1		2,4	1,11	1,25				0,52			0	0,8			
Z07	Z07_A_Pmoy1				1,25							0				
	Z07_B_Pmoy2				1,25							0				
	Z07_C_Pmoy3				1,25							0				
Z09_A_Pmoy1	2,67	2,19	1,5	1,25	2	1,63	1,63	1,68	0,92	1,5	0	2,03				

Tableau 2 - Note des fonctions de 0 à 3 calculées pour l'ensemble des profils. Le code couleur pour les zones homogène reprend l'indice de confiance décrit pour la construction de la figure 1 : vert : très bonne confiance ; jaune : Bonne confiance ; orange : confiance moyenne.

fonctionnalités des sols en place et d'évaluer quelles sont les couvertures compatibles. Le tableau 2 montre que les données n'ont pas permis de calculer l'ensemble des notes des fonctions. Les données ayant permis d'obtenir un maximum de notes sont les sondages pour lesquels nous avons des valeurs d'analyses agronomiques (notes de fertilité) et géotechniques (notes de fonction support). Nous pouvons observer que les sols ont une bonne capacité à laisser circuler l'eau (notes supérieures à 2) mais une fertilité moyenne à faible (notes comprises entre 0,68 et 2) ainsi qu'une capacité moyenne à faible à stocker le carbone (notes inférieures à 2 pour la plupart). Tous les profils ne sont pas fortement contaminés (fonction niveau de contamination par des polluants de 3 signifie que les contaminants analysés sont inférieurs au fond pédogéochimique local (Leguern et al., 2016), plus la note est basse, plus les valeurs sont élevées par rapport aux valeurs de fond) mais tous ont une faible capacité de rétention des polluants (notes inférieures à 1,29) induisant un risque de circulation avec les eaux de drainage. Les notes des fonctions géotechniques sont moyennes voire faibles. Nous observons globalement une certaine homogénéité dans la valeur des notes de fonctions des profils de sols étudiés à l'échelle du site.

L'outil nous fournit ensuite une estimation de la compatibilité entre le sol et les 13 couvertures simulées.

Du fait des lacunes de données, l'ensemble des compatibilités ne peut pas être calculé. Le premier scénario d'aménagement intégré dans l'outil DESTISOL, nous permet de calculer les services écosystémiques rendus par les sols dans le cadre du projet d'aménagement de référence (Figure 1).

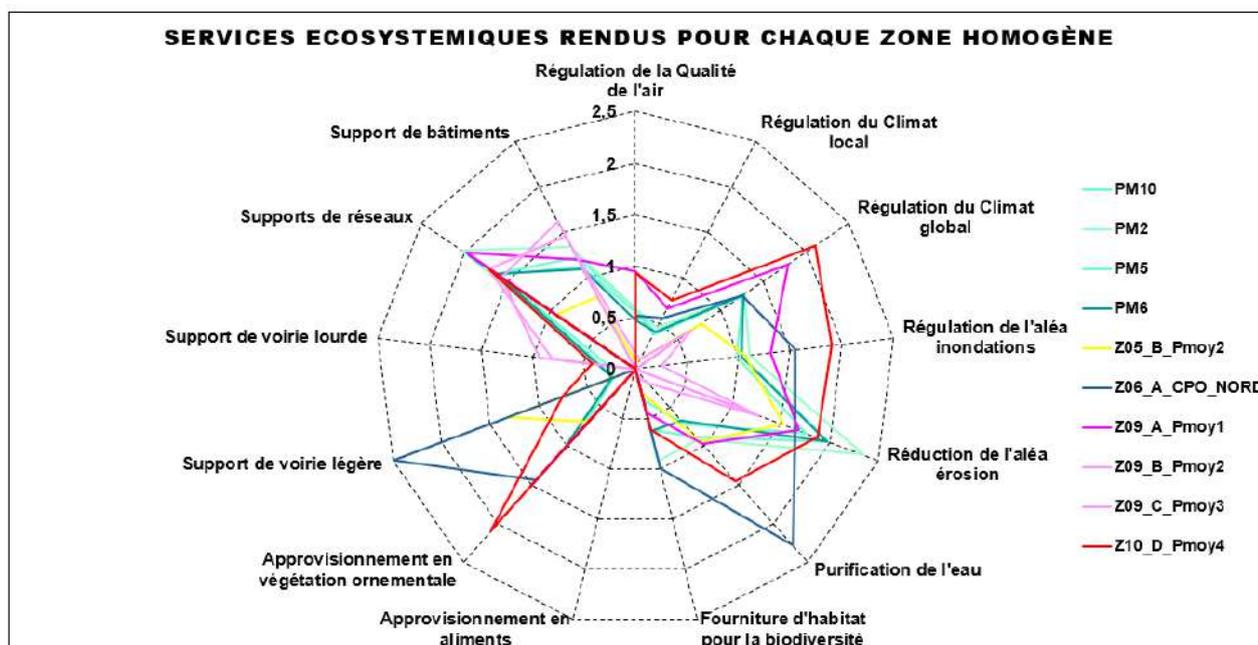


Figure 2 - Note de services rendus par les sols pour les profils de sols dans le scénario d'aménagement de base de la pointe ouest de l'île de Nantes. Les profils retenus sont ceux avec les données présentant la meilleure complétude.

A ce jour, l'ensemble des données ne sont pas traitées et l'interprétation ne peut en être que parcellaire mais nous présentons les résultats des notes de services pour les différents profils de sols pour le scénario d'aménagement de base (figure 2).

Les sols de l'île de Nantes sont des technosols, pauvres en matière organique et nutriments, leur pH est élevé et ils ont une texture sableuse avec un très fort pourcentage d'éléments grossiers, il n'y a pas de contraste important en termes de fonctionnalités de ces sols entre les zones homogènes, ce qui donne plus de poids aux couvertures qu'aux sols en eux même lors de l'interprétation des résultats. C'est ce que nous observons concernant les scores calculés pour les services écosystémiques, ils varient en fonction de l'occupation du sol. On observe que certains services (e.g. régulation du climat, approvisionnement en végétation) sont amplifiés grâce à la présence d'une surface végétalisée importante dans le projet d'aménagement (23% de la surface totale du projet).

Dans l'ensemble les sols n'ont pas un potentiel élevé mais s'assurer d'une qualité sanitaire compatible à la norme et privilégier l'infiltration des eaux pluviales ainsi qu'une végétation peu exigeante permettra d'amplifier le niveau de services qu'ils seront aptes à rendre.

La prochaine étape sera de proposer un scénario optimisé s'appuyant sur la compatibilité des sols avec les couvertures afin d'amplifier le niveau de services rendus et de préserver les sols avec le plus de potentiel.

Les résultats obtenus vont permettre à la SAMOA de porter une réflexion sur la gestion des déblais-remblais à l'échelle du site, et notamment sur l'altération des services écosystémiques en cas de décapage profond des sols. Ces résultats permettront également de guider les préconisations d'aménagement, d'autant plus que le site d'étude présente des contraintes fortes liées à la qualité des sols (pollution notamment) et que toutes les ressources existantes doivent être préservées dans un parti pris en faveur de l'environnement, de l'infiltration des eaux pluviales et de l'économie circulaire.

## Conclusions et perspectives

Nous proposons un retour d'expérience sur l'utilisation de l'outil Destisol en lien avec des équipes d'ingénierie et une maîtrise d'ouvrage dans le cadre d'un projet d'aménagement. Ce retour d'expérience éclaire sur la mise en œuvre de la méthodologie et l'usage qu'une maîtrise d'œuvre peut avoir des résultats. Il faut noter que le contexte n'est pas le plus adapté à l'utilisation d'une méthode comme Destisol, pour plusieurs raisons ; le niveau de contamination des sols et les risques sanitaires qui peuvent être associés à leur usage contreviennent à leur conservation en place sans passer par un traitement préalable. De plus, nous avons été confrontés à des difficultés d'accès au terrain, compromettant de fait la validité des résultats sur les zones pour lesquelles les données ont été acquises dans un autre contexte. Les sols de l'île de Nantes sont des technosols, pauvres en matière organique et nutriments, leur pH est élevé et ils ont une texture sableuse avec un très fort pourcentage d'éléments grossiers, il n'y a pas de contraste important en termes de fonctionnalités de ces sols entre les zones homogènes, ce qui donne plus de poids aux couvertures qu'aux sols lors de l'interprétation des résultats.

Un élément notable dans le cadre de ce projet est également une intense activité de dépollution, travaux et aménagements temporaires sur le site, rendant incertaine la validité des résultats dans le temps (sols qui ne seront plus en place).

Nous préconisons donc l'utilisation de Destisol dans un contexte amont des opérations d'aménagement, idéalement avec une maîtrise foncière permettant un accès à l'ensemble du site et dans le cadre d'une zone peu fréquentée (e.g. friche) afin de permettre d'investiguer les sols de façon optimale. La connaissance des aspirations de l'aménageur est un plus, mais le travail de scénarisation du projet peut également se faire en concertation. De plus, la philosophie de l'outil Destisol étant de valoriser les sols en place, les sites présentant une contamination des sols telle qu'elle nécessite des actions de dépollution ne sont probablement pas les plus favorables à sa bonne utilisation. Destisol peut guider en cas d'occupation temporaire, mais il faudrait s'assurer que les propriétés des sols ne soient pas altérées auquel cas le diagnostic initial ne serait plus valable.

## Références

Leguern C., Baudouin V., Bridier E., Cottineau E., Delayre M., Desse-Egrand F., Grellier M., Milano E., Mouny A., Pollet S., Sauvaget B., Menoury A., Bâlon P., avec la coopération de P. Conil et L. Rouvreau, (2016) – Développement d'une méthodologie de gestion des terres excavées issues de l'île de Nantes – Phase 1 caractérisation des sols et recensement des sources de pollution potentielles, Rapport BRGM/RP-66013-FR, 122 p.

Schwartz Christophe, Sere Geoffroy, Cherel Johan, Boithias Laëticia, Warot Gilles, Morandas Patrice, 2013-2017, DESTISOL : Les sols, une opportunité pour un aménagement urbain durable. Rapports. <https://librairie.ademe.fr/sols-pollues/3923-destisol-les-sols-une-opportunit-e-pour-un-amenagement-urbain-durable.html>

Sere, G., Lothode, M., Blanchart, A., Chirol, C., Tribotte, A., Schwartz, C., 2024, Destisol: a decision-support tool to assess the ecosystem services provided by urban soils for better urban planning. *European Journal of Soil Science*. Submitted 2024.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la SAMOA pour le portage de cette expérimentation et sa volonté d'innover au service de la construction de la ville durable. Les auteurs remercient l'ADEME pour l'aide financière et technique apportée tout au long du projet Destisol.

# Diagnostic fonctionnel des sols industriels : de la sélection d'un minimum d'indicateurs à leurs applications *in situ*

Caroline DALQUIER<sup>1\*</sup>, Jennifer HARRIS<sup>2</sup>, Nicolas LEGAY<sup>3</sup>, Laure SANTONI<sup>4</sup>,  
Pascale HERBELIN<sup>4</sup>, Geoffroy SÉRE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, Laboratoire Sols et Environnement, France

<sup>2</sup>Bureau de Recherches Géologiques et Minières, F-45100 Orléans, France

<sup>3</sup>UMR 7324 CNRS CITERES, INSA Centre Val de Loire, F-41000 Blois, France

<sup>4</sup>EDF R&D LNHE, F-78401 Chatou cedex, France

\*Contact: caroline.dalquier@univ-lorraine.fr

## Résumé

Les activités industrielles peuvent induire une dégradation des sols sur de grandes surfaces (imperméabilisation, compactage, etc.). A la cessation des activités, les propriétaires fonciers souhaitant réhabiliter leur site en vue de nouvelles utilisations des sols et dans le cadre de l'objectif "zéro artificialisation nette" sont amenés à estimer l'état fonctionnel des sols. Il est donc nécessaire de développer une approche solide et facile à utiliser pour ces propriétaires afin d'évaluer les fonctions des sols et leur potentiel pour des utilisations futures. Un ensemble minimal d'indicateurs, définis comme des mesures qualitatives ou quantitatives de l'état et/ou des fonctions des sols, a été établi sur la base des propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol. La sélection de ces indicateurs s'est faite sur la base de leur contribution à 6 fonctions du sol (e.g. la production de biomasse végétale). Douze zones, considérées comme homogènes en termes de végétation et de type de sol mais avec des usages passés différents (dépôt de cendres, fondations de bâtiments, etc.), ont été sélectionnées sur des sites de centrales thermiques en cours de fermeture. Sur ces zones, au total, 12 profils de sol et 164 échantillons de sol ont été analysés via différents paramètres biologiques, chimiques et physiques. Les premières analyses ont révélé qu'un sol remanié dans le cadre d'une activité industrielle donnée n'aboutira pas à la formation d'un même Technosol et souligne l'intérêt d'intégrer des paramètres biologiques dans les outils de diagnostic fonctionnel des sols.

## Introduction

La qualité d'un sol est définie par sa capacité à réaliser des fonctions écologiques permettant le maintien de la production de biomasse, de la qualité environnementale et la promotion de la bonne santé de la faune et de la flore s'y développant pour un usage donné (Bünemann et al., 2018 ; Joimel et al., 2017). Ces fonctions du sol sont le résultat des interactions entre les composantes physiques, chimiques et biologiques à l'origine du fonctionnement du sol (Calvaruso et al., 2021). Depuis plusieurs décennies, l'intensification et l'expansion des activités humaines entraînent une augmentation du taux d'artificialisation des sols à travers le monde (Fosse et al, 2019). En France, l'artificialisation est juridiquement définie comme « l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage » (Art. 192 de la loi Climat et Résilience). Les activités industrielles telles que les centrales thermiques, induisent une dégradation des sols sur de grandes surfaces (imperméabilisation, contamination liée aux dépôts de combustible, de charbon et de cendres). Après la cessation des activités, les propriétaires de ces sites disposent d'un patrimoine foncier sur lequel ils doivent mettre en application d'une part la loi Climat et Résilience et d'autre part la séquence Eviter, Réduire, Compenser (ERC) et donc définir une stratégie prospective de gestion de ce foncier en incluant les usages futurs possibles, les aménagements éventuels et la compensation écologique. Pour cela, les propriétaires sont

amenés à intégrer dans leur stratégie de gestion, l'analyse des fonctions des sols afin de faciliter la réhabilitation des sites de production vers les usages futurs envisagés. Cependant, à ce jour, aucun décret ne définit précisément les fonctions écologiques du sol ni la manière de les caractériser ou de les évaluer, et encore moins de les prendre en compte dans des plans de reconversion d'activité. De ce fait, pour ces propriétaires impliqués dans la gestion de ressources foncières, un décalage perdure entre l'intention générale définie par la réglementation et sa mise en œuvre opérationnelle, qui devrait reposer sur des outils d'évaluation de ces fonctions. Bien que de précédentes études aient permis de progresser sur ce type d'outils (Bastida et al., 2008, Volchko et al. 2014, Séré et al. 2024), il est encore nécessaire de développer une approche robuste et facile à utiliser pour les propriétaires fonciers, qui pourrait être mise en œuvre par les techniciens/praticiens des sols, afin d'évaluer les fonctions des sols ainsi que leur potentiel pour des utilisations futures. Pour combler en partie ce décalage, nous proposons de présenter la démarche et les principaux résultats d'un travail de thèse en cours dont l'objectif est de développer un outil de diagnostic fonctionnel (modèle cognitif) des sols innovants reliant les fonctions des sols à un ensemble minimum d'indicateurs, établi sur la base des propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols.

## Matériel et méthodes

La construction du modèle cognitif est réalisée en plusieurs étapes. Premièrement, une analyse de littérature scientifique a été réalisée pour identifier des indicateurs, définis comme des mesures qualitatives ou quantitatives de l'état et/ou des fonctions des sols. Les indicateurs physiques, chimiques et biologiques ainsi identifiés ont ensuite été sélectionnés sur la base de considérations scientifiques, techniques, logistiques et financières. Deuxièmement, une autre analyse de la littérature a permis de sélectionner les fonctions et sous-fonctions des sols à intégrer dans le modèle cognitif en se basant sur le nombre de référencements et/ou par dires d'experts. Troisièmement, seuls les indicateurs avec un niveau satisfaisant de contribution aux fonctions et sous-fonctions ont été retenus pour constituer le modèle cognitif. La dernière étape, encore en cours, consiste à élaborer la méthode d'évaluation du niveau fonctionnel d'un sol en construisant un référentiel pour chaque indicateur sélectionné et un système de notation pour chaque sous-fonctions et fonction. Le référentiel et le système de notation seront nourris par des données issues d'outils existants (eg. DESTISOL, SUPRA), de la littérature et de prélèvements de sol sur des sites industriels.

Ainsi, deux anciennes centrales thermiques avec un contexte climato-géologique similaire ont été sélectionnées et sur chacune d'elle, des zones identifiées comme ayant eu des usages industriels contrastés (dépôt de charbon, de mâchefers ou de cendres, fondations de bâtiments, etc.) ont été étudiées. Douze zones de 100m<sup>2</sup> présentant une végétation et un sol, considérés homogènes mais distinctes les unes des autres, ont été sélectionnées sur ces deux sites et ont permis, sur un total de 12 profils de sol et de 164 échantillons de sol (de surface et d'horizons), de mesurer une série de paramètres physiques, chimiques et biologiques (plantes, nématodes, communautés microbiennes).

## Résultats et discussion

La revue de littérature nous a permis de sélectionner 6 fonctions et 17 sous-fonctions reconnues comme indispensables pour évaluer l'état fonctionnel d'un sol et la seconde revue de littérature a permis d'identifier plus de 250 indicateurs de sol. En se basant sur 13 critères scientifiques, techniques, logistiques et financiers ainsi que leur niveau de contribution aux différentes fonctions, seuls 47 d'entre eux ont été sélectionnés et testés sur un gradient de sols dégradés de deux sites industriels.

L'évaluation de profils de sol sur douze zones avec des activités industrielles différentes a mis en évidence la singularité de chaque profil (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

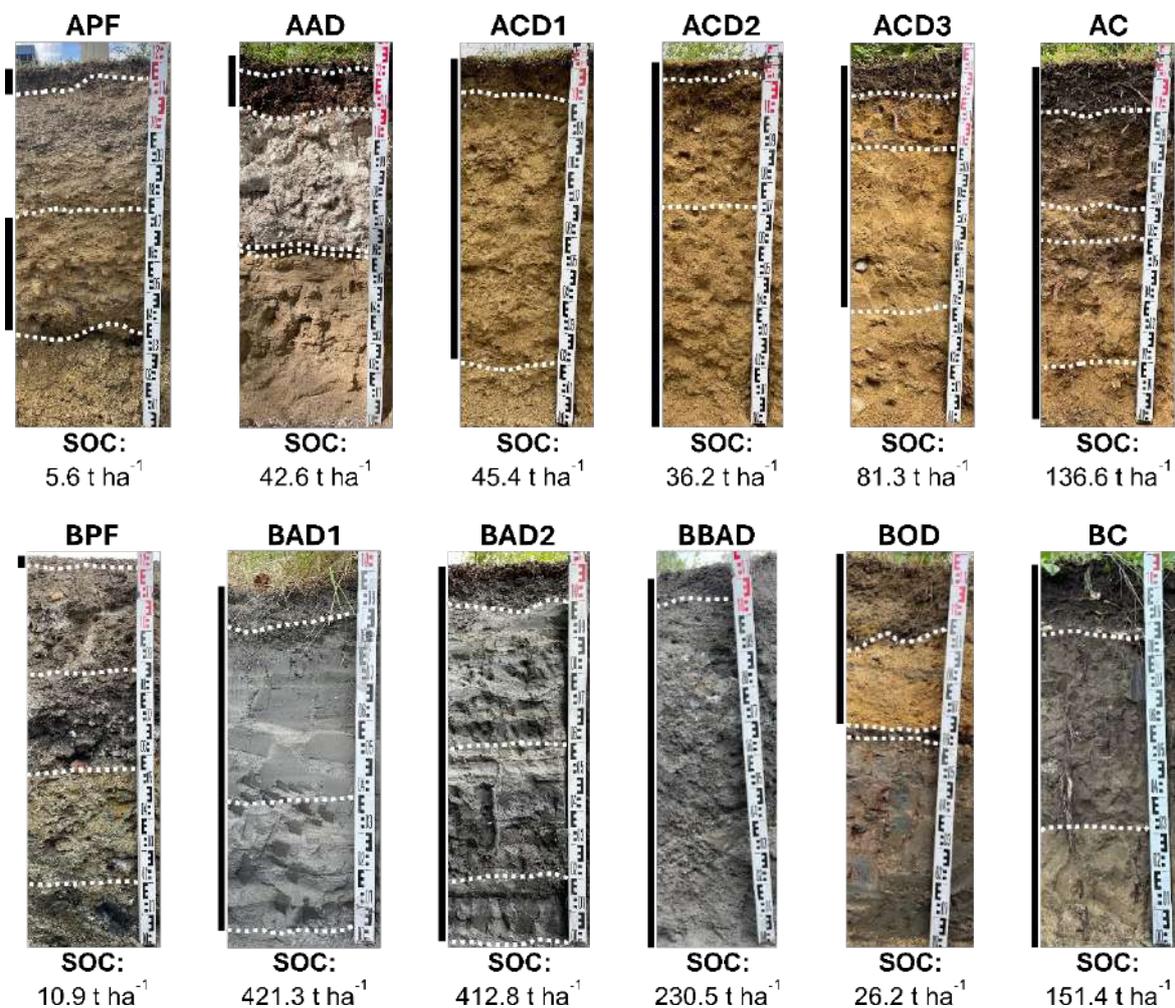
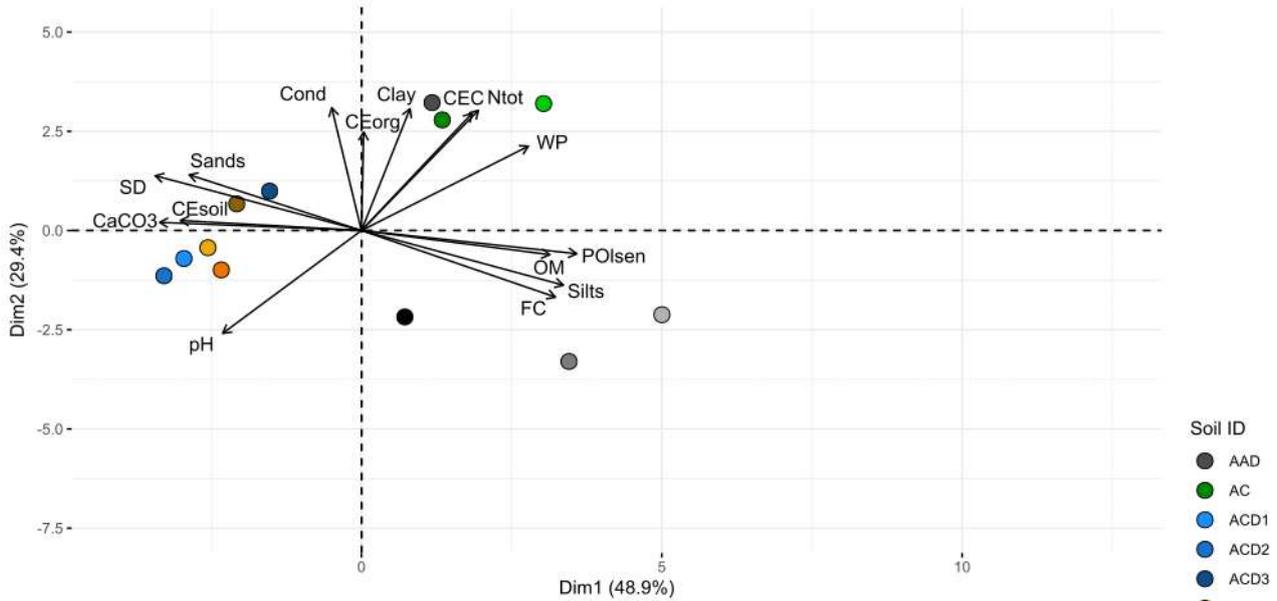


Figure 1. Photographies des profils de sol observés sur les sites d'études. Les lignes en pointillés délimitent les différents horizons observés lors de la description des fosses pédologiques. Le stock de carbone organique (SOC) a été estimé sur les horizons analysés de chaque profil (barre noire à gauche des profils). Légende : A et B pour site A et B, PF = Plant Foundation, AD = Ash Deposit, CD = Coal Deposit, BAD = Bottom Ash Deposit, OD = Oil Deposit, C = Control. ©Caroline Dalquier.

En effet, des zones situées sur le même site ou non mais avec des usages similaires présentent un nombre d'horizons ou une profondeur d'enracinement différents. De plus, pour un même usage industriel passé, des sols présentent des stocks de carbone organique allant du simple au double (e.g. sol ACD2 vs ACD3). Ainsi, un sol remanié dans le cadre d'une activité industrielle donnée n'aboutira pas à la formation d'un même Technosol.

A l'aide d'analyses de composante principale (ACP), nous avons mis en évidence une complémentarité élevée entre la caractérisation des indicateurs biologiques et la caractérisation des indicateurs physico-chimiques des douze prélèvements de surface étudiés (Figure 2).

### A PCA - Biplot of physical and chemical parameters



### B PCA - Biplot of biological parameters

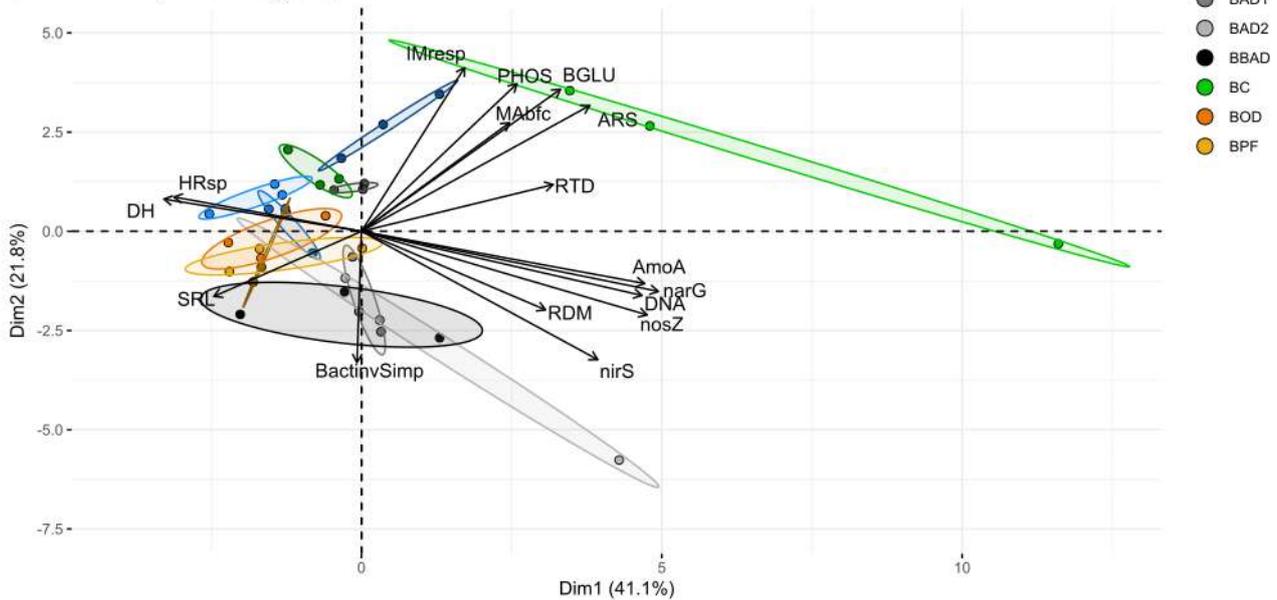


Figure 2. Analyses en Composante Principale des prélèvements de surface et de leurs paramètres physico-chimiques (A) et biologiques (B). Légende : AmoA = gène fonctionnel AmoA (copies.g<sup>-1</sup> sol sec) ; ARS = activité enzymatique de l'Arylsulfatase (nmol.min<sup>-1</sup>.g<sup>-1</sup> sol sec) ; BactinvSimp = Indice inverse de Simpson de la communauté bactérienne ; BGLU = activité enzymatique de la B-Glucosidase (nmol.min<sup>-1</sup>.g<sup>-1</sup> sol sec) ; CaCO<sub>3</sub> = concentration en carbonate de calcium (g. kg<sup>-1</sup> sol sec) ; CEC = Capacité d'Echange Cationique ( méq. 100g<sup>-1</sup>) ; CECorg = teneur en éléments organiques grossiers (%) ; CEssoil = teneur en éléments minéraux grossiers (%) ; Clay = teneur en argile (%) ; Cond = Conductivité du sol (mS.cm<sup>-1</sup>) ; DH = Indice de Simpson de la strate végétale herbacée ; DNA = concentration en ADN microbien du sol extrait (ng g<sup>-1</sup> sol sec) ; FC = Capacité au champ (%) ; HRsp = Richesse spécifique de la strate végétale herbacée (nombre individus. 100m<sup>-2</sup>) ; IMresp = Respiration microbienne induite (mg CO<sub>2</sub>-C.kg<sup>-1</sup> sol sec .h<sup>-1</sup>) ; MAbfc = Abondance fonctionnel de la macrofaune (nombre individus. 100m<sup>-2</sup>) ; narG = gène fonctionnel narG (copies.g<sup>-1</sup> sol sec) ; nirS = gène fonctionnel nirS (copies.g<sup>-1</sup> sol sec) ; nosZ = gène fonctionnel nosZ (copies.g<sup>-1</sup> sol sec) ; pH = pH eau du sol ; PHOS = activité enzymatique de la Phosphatase « neutre » (nmol.min<sup>-1</sup>.g<sup>-1</sup> sol sec) ; POlsen = concentration de phosphore Olsen (g. kg<sup>-1</sup> sol sec) ; RDM = Matière racinaire sèche (mg.g<sup>-1</sup> sol sec) ; RTD = Densité de tissu racinaire (g.cm<sup>-3</sup>) ; Sands = teneur en sables (%) ; SD = Densité réelle du sol (g.cm<sup>-3</sup>) ; Silts = teneur en limons (%) ; SRL = Longueur spécifique racinaire (m.g<sup>-1</sup> sol sec) ; WP = Point de flétrissement du sol (%).

Sur l'ACP des paramètres physico-chimiques, les sols sont discriminés principalement le long du premier axe par la concentration en P<sub>Olsen</sub>, la teneur en limons, la densité réelle et la concentration en CaCO<sub>3</sub> ; et le long du second axe par la conductivité du sol et le pH. Sur l'ACP des paramètres biologiques, les sols sont discriminés majoritairement le long du premier axe par les gènes fonctionnels bactériens *narG*, *nosZ*, *AmoA* la longueur spécifique racinaire, la richesse spécifique de la strate herbacée et l'indice de Simpson de la strate herbacée ; et le long du second axe par l'indice inverse de Simpson de la communauté microbienne, la respiration

microbienne induite du sol et par l'activité de la Phosphatase « neutre ». Ces analyses confirment l'intérêt d'intégrer des indicateurs biologiques car ils apportent une information complémentaire aux indicateurs physico-chimiques couramment utilisés pour l'évaluation des sols, notamment pour discerner plus précisément des sols (*e.g.* ACD3).

## Conclusions et perspectives

Notre étude a mis en évidence que l'état de dégradation d'un sol ne peut pas se définir à partir d'un type d'activité industrielle passée et qu'une analyse fonctionnelle est essentielle pour estimer, de manière précise, le potentiel du sol à accueillir des usages futurs. Nos résultats montrent l'intérêt d'intégrer les paramètres biologiques dans les analyses fonctionnelles car ils apportent une information complémentaire aux paramètres physico-chimiques.

La prochaine étape consiste à tester le modèle cognitif en évaluant le niveau fonctionnel de nos sols en construisant le référentiel et le système de notation pour chaque indicateur. Le référentiel et le système de notation seront nourris par des données issues d'outils existants, de la littérature et de prélèvements de sol sur des sites industriels. L'outil développé permettra d'évaluer le niveau de fonctionnement d'un sol mais il reste à développer un outil d'aide à la décision pour éclairer le propriétaire sur les méthodes de gestion ou les stratégies de réhabilitation écologique qu'il peut mettre en place pour lui permettre, si possible, d'atteindre un fonctionnement de sol compatible avec l'usage futur souhaité.

## Références

Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., García, C., 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147, 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>

Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., Brussaard, L., 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

Calvaruso, C., Blanchart, A., Bertin, S., Grand, C., Pierart, A., Eglin, T., 2021. Revue de la littérature et sélection de paramètres en ateliers participatifs. *Etude et Gestion des Sols*.

Fosse, J., 2019. « Zéro artificialisation nette » : quels leviers pour protéger les sols ? 112.

Joimel, S., Schwartz, C., Hedde, M., Kiyota, S., Krogh, P.H., Nahmani, J., Pérès, G., Vergnes, A., Cortet, J., 2017. Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality. *Science of The Total Environment* 584–585, 614–621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.086>

Séré, G., Le Guern, C., Bispo, A., Layet, C., Ducommun, C., Clesse, M., Schwartz, C., Vidal-Beaudet, L., 2024. Selection of soil health indicators for modelling soil functions to promote smart urban planning. *Science of The Total Environment* 924, 171347. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171347>

Volchko, Y., Norrman, J., Rosén, L., Bergknut, M., Josefsson, S., Söderqvist, T., Norberg, T., Wiberg, K., Tysklind, M., 2014. Using soil function evaluation in multi-criteria decision analysis for sustainability appraisal of remediation alternatives. *Science of The Total Environment* 485–486, 785–791. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.087>

## Remerciements

Ce travail est soutenu financièrement par Electricité de France, l'Université de Lorraine, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières et l'Institut National des Sciences Appliquées Centre - Val de Loire. Les auteurs remercient Emilie LEHERICEY pour leur aide sur le terrain et Hafida TRIS, Catherine JOULIAN, Stéphane COLIN, Lucas CHARROIS pour leur aide lors des mesures au laboratoire.

# Ecological restoration of biodiversity, functions and ecosystemic services of urban-contaminated soils

## Refonctionnalisation écologique des sols urbains pollués en faveur de la biodiversité et des services écosystémiques

Stéphane BOIVIN<sup>1\*</sup>, Olivier HULLOT<sup>2</sup>, Maria-Fernanda ROMERO-SARMIENTO<sup>3</sup>, Jennifer HELLAL<sup>2</sup>, Maira ALVES FORTUNATO<sup>3</sup>, Yannis PITTATORE<sup>1</sup>, Sacha PUECH<sup>1</sup>, Jérôme NESPOULOUS<sup>1</sup>, Virginie DERYCKE<sup>2</sup>, Daniel MONFORT-CLIMENT<sup>2</sup>, David SEBAG<sup>3</sup>, et Hassan BOUKCIM<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Département de Recherche et Développement, Valorhiz SAS, Montpellier, France

<sup>2</sup> BRGM, F-45071 Orléans, France

<sup>3</sup> IFP Energies Nouvelles, Sciences de la Terre et Technologies de l'Environnement Département, Rueil-Malmaison, France

\* contact principal

### Résumé

Ces dernières années ont marqué un tournant dans la gestion des surfaces dégradées et l'émergence d'une volonté forte de prendre en compte le fonctionnement écologique des sols et de minimiser les impacts environnementaux dans toutes les étapes de gestion des sites et sols pollués (SSP). Cependant, de nombreuses questions persistent concernant le suivi de ces fonctions écologiques, les impacts économiques et environnementaux, et leur intégration dans les méthodologies de gestion des sites et sols polluées. Dans cette étude, les effets de différentes modalités de génie écologique mises en place sur quatre sites présentant des pollutions organiques et/ou inorganiques ont été évalués sur des paramètres biotiques (végétation, nématodes et communautés microbiennes du sol) et abiotiques (propriétés physico-chimiques, hydro-structurales, composition de la matière organique du sol) sur une échelle de temps de près de 10 ans. Un volet complet est également consacré à l'évaluation économique et l'implémentation de méthodologies ACV dans ce contexte afin de poser les bases d'une intégration de ces approches dans la démarche de gestion des SSP (schéma conceptuel et analyse coûts-avantages).

### Introduction

Bien que la loi Climat et résilience introduise dorénavant la prise en compte des fonctions écologiques des sols dans l'aménagement du territoire via la notion de "zéro artificialisation nette" ou ZAN, les guides méthodologiques français, y compris ceux en lien avec la gestion des sites et sols pollués, n'accompagnent pas encore les acteurs dans la prise en compte des fonctions du sol. Ce besoin est d'autant plus marqué en ce qui concerne la caractérisation fonctionnelle d'un sol et son orientation vers une trajectoire écologique compatible avec un usage défini par l'aménagement de celui-ci, y compris pour les sols potentiellement pollués affectés par une pollution résiduelle (Limasset et al. 2021). Par ailleurs, à l'instar de la prise en compte des enjeux de protection des populations, la méthodologie nationale française de gestion des sites et sols pollués (SSPs) encourage la prise en compte des enjeux que constituent les ressources naturelles, la biodiversité, etc. (Vincq, 2018). Cependant, elle ne propose pas d'outil spécifique dans le plan de gestion ou dans le cadre des études amont.

C'est dans ce contexte que le projet RESPONSE, financé par l'ADEME, en partenariat avec l'entreprise Valorhiz, le Bureau de Recherche en Géologiques et Minières (BRGM), l'IFP Energies Nouvelles (IFPEN), les métropoles de

Lyon et Montpellier, et le département des Yvelines, a pour objectif à la fois de tester les innovations récentes dans le domaine de la gestion des SSPs à des échelles pertinentes, de progresser dans la compréhension du fonctionnement durable de ces néo-sols qui, par essence, se distinguent des sols classiquement étudiés, tout en y intégrant des outils couramment utilisés dans les démarches de gestion de SSPs tels que les schémas conceptuels et les bilans coût-avantage (BCA). Afin d'atteindre ces objectifs, des actions de recherche fondamentale sur la durabilité fonctionnelle des sols réhabilités à moyen terme (10 ans) et leur impact sur les fonctions écologiques ont été mises en place, ainsi que des actions de recherche industrielle comme la construction de démonstrateurs, l'évaluation économique et environnementale, et le transfert opérationnel à grande échelle.

Dans ce projet, quatre sites urbains présentant des historiques et des niveaux/types de pollutions contrastés (métaux lourds, hydrocarbures, etc.) ont été sélectionnés, et plusieurs modalités expérimentales ont été testées incluant un gradient de coût / effort de génie écologique. Un suivi à moyen terme (10 ans) d'indicateurs biotiques (végétation, nématodes et communautés microbiennes du sol) et abiotiques (propriétés physico-chimiques, hydro-structurales, composition de la matière organique du sol) de la fonction des sols a été réalisé afin d'estimer le niveau de refonctionnalisation écologique de ces sites urbains pollués en comparaison à des modalités contrôles. Les impacts économiques tels que l'empreinte carbone et les besoins en capital et coûts annualisés nécessaires à la mise en place de telles pratiques, ainsi que les impacts environnementaux (analyse de cycle de vie) ont également été estimés. Ici, les résultats des premières années sont présentés.

## Matériel et méthodes

**Sélection des sites d'études et plan de gestion.** En partenariat avec les métropoles de Montpellier, de Lyon et le département des Yvelines, quatre sites d'étude distincts avec des historiques et types/niveaux de pollution contrastés ont été sélectionnés. Le site de Malbosc (Montpellier) correspond à un ancien parc urbain goudronné avec des pollutions légères en hydrocarbures et éléments traces métalliques (ETMs). La Métropole de Montpellier souhaite transformer ce site en espace paysager sur sol fertile à moyen terme. Le site de Pierre-Bénite (Lyon) correspond à un ancien Lycée Technique de BTP dans la vallée de la Chimie avec des pollutions connues au perfluorés et des pollutions légères aux ETMs. La Métropole de Lyon souhaite réhabiliter le site sous forme de zones boisées à moyen terme. Les deux derniers sites sont situés à 5km de distance dans la boucle de Chanteloup les Vignes (Yvelines), dans une ancienne zone d'épandage des eaux usées de Paris, avec des pollutions aux hydrocarbures et aux métaux lourds élevées (Pb, Cd, Hg, Zn). Le Département des Yvelines souhaite réhabiliter ce site sous forme de prairie permanente pour l'inscrire dans un programme de compensation par l'offre dans le cadre du Zéro Artificialisation Nette.

**Mise en place des modalités expérimentales.** En fonction de la surface des sites, des plans de gestion, et des analyses préliminaires des sites, plusieurs modalités expérimentales ont été réalisées incluant un gradient de coût / effort de génie écologique. Ces modalités expérimentales représentent des placettes de 100 à 200m<sup>2</sup> chacune. Sur le site de Malbosc, trois modalités expérimentales ont été mises en place en 2017 incluant notamment un bio-technosol® provenant de l'offre TerraGenèse® de Valorhiz. Le site de Pierre-Bénite a également été mis en place en 2017 et comprend cinq modalités avec plusieurs bio-technosols® contenant notamment des taux de matières organiques contrastés et des techniques de génies écologiques différentes. Enfin, les sites de Chanteloup-les-Vignes ont été mis en place en 2023 et comprennent également des bio-technosol® incluant pour certains une incorporation de biochars. Sur chaque site, une modalité dite 'contrôle' a été conservée comme témoin négatif sans intervention. En fonction du plan de gestion des sites et des modalités expérimentales proposées, des semis de palettes végétales et plantations d'arbres et arbustes adaptées aux conditions pédo-climatiques ont été réalisés.

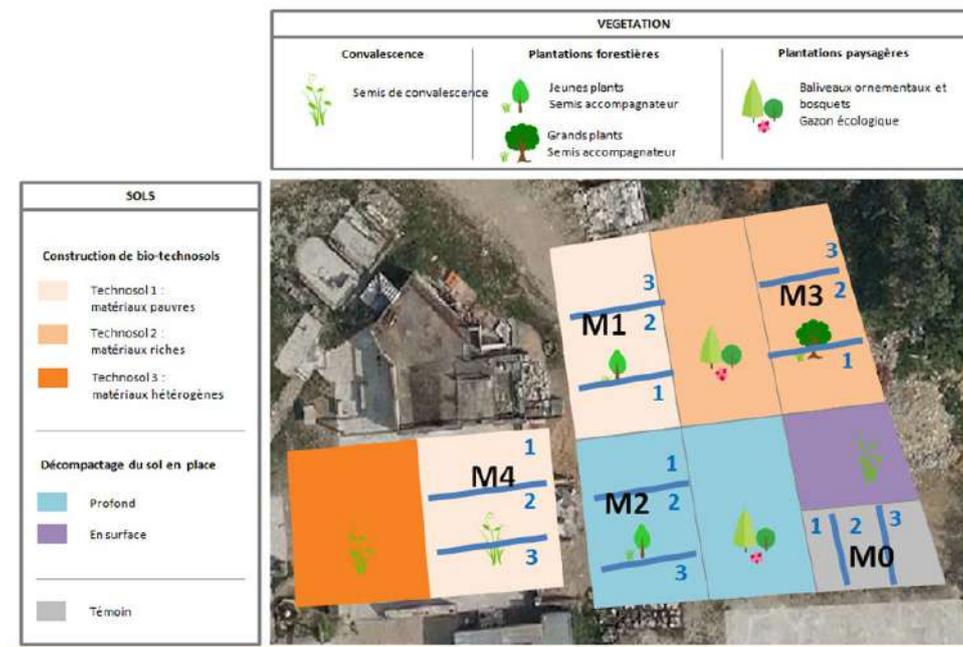


Figure 1 : Exemple du design des modalités expérimentales sur le site de Pierre-Bénite (Métropole de Lyon). Les numéros (1 à 3) représentent les sous-modalités échantillonnées.

**Echantillonnage et mesures de la refonctionnalisation des sites pollués.** Des indicateurs biotiques et abiotiques représentatifs de la fonction des sols ont été mesurés une fois par an, au printemps. Ces indicateurs comprennent des fonctions biologiques comme la diversité végétale, la nématofaune et la diversité microbienne des sols ; des fonctions biogéochimiques (structure et chimie des sols ; stock, formes et dynamique de la matière organique ; biodisponibilité des polluants) ; et des fonctions hydro-géomorphiques (suivi atmosphérique et suivi de l'eau dans les sols). Chaque modalité expérimentale est sous-divisée en trois sections équivalente (trois répliques) afin d'estimer l'hétérogénéité/fiabilité des mesures. Pour chaque sous-modalité, neuf échantillons de sol sont prélevés à la tarière sur la profondeur 0-20cm, tamisés à 2mm, et homogénéisés pour former un échantillon composite. Trois échantillons composites de sol sont donc prélevés par modalité et sont utilisés pour les mesures des indicateurs biotiques et abiotiques du fonctionnement du sol. Des suivis de l'évolution de la végétation spontanée et semée/plantée ont également été réalisés chaque année, au printemps, sur 15 points de contact par modalité.

## Résultats et discussion

Les résultats présentés ici correspondent à un suivi des modalités expérimentales sur le site de Pierre-Bénite (Métropole de Lyon) obtenus après deux ans et demi. Ces résultats sont représentatifs des tendances de refonctionnalisation des sols obtenus sur les autres sites étudiés. Les suivis sont toujours actuellement en cours et des résultats sur 8 ans seront présentés dans le cadre des 5<sup>ème</sup> Rencontres Nationales de La Recherche sur les Sites et Sols Pollués.

Une augmentation progressive de la fertilité des sols dans le temps post-réhabilitation. Les indicateurs de la fertilité des sols utilisés (notamment les quantités d'azote et de carbone organique totaux ; Figure 2A) indiquent globalement une augmentation significative de la fertilité des sols à partir de 18 et 30 mois post-réhabilitation (1,5 fois les quantités initiales), en comparaison avec la modalité témoin M0 qui varie peut-être pour ces paramètres. Les modalités avec le coût d'installation le plus important (M3 et M4) correspondant à un apport de bio-technosol® hétérogène ou riche et un effort de plantation important (grands plants et semis accompagnateurs) ont les meilleurs résultats d'augmentation de la fertilité. Les suivis complémentaires jusqu'à 10 ans permettront d'évaluer finement le bilan coût-avantage de ces stratégies de réhabilitation, et notamment la capacité de stockage de carbone sous forme de Corg. A ce stade (T30 mois), les résultats montrent une séquestration d'environ 144 tonnes de Corg par an sur les 30 premiers centimètres de sol traités.

Les analyses de la biodiversité végétale et du sol vont également dans le sens d'une augmentation de la fertilité de ceux-ci, notamment pour les modalités avec l'effort le plus important (M3 et M4). Par exemple, une augmentation des biomasses microbiennes est observée dans le temps, dans les modalités avec un effort

faible de réhabilitation (M0, et M2), pour atteindre les valeurs de biomasses des modalités avec un effort important de réhabilitation, alors que celles-ci sont stables dans le temps pour les modalités avec un effort important (Figure 2B). Ces résultats suggèrent que des efforts de réhabilitation plus important en amont (bio-technosols® plus riches en matière organique et semis/plantations abondant/diverse) permettent d'apporter directement une microflore abondante et fonctionnelle qui va permettre rapidement de remplir des fonctions écologiques importantes sur les sites.

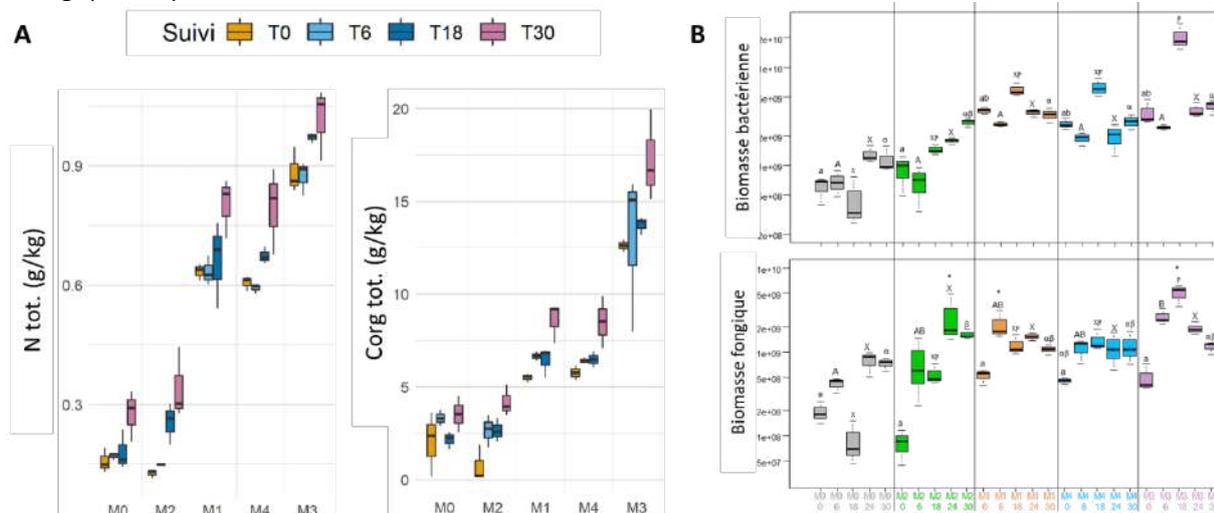


Figure 2 : Sélection d'indicateurs biotiques et abiotiques de la fertilité des sols. Azote total (N tot.), Carbone organique total (Corg tot.); Biomasses microbiennes exprimées en nombre de copie 16S (bactéries) et ITS (champignons)/g de sol; Suivi dans le temps exprimé en mois.

## Conclusions et perspectives

Les bio-technosols® présentent généralement un niveau de fonctionnalité plus hauts que les sols en place. Parmi les modalités sols en place, l'effet du génie écologique est notable vis-à-vis du témoin. On peut estimer que les approches reconstruction de sols font gagner au moins 1 à 2 ans sur la trajectoire de la refonctionalisation par rapport au génie écologique sur sol en place. L'efficacité des solutions dépend des facteurs limitant l'activité biologique des sols. Le génie écologique répond au problème de compaction puis à un apport de matières organiques par de la production de biomasse via les couverts végétaux. Les bio-technosols® réduisent la pierrosité, la compaction et répondent rapidement à un déficit de matières organiques ; identifier les facteurs limitant le fonctionnement biologique des sols est donc essentiels pour proposer des solutions adapter et dans ce cadre l'expérimentation est le moyen le plus sûr avant de déployer une solution sur une grande surface. Le gradient de fonctionnalisation est également lié aux coûts d'intervention (effort), ce qui se retrouve dans l'analyse coût-bénéfices (non présentée ici).

## Références

Limasset et al (2021). Recognising soil values in land use planning systems ([https://www.soilver.eu/wp-content/uploads/2022/02/SOILveR\\_SOILVAL-Note\\_RD-1.pdf](https://www.soilver.eu/wp-content/uploads/2022/02/SOILveR_SOILVAL-Note_RD-1.pdf))

Vincq (2018). Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués ([https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20180123\\_1\\_MardiDGPR\\_B3S.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20180123_1_MardiDGPR_B3S.pdf))

## Remerciements

Ce travail a été financé par l'ADEME dans le cadre des projets Biotubes (2017-2021) et RESPONSE (2023-2027).

# CO2POL – Empreinte carbone des projets et chantiers de dépollution

## Établir un référentiel national sur la méthodologie des calculs d'émissions et donner des chiffres clés

**Christophe CHENE<sup>1\*</sup>, Sébastien KASKASSIAN<sup>2</sup>, Clotilde JOHANSSON<sup>1</sup>, Louise DESSERTINE<sup>1</sup>, Baptiste FILLEBEEN<sup>2</sup>, Niâma EL KARI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ORTEC SOLEO, 8 ter avenue du Docteur Schweitzer, 69330 Meyzieu – christophe.chene@ortec.fr

<sup>2</sup> TAUW France, Parc tertiaire de Mirande, 14 D Rue Pierre de Coubertin, 21000 Dijon – s.kaskassian@tauw.com

### Résumé

L'objectif principal du projet CO2POL, soutenu par l'ADEME et porté par TAUW France et ORTEC-SOLEO, est de mettre à disposition des données publiques qui permettront aux acteurs du métier et à leurs clients de prendre conscience de l'impact des projets de dépollution des sols et des eaux souterraines en termes d'émissions de GES de manière à intégrer ce critère de choix au stade de la conception du projet. Le projet n'a pas pour objet de créer ou de mettre en valeur un outil de calcul, mais plutôt de définir une méthodologie et un périmètre reconnu par l'ensemble de la profession SSP pour réaliser les bilans d'émissions de GES sur des hypothèses communes en France. Soixante chantiers réalisés par différents acteurs de la profession (données fournies par le comité d'experts du projet) seront utilisés pour évaluer le bilan GES sur des cas réels, ceci afin de calculer les facteurs d'émissions moyens pour 7 techniques in-situ (venting, sparging, écrémage, ISCO, ISCR...), 3 techniques on-site (biopile, désorption thermique...), 4 techniques hors-site (excavations avec ou sans tente, blindage...) et autres cas d'intérêt. Les calculs seront réalisés à l'aide de plusieurs outils (notamment ceux développés par les membres du consortium) et fourniront divers indicateurs pertinents (tonnes de CO<sub>2</sub> émis / m<sup>3</sup> ou / t de terre traitée, / kg de polluant, / kEUR dépensés, etc.). Au-delà des données références établies, le projet permettra d'évaluer les postes les plus émissifs, donc les leviers de réduction des impacts. Le projet se déroulant en 2024 et 2025, la méthodologie définie ainsi que les premiers résultats pourront être présentés lors des journées des 5<sup>ème</sup> RNR SSP.

### Introduction

En 2015, lors de la COP 21, les parties à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) ont fixé un objectif de 1,5°C à 2°C d'augmentation de température moyenne mondiale en 2100 par rapport à l'époque préindustrielle. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) précise, en outre, que le respect d'un réchauffement à +1,5 °C implique de réduire les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> de 45 % en 2030 par rapport à 2010 et d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Pour répondre aux engagements pris lors de la COP 21, la France s'appuie sur une décarbonation quasi totale des activités économiques. Les émissions résiduelles seront compensées par l'absorption du secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie (UTCATF) et les captures/stockages technologiques de CO<sub>2</sub>. La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC [1]) révisée en 2019 décrit la progression de l'atténuation des émissions dans les secteurs d'activités pour atteindre la neutralité carbone. Des actions structurantes d'envergure sont nécessaires afin d'atteindre les objectifs fixés par la SNBC, dont la réussite dépend de la mobilisation de tous les acteurs de la société (élus, entreprises, citoyens).

L'Union des Professionnels de la Dépollution des Sites (UPDS) s'est engagée contre le changement climatique, au travers d'une charte reprenant dix pratiques vertueuses pour le climat [2] dont les cinq suivantes sont en lien avec des chantiers de dépollution sobres en carbone :

- Organiser les chantiers de façon à limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) en privilégiant les traitements in situ et sur site,
- Utiliser de préférence des engins (pelles mécaniques, chargeurs, camions, groupes électrogènes, cribles...) fonctionnant grâce à des énergies faiblement émettrices de GES (gaz naturel, électricité...),
- Promouvoir la valorisation de terres excavées afin de limiter l'utilisation de ressources naturelles,
- Privilégier les circuits courts et les sous-traitants implantés à proximité immédiate des chantiers,
- Utiliser de préférence des matériaux recyclés (remblaiement des fouilles, bâches, tuyaux...).

Il existe donc une demande générale forte de la profession et des décideurs (industriels, administrations), en lien avec les politiques publiques de réduction des émissions de GES et de l'évolution réglementaire qui en découle, de pouvoir justifier des techniques de dépollution incluant l'empreinte environnementale au travers des outils méthodologiques propres au secteur des sites et sols pollués (bilan coûts-avantages, plan de conception de travaux, travaux, etc.).

La « Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués » [3] requiert qu'un bilan « coûts-avantages » (BCA) soit mené dans le cadre de la réalisation d'un plan de gestion, afin de sélectionner au moins deux scénarios de gestion. Ce BCA consiste à produire une étude comportant des éléments factuels et détaillés de comparaison de chaque scénario de gestion pertinent sur les mêmes critères de comparaison, intégrant l'ensemble des coûts y compris les coûts annexes, tant sur le plan sanitaire qu'environnemental.

Devant ce besoin de déterminer les bilans d'émissions de GES dans la profession des SSP, quelques études se sont intéressées au calcul des émissions de CO<sub>2</sub> et GES sur certains chantiers, et différents outils sont développés en interne par chaque acteur du métier. Il devient primordial d'harmoniser les critères et le périmètre d'étude, pour une méthodologie fiable à échelle nationale, et d'établir un état des lieux des émissions de chaque technique de dépollution des sols et eaux souterraines, basé sur des cas réels.

## Matériel et méthodes

L'objectif du projet est de fournir un cadre méthodologique et des données issues de cas réels pour rendre opérationnelle l'estimation de l'empreinte carbone de chaque technique de dépollution, pour les principales étapes des études et des travaux de gestion des sites et sols pollués.

Le projet CO2POL est alimenté et soutenu par un comité d'experts issus du domaine des Sites et sols pollués, comprenant des sociétés de travaux, des bureaux d'études, des maîtres d'Ouvrages et des Institutionnels. Ce comité d'expert a trois principales missions :

- Participer au retour d'expérience en termes de méthodes, périmètres, hypothèses, outils, etc. utilisés pour l'élaboration des Bilans Carbone à l'échelle d'un chantier,
- Fournir des jeux de données issus de chantiers réels permettant de réaliser les calculs selon la méthodologie et les hypothèses retenues par le projet CO2POL,
- Participer à la construction et à la diffusion des résultats du projet, à savoir : un référentiel méthodologique pour le calcul des empreintes carbone et une base de données des facteurs d'émission (FE) par technique calculés sur la base des chantiers réels.

Dans un premier temps, une revue bibliographique permettant de définir les paramètres, critères, périmètres et choix afin d'établir une méthodologie de calcul commune. Les facteurs d'émission choisis pour les calculs seront issus de la base de données CARBONE de l'ADEME, mais également d'autres sources clairement identifiées et justifiées selon le besoin. Cette étude permettra donc également d'identifier les potentielles lacunes dans les sources.

Puis, le bilan carbone sera réalisé selon le périmètre prédéfini sur 60 chantiers, sélectionnés parmi des cas réels de chantiers finalisés, par lots de 3 à 5 chantiers pour chaque technique ciblée. Soit : 7 techniques in-situ parmi les plus utilisées en France (venting, sparging, écrémage, ISCO, ISCR, désorption thermique, traitement par bio aérobie/anaérobie...), 3 techniques on-site (biopile, désorption thermique, landfarming...), 4 techniques

hors-site (excavations avec ou sans tente, criblage, blindage...) et autres cas d'intérêt. Si possible, différentes tailles de chantiers seront sélectionnées pour une même technique.

Les calculs du CO<sub>2</sub> émis seront réalisés à l'aide d'un ou de plusieurs outils (notamment ceux développés par TAUW France et ORTEC SOLEO, et éventuellement ceux des participants au comité d'expert le cas échéant). Sur certains chantiers clés, les outils seront comparés pour valider la bonne calibration de la méthodologie appliquée.

Ce projet se basera donc sur une approche statistique, en plus de l'approche méthodologique, permettant d'obtenir des valeurs moyennes (avec intervalles de confiance) par famille et des indicateurs ramenés aux unités pertinentes du chantier (volumes traités, durée, coût financier, etc.) et permettant une utilisation opérationnelle des acteurs de la gestion des sites et sols pollués.

## Résultats et discussion

### Etude bibliographique

L'étude bibliographique engagée permet déjà de mettre en lumière l'absence de consensus concernant :

- Les méthodes d'évaluation utilisées pour estimer les émissions liées aux chantiers de dépollution : bilan carbone (méthode basée sur la démarche ADEME ou méthodes internes / adaptées) et Analyse du Cycle de Vie (ACV) ;
- Les postes d'émission retenus pour cette évaluation, où l'on retrouve généralement les postes suivants : machines et engins, installations et équipements, matériel et consommables, fonctionnement, transport, sous-traitance. Où se situent les déchets issus du chantier (EPI, terres excavées) ?
- Les hypothèses concernant le périmètre de l'évaluation global ou associé à certains postes, par exemple :
  - Postes « machines et engins », « installations et équipements » et « transport » : prise en compte uniquement de l'exploitation (consommation, déplacement, maintenance) ou également de l'amortissement (émission pondérée à la durée de vie de l'outil) ?
  - Poste « sous-traitance » : comment extraire des bilans carbonés établis par certaines activités (laboratoire d'analyse, forage, exutoires de gestion des déchets et terres excavées, etc.) les facteurs d'émission utiles à l'estimation ?
  - Poste « matériel et consommables » : prise en compte de l'empreinte liée à la fabrication seulement ou également à la fin de vie (gestion des déchets induits, valorisation, réutilisation après nettoyage, etc.)
  - Prise en compte des émissions fugitives : respiration bactérienne, réactions chimiques et sous-produits, etc.
- Les données utilisées pour réaliser l'estimation : données physiques / données financières ? Ce qui renvoie aux méthodes retenues et aux bases de données de facteurs d'émission unitaires (données publiques / données fournisseurs).

Outre le manque de consensus, il apparaît que le poids de ces hypothèses sera très différent selon les méthodes de traitement évaluées : les hypothèses liées aux engins/transport et déchets sont très sensibles pour un scénario impliquant de gros volumes de sol excavées alors qu'elles le seront moins pour un scénario de venting par exemple. Ainsi si les résultats issus du projet CO<sub>2</sub>POL doivent être utilisés comme un des indicateurs de comparaison des différentes techniques de traitement pour un site donné (PG, BCA), il est important que le périmètre retenu pour l'estimation n'induisse pas de biais trop significatifs.

### Estimations sur un chantier test

Le chantier test retenu correspond à l'excavation des sols pollués par des hydrocarbures pétroliers lors d'une fuite d'un pipeline. La nappe s'établissant à 3m de profondeur, l'excavation a été réalisée sur une superficie de 4 970 m<sup>3</sup> et une profondeur moyenne de 4,5 m. Les terres excavées ont été pour partie dirigées vers des filières de traitement et/ou de valorisation hors site (tout comme l'eau pompée en fond de fouille) et pour partie utilisées pour remblayer la fouille en complément de matériaux d'apport extérieur au site. Afin d'illustrer les difficultés opérationnelles à l'estimation d'un bilan carbone le plus complet possible à l'échelle d'un chantier, sont ici présentés deux postes récurrents à tout chantier : « transport des matériaux et personnels » et « monitoring ». D'une manière générale, la démarche retenue est basée sur celle de l'ADEME [4]. Toutes les

hypothèses ne sont pas décrites ici mais les temps d'ingénierie ne sont pas pris en compte dans les estimations.

Le poste « transport » lors de ce chantier se décompose en le transport de matériaux (équipement et matériaux d'apport pour la fouille, terres polluées vers les filières) et de personnes (déplacement du et vers le chantier). Le Tableau 1 ci-dessous indique que 72 % des émissions totales du transport est associé aux transports de matériaux (données issues de SEVE [5] et GLEC [6]). On note également qu'environ 13% des émissions totales est associé à l'amortissement des engins et véhicules, poste d'émission souvent négligé dans certaines publications [5]. D'un point de vue des émissions de GES, des choix peuvent être fait sur les véhicules utilisés pour réduire les émissions en choisissant certaines catégories de camion transportant les matériaux par exemple.

Postes	Description	Exploitation – T CO <sub>2</sub> e	Amortissement – T CO <sub>2</sub> e
Transport de matériaux (y.c. équipement et terres / déchets vers les exutoires) <b>TOTAL = 72,6 T CO<sub>2</sub>e</b>	Camion 40T = 387 820 t.km Camion plateau = 2 100 km Tombereau 30-50T = 89 jours Camion 6x4 = 4 jours	CO <sub>2</sub> e Camion 40T = 32,9 CO <sub>2</sub> e Camion plateau = 0,82 CO <sub>2</sub> e Tombereau 30-50T = 31.9 CO <sub>2</sub> e Camion 6x4 = 1.44	CO <sub>2</sub> e Camion 40T = 4,65 CO <sub>2</sub> e Camion plateau = 0,06 CO <sub>2</sub> e Tombereau 30-50T = 0.84 CO <sub>2</sub> e Camion 6x4 = 0,02
Transport de personnes (AR agence / chantier) <b>TOTAL = 37,6 T CO<sub>2</sub>e</b>	Dist. Voit. Ess. = 32 510 km Dist. Voit. Diesel = 120 750 km Dist. Train (TGV + TER) = 10 560 km	CO <sub>2</sub> e Voit. Ess. = 6,40 CO <sub>2</sub> e Voit. Diesel = 22,5 CO <sub>2</sub> e Train (TGV + TER) = 0,06	CO <sub>2</sub> e Voiture Ess. = 1,83 CO <sub>2</sub> e Voit. Diesel = 6,79 CO <sub>2</sub> e Train (TGV + TER) = 0,003
<b>TOTAL = 110,2 T CO<sub>2</sub>e</b>	-	<b>CO<sub>2</sub>e Exploitation = 96.02</b>	<b>CO<sub>2</sub>e Amortissement = 14.2</b>

Tableau 1 : Emissions de CO<sub>2</sub> équivalent – Poste transport sur un chantier test

Le poste « monitoring » (prestations SUIVI et CONT) lors de ce chantier se décompose en la réalisation de sondages et piézomètres (foration et suivi – échantillonnage) et d'analyse en laboratoire (cf. Tableau 2). Formellement les déchets générés par la réalisation du monitoring devraient être inclus mais par manque de données, ce poste n'a pas été inclus à l'estimation.

50 % des émissions totales du monitoring est associé aux analyses en laboratoire ; cette émission étant sujette à incertitude puisqu'estimée sur la base d'indicateurs financiers pour des secteurs similaires (moyenne des FE des secteurs « Recherche et Développement » et « Produits pharmaceutiques », base ADEME [7]). Cet estimateur financier n'intègre pas les émissions lors de l'utilisation et de la fin de vie du produit ce qui peut s'apparenter dans le cas des analyses à la gestion des déchets émis par le laboratoire. L'autre poste significatif (46 %) correspond à la réalisation des forages (piézomètres, sondages, équipements, estimée basé sur le guide SEVE [5]) dans lequel le fonctionnement de la foreuse est prépondérant (32 % du total). Bien que le poste « déchets » ne soit pas quantifié, ce type de chantier peut générer a minima 10 tonnes de déchets (cuttings de forage, eau de purge, EPI jetable et consommables, voire déchets issus du laboratoire), soit une émission entre 1,3 et 8,4 T CO<sub>2</sub>e en fonction du mode de traitement de ces déchets (déchets dangereux moyen = 0,13 CO<sub>2</sub>e / T déchet, déchets dangereux incinérés = 0,84 CO<sub>2</sub>e / T déchet, [7]), ce qui peut représenter un poste non négligeable et donc engendre de fortes incertitudes pour l'émission totale du « monitoring » (valeurs et incertitudes similaires au poste « analyses »).

Postes	Description	Exploitation – T CO <sub>2</sub> e	Amortissement – T CO <sub>2</sub> e
Analyses en laboratoire <b>TOTAL = 3,75 T CO<sub>2</sub>e</b>	9 kEUR Indicateur financier	CO <sub>2</sub> e = 3,75 (min. : 2,5 - max. : 5) Les FE associés aux indicateurs financiers intègrent les deux postes	
Forage pour l'échantillonnage <b>TOTAL = 3,49 T CO<sub>2</sub>e</b>	21 puits/piézomètres à 9m 17 j de forage (dont 1 journée de sondages sol)	CO <sub>2</sub> e Foreuse = 2,41 CO <sub>2</sub> e Transport = 0,60 CO <sub>2</sub> e Equipment Piézo. = 0,32	CO <sub>2</sub> e = 0,16 Foreuse et engins de transport
Déplacement pour l'échantillonnage <b>TOTAL = 0,33 T CO<sub>2</sub>e</b>	Dist. Voit. Diesel = 1 336 km	CO <sub>2</sub> e Voit. Diesel = 0,25	CO <sub>2</sub> e Voit. Diesel = 0,08
Déchets liés à l'échantillonnage <b>Non estimé</b>	EPI jetables, consommables, eau de purge, cuttings, etc.	Non pris en compte dans cette évaluation par manque de suivi des quantités et incertitudes sur les facteurs d'émission	
<b>TOTAL = 7,57 T CO<sub>2</sub>e</b>	Hors déchets induits	<b>CO<sub>2</sub>e Analyses labo. = 3,75 (incluant exploitation et amortissement)</b>	
		CO <sub>2</sub> e Engins / Equipement = 3,58	CO <sub>2</sub> e Engins / Equipement = 0,24

Tableau 2 : Emissions de CO<sub>2</sub> équivalent – Poste monitoring sur un chantier test

Dans le cadre de ce chantier test, on note que le poste « transport » est prépondérant, et que l'amortissement des véhicules seul est même à l'origine de d'émission de GES supérieures au poste « monitoring ». Les sources d'incertitudes sur ce poste sont multiples : prise en compte d'indicateur financier pour les analyses en laboratoire (2,5 à 5,0 T CO<sub>2</sub>e) et la prise en compte des déchets générés par l'échantillonnage (1,3 à 8,4 T CO<sub>2</sub>e). Dans le cadre d'un chantier d'excavation, les émissions associées au traitement des terres en filières hors site est très probablement significatif mais les FE renseignés dans les bases de données « déchets » ne semblent pas adaptés au traitement des terres polluées. Le projet CO2POL s'attachera donc à consolider les données produites par les gestionnaires de ces filières de traitement (ISDI, ISDND, biocentre, etc.).

### Résultats attendus du projet

Un livre méthodologique public définissant le périmètre du calcul des bilans GES pour le métier des sites est sols pollués sera établi permettant à chaque acteur de réaliser un bilan des émissions de GES sur des critères admis par la profession, il comprendra les méthodes, outils, hypothèses, décisions-REX du groupe d'expert. Les calculs réalisés sur les cas d'études fourniront des indicateurs : en tonnes de CO<sub>2</sub> émis par m<sup>3</sup> ou par t de terre/eau traitée, par kg de polluant, par kEUR dépensés, par mois de chantier, etc. Une table de référence par technique sera ainsi établie, comme celle du Tableau 3, issue de la littérature : estimation via une ACV complète [8] et retour d'expérience projet via un bilan carbone ADEME détail sur les périmètres retenus [9].

Type de traitement	Emissions de CO <sub>2</sub> équivalent
Venting/sparging	5 à 15 kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
Excavation + élimination hors site	80 à 160 kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>

Tableau 3 : Données de la littérature : exemples de facteurs d'émissions de procédés de dépollution

En plus d'obtenir une estimation des émissions de GES du scénario de traitement étudié, la base de données permettra d'identifier les postes les plus émissifs sur lesquels il conviendra d'agir en priorité afin de maximiser l'objectif global du projet à savoir contribuer significativement à la réduction des émissions de GES. Les résultats de l'étude doivent permettre in fine d'envisager des voies d'optimisation des principaux postes les plus émissifs et de quantifier simplement et visuellement les gains apportés par la mise en œuvre de ces optimisations qui peuvent influencer sur les trois leviers de réduction des émissions de GES disponibles :

- Sobriété (i.e. questionner nos besoins énergétiques et prioriser les essentiels) :
  - Réduction des distances parcourues (proximité, optimisation des déplacements, etc.),
  - Réutilisation / valorisation des matériaux traités plutôt qu'une évacuation hors-site en qualité de déchets,
  - Préservation des ressources naturelles (sol, eau, air, etc.) en réduisant autant que possible leur exploitation,
- Efficacité (i.e. réduire la quantité d'énergie pour satisfaire un même besoin en privilégiant le système le plus économe) :
  - Optimisation du dimensionnement des installations (éviter le surdimensionnement !),
  - Utilisation d'équipements et matériels économes en énergie,
- Energie bas-carbone (i.e. utiliser exclusivement des énergies bas-carbone) :
  - Utilisation d'énergies renouvelables pour le fonctionnement des installations de chantier (solaire, etc.),
  - Utilisation d'engins électrifiés (en France, électricité peu carbonée du fait du mix énergétique en faveur du nucléaire et des renouvelables),
  - Utilisation de (bio-)carburants alternatifs pour les installations ne pouvant pas être électrifiées facilement.

## Conclusions et perspectives

Le projet CO2POL a démarré en décembre 2023. Au jour de cette candidature, le travail de bibliographie est bien avancé et a permis de mettre en lumière plusieurs questions critiques concernant le périmètre de calcul des bilans d'émissions de GES (méthodologie, principaux postes d'émission, hypothèses et périmètre, base de données de FE). La recherche bibliographique montre également l'absence de consensus national sur cette méthodologie de calcul, pourtant nécessaire dans le contexte d'une mesure, estimation et baisse des émissions à l'horizon 2050.

Les calculs présentés sur un chantier test d'excavation de sols ont montré d'une part que certains postes ne sont pas négligeables (amortissement des véhicules et engins du poste « transport » comptant pour 15 % des émissions), peuvent induire de fortes incertitudes (poste « monitoring » : utilisation de FE financiers, prise en compte des déchets générés lors des échantillonnages) et illustrent le manque de données pertinente concernant les FE associées aux filières de traitement hors site. Il apparaît aussi que ces biais appliqués à un chantier de traitement in-situ induiraient les mêmes incertitudes. Pour l'objectif de comparaison des scénarios de réhabilitation des sites (PG, BCA), il est donc important d'homogénéiser les méthodes et les hypothèses d'estimation.

A ce jour, le comité d'experts a été défini et est constitué de divers acteurs de la gestion des SSP (maîtres d'ouvrage, bureaux d'études - domaine B, entreprise de travaux - domaine C, EPIC et UPDS). Ce comité aidera le projet à orienter la méthodologie et à collecter les cas d'études pertinents pour mener les calculs. La présentation proposée lors des 5<sup>ème</sup> RNR SSP permettra de rappeler les enjeux liés à cette étude et son intérêt pour le métier des SSP, ainsi que les résultats disponibles, à savoir :

- Bibliographie : identification des études, méthodologies et outils existants,
- Périmètre retenu pour le calcul des émissions GES sur les chantiers de dépollution,
- Listes de cas d'études représentatifs et émissions des chantiers pour lesquels l'estimation a été réalisée (bilan global, poste d'émission principaux, indicateurs pertinents et incertitudes).

## Références

- [1] Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Ministère de la Transition énergétique – Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) - 21 juillet 2022 - <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>
- [2] UPDS – Mars 2021 – Charte UPDS. Lutte contre le changement climatique. 1 page.
- [3] Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, Direction générale de la prévention des risques – Bureau du sol et du sous-sol – Avril 2017 – Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. 128 pages.
- [4] ADEME, Méthode pour la réalisation des bilans d'émissions de gaz à effet de serre, conformément à l'article L. 229-25 du code de l'environnement. Version 5 – Juillet 2022, 112 pages
- [5] [Acteurs pour la planète | SEVE-TP \(fnpt.fr\)](#), Méthodologie et sources – Version 4.0 (Février 2022)
- [6] Global Logistics Emissions Council Framework (GLEC), For logistics Emissions Accounting and Reporting V3.0. 02/04/2024
- [7] [Documentation des jeux de données monocritères issus de la Base Carbone® | Base Empreinte® \(ademe.fr\)](#)
- [8] ADEME, BRGM, « SOLENV – Evaluation environnementale des technologies de traitement de sols et des eaux souterraines polluées », 2011
- [9] UPDS, COLAS ENVIRONNEMENT, ERM, « Défis de la décarbonation dans le domaine des sites et sols pollués », Octobre 2021

## Remerciements

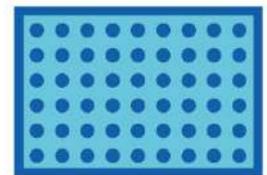
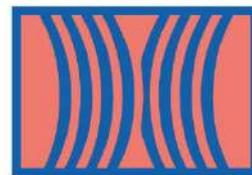
Les auteurs adressent leurs remerciements à l'ADEME, l'UPDS et aux participants du comité d'experts du projet CO2POL pour leur contribution à ce travail, leur soutien et leurs conseils.

## COMMUNICATIONS ORALES

# 5<sup>e</sup> RENCONTRES NATIONALES

de la Recherche sur  
les sites et sols pollués

**04 et 05 février 2025 - Paris**



**Recueil des résumés**

ATELIER 5B : Nouvelles  
opportunités pour de nouveaux  
usages des fonciers délaissés

En partenariat avec :



# Atelier 5B

---

## Nouvelles opportunités pour de nouveaux usages des fonciers délaissés

[Approches environnementales des solutions de gestion des sols pollués]

### Évaluation des sols contaminés en cours de renaturation 3

▶ À l'aide d'indicateurs de la fonctionnalité et de l'écotoxicité des sols pollués aux métaux

### Nouvelles perspectives pour la sécurité alimentaire et la gestion des sites contaminés aux POC 8

Transfert de dieldrine dans des cucurbitacées et non-cucurbitacées et optimisation de la phytoextraction des plantes sur des sites pollués

### Agromine des métaux sur une friche polycontaminées 14

Retour d'expérience du projet SOLAMET

### Agromine et systèmes photovoltaïques sur friche industrielle 20

Quel dispositif optimal pour le couplage plantes hyperaccumulatrices et systèmes photovoltaïques ?

### Intégration « délicate » des enjeux de biodiversité dans le cadre des travaux de mise en sécurité d'une ancienne décharge de laitiers 26

# Évaluation des sols contaminés en cours de renaturation

## À l'aide d'indicateurs de la fonctionnalité et de l'écotoxicité des sols pollués aux métaux

Julien GOUTANT<sup>1</sup>, Annabelle DERAM<sup>2</sup> et Valérie BERT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> : Unité Impact Sanitaire et Expositions, INERIS, Parc Technologique ALATA, BP2, Verneuil-en-Halatte,

[julien.goutant@ineris.fr](mailto:julien.goutant@ineris.fr), [valerie.bert@ineris.fr](mailto:valerie.bert@ineris.fr)

<sup>2</sup> : Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, Université de Lille, Bâtiment ESPRIT, Cité Scientifique, 59655, Villeneuve d'Ascq Cedex, [annabelle.deram@univ-lille.fr](mailto:annabelle.deram@univ-lille.fr)

\*[julien.goutant@ineris.fr](mailto:julien.goutant@ineris.fr)

## Résumé

L'écosystème constitué par le continuum sol-plante-eau peut être exposé à des situations de pollution, notamment aux métaux. De nouvelles utilisations des sols pollués peuvent être envisagées afin de les protéger et de restaurer voire d'améliorer leurs fonctions tout en réduisant l'exposition aux polluants. Dans ce contexte, des approches de réhabilitation écologique qui prennent en compte le degré de dégradation de l'écosystème, les utilisations futures des terres, le caractère abordable des solutions et l'impact du changement climatique peuvent être pertinentes. Ainsi, à travers 2 projets en cours (REVE, REECOL), plusieurs couvertures végétales sur plusieurs sites contaminés par des métaux seront suivies. De plus, divers indicateurs physico-chimiques, biologiques et écotoxicologiques seront mesurés pour caractériser la qualité du sol en relation avec ces couverts végétaux ainsi que la qualité et la santé de ces derniers. Les meilleures stratégies pour réduire l'exposition aux métaux tout en offrant d'autres avantages sur les fonctions du sol, l'amélioration de la biodiversité et les services écosystémiques seront étudiées. Les résultats présentés ici se concentrent exclusivement sur le projet REVE.

## Introduction

La méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (SSP) repose sur la gestion des risques sanitaires et environnementaux suivant l'usage des milieux. Cet enjeu conduit à développer des méthodes de gestion des sols afin de réduire l'exposition aux polluants des populations et de l'environnement. Les avancées réglementaires récentes en matière de biodiversité et de climat couplées notamment avec la proposition d'une directive sur la surveillance et la résilience des sols et l'adoption d'un décret sur les usages en gestion des SSP dont l'usage de renaturation (Usage n°7, Article 1, Décret n°2022-1588 du 19 décembre 2022) sont de nature à inciter les acteurs des SSP à s'intéresser à des alternatives respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte, un regain d'intérêt est porté aux solutions de gestion des sols pollués basées sur le végétal (Bert *et al.*, 2017). Le couvert végétal réduit l'exposition aux polluants en limitant le contact direct avec le sol. Il freine également l'érosion, l'envol de poussière et les transferts de contaminants dans le sol, tant horizontaux que verticaux. Couplé à des amendements organiques, biologiques ou minéraux, le végétal peut permettre *a minima* de conserver le sol pollué en place (économie de ressources) voire d'améliorer certaines de ses fonctions tout en apportant des services écosystémiques au bénéfice des populations humaines. L'étude concerne le développement et la validation d'indicateurs agro-pédo-physico-chimiques, écotoxicologiques et

écologiques permettant de renseigner sur la santé des sols<sup>1</sup> contaminés par des pollutions diffuses en présence de divers couverts végétaux. L'objectif est de déterminer leur fonctionnalité et le cas échéant de les améliorer afin de rendre ces sols aptes à remplir leurs fonctions et à rendre des services écosystémiques. L'étude s'inscrit dans deux projets dont le projet Gésipol ADEME 2023 REVE (REqualification de sols urbains pollués par les métaux par la mise en œuvre d'un couvert VEgétal : évaluation des bénéfices écologiques et sociaux) et RFCS 2022 REECOL (Ecological rehabilitation and long term monitoring of post mining areas) et repose sur trois sites expérimentaux en milieu urbain qui bénéficient de résultats d'études préalables. L'usage envisagé pour les sites des deux projets sont des espaces de nature non accessibles au public (prairie fleurie, noue et espace boisé) visant à développer la biodiversité et les habitats pour les écosystèmes, en privilégiant les espèces locales, conserver ou améliorer les fonctionnalités du sol. Ainsi, l'étude s'articule autour de plusieurs questions : Quelles sont les fonctions du sol impactées par la pollution ? Parmi ces fonctions, quelles sont celles qu'il faudrait restaurer ou améliorer en tenant compte de l'usage, des caractéristiques et de la pollution des sites ? Quels sont les indicateurs les plus pertinents qui renseignent sur ces fonctions ? Quelles solutions basées sur la renaturation faut-il mettre en œuvre pour réaliser ces objectifs ? Enfin, quels sont les impacts sur la biodiversité et sur le sol lorsqu'une (ou plusieurs) espèce(s) végétale(s) est (sont) considérée(s) comme envahissante(s) ? Quelles sont les méthodes de gestion pour éradiquer ou limiter la propagation de telles espèces ?

## Matériel et méthodes

Une première étape a consisté à caractériser les compartiments environnementaux des sites (site du projet REECOL et site 2 du projet REVE). Pour cela, des inventaires floristiques ont été réalisés pour analyser la végétation en place, ainsi qu'un échantillonnage des sols visant à examiner les pollutions présentes et à déterminer les autres propriétés des sols. Dans le cadre du projet REVE, les deux parcelles d'expérimentation se situent sur le territoire de la communauté d'agglomération Creil Sud Oise. Le site 1 est une noue végétalisée avec la poacée *Calamagrostis epigeios* situé à Creil. Le site 2 est un espace paysager en bordure d'une voie douce végétalisée avec *Arabidopsis halleri*, *Salix viminalis* et un mélange d'espèces naturelles majoritairement représentées par l'ortie dioïque (*Urtica dioica*) et le gaillet gratteron (*Galium aparine*). Les deux sites présentent les mêmes caractéristiques de pollution ( $C_{\text{totale}}$  en  $\mu\text{g/g}$  de sol sec : Cd :  $1,66 \pm 0,02$  ; Cu :  $113 \pm 37$  ; Pb :  $263 \pm 83$  ; Zn :  $616 \pm 248$ ). De plus, ils bénéficient de résultats issus de nombreuses données qui concernent les transferts de polluants métalliques sol-plante (Grignet *et al.*, 2021). Dans cette contribution, nous nous focaliserons sur le site 2. Deux modalités ont été établies sur ce site en fonction de la présence ou non du saule des vanniers (*Salix viminalis*). En effet, le saule des vanniers ayant été planté fait partie intégrante d'un milieu fermé nommé Modalité « Saulaie ». Celui-ci n'occupe pas la totalité du site. En dehors de la saulaie, on retrouve un milieu ouvert nommé Modalité « Fourré ». Les prélèvements de sols et de plantes effectués permettront de comparer la composition de ces deux milieux afin de mettre en évidence un (ou plusieurs) paramètre(s) qui les différencie(nt).

### Inventaire floristique

Un inventaire floristique est effectué au printemps dans le but de recenser le nombre d'espèces végétales présentes sur la parcelle. Il permet d'obtenir des informations sur la diversité végétale présente (abondance et richesse des espèces). De plus, un premier profil du sol peut être établi en se basant sur les exigences des espèces végétales relevées. Ainsi, les premiers inventaires floristiques ont été réalisés le 22 avril et le 22 mai 2024 sur le site 2 (REVE). Les espèces végétales ont été déterminées sur place à l'aide d'une loupe et d'une flore tandis que quelques échantillons ont été prélevés pour une meilleure détermination au laboratoire.

---

<sup>1</sup>Telle que définie dans le Chapitre 1, Article 3 de la Directive du Parlement Européen et du Conseil relative à la surveillance et à la résilience des sols (directive sur la surveillance des sols) du 5 juillet 2023.

## Préparation des échantillons de sols et de plantes pour les analyses en cours

Des échantillons de sols ont été prélevés à l'aide d'une tarière manuelle lors de campagnes d'échantillonnage réalisées le 28 mai et le 7 juin 2024 sur le site 2 du projet REVE afin d'étudier la pollution inorganique (Cd, Cu, Pb, Zn notamment) dans les deux modalités établies. La pollution organique (HAP, HCT et PFAS) a également été analysée pour détecter d'éventuelles dégradations. Les concentrations totales et extractibles en métaux ont été mesurées sur des échantillons séchés, broyés et tamisés à 2mm, suivis d'une minéralisation à l'acide fluorhydrique pour extraire les métaux présents. Les minéralisats obtenus ont été analysés à l'ICP-MS. D'autres analyses, en cours ou prévues, visent à évaluer les propriétés agro-pédo-physico-chimiques, la qualité microbiologique (respiration basale, extraction ADN) et écologique des sols. Des échantillons de parties aériennes d'ortie dioïque et de gaillet gratteron, espèces dominantes des deux modalités, ainsi que des feuilles de saule des vanniers dans la modalité « Saulaie » ont également été prélevés lors d'une campagne réalisée le 26 juin 2024. L'objectif est d'évaluer les transferts sol-plante et de calculer les facteurs de bioconcentration. Les concentrations en métaux ont été mesurées sur des échantillons séchés et broyés avant de subir une minéralisation à l'acide nitrique. Les minéralisats obtenus ont été analysés à l'ICP-OES. Ces résultats permettront de déterminer leur comportement accumulateur ou non vis-à-vis d'une pollution aux métaux. En parallèle, les concentrations en éléments majeurs et traces dans les plantes ont été mesurés pour mettre en évidence d'éventuelles carences (compétition avec les métaux). Enfin, des indicateurs de fonctionnalité des sols (dégradation de la matière organique, activités enzymatiques) et d'écotoxicité des sols (viabilité, croissance et reproduction des nématodes) seront réalisés pour évaluer la santé et la qualité du sol à l'instant t0. Les derniers échantillons de sols, placés sous serre (trois serres par modalité), servent pour des tests de germination afin d'exprimer la banque de graines du sol et identifier de nouvelles espèces végétales non-inventoriées.

## Résultats et discussion

### Inventaire floristique

Sur le site 2 du projet REVE, l'inventaire floristique a permis de recenser 42 espèces de 25 familles différentes (ortie dioïque et gaillet gratteron compris) dont 38% sont exclusivement présentes dans la modalité « Saulaie » et 36% dans la modalité « Fourré ». Aucun symptôme visible de toxicité n'a été observé sur les espèces relevées. Toutes les espèces sont indigènes. La bibliographie sur chacune des espèces végétales identifiées a permis d'établir un premier profil de sol qui est le suivant : présence d'un sol humide, argilo-limoneux, à tendance calcaire, avec un pH compris entre 6,5 et 8,0, riche en nutriments (N, P, K) et en matières organiques.

### Caractérisation agro-pédo-physico-chimique des milieux

Les analyses agro-pédo-physico-chimiques effectuées (**Tableau 1**) vont permettre de confirmer le premier profil de sol. Chaque valeur est comparée aux valeurs de référence fournies par le laboratoire partenaire.

Analyses	Modalité « Fourré »	Modalité « Saulaie »	Valeurs de référence
pH-H <sub>2</sub> O	7,93 ± 0,05 <b>a</b>	8,03 ± 0,08 <b>a</b>	6,5-8,0
Texture du sol	Limoneux	Limoneux-sableux	/
N total (%)	0,17 ± 0,01 <b>a</b>	0,13 ± 0,004 <b>b</b>	0,1-2,0
Rapport C/N	15,8 ± 2,4 <b>a</b>	17,7 ± 0,9 <b>a</b>	8,0-12,0
Matière organique totale (%)	4,7 ± 0,8 <b>a</b>	4,1 ± 0,3 <b>a</b>	1,0-5,0
CaCO <sub>3</sub> total (%)	12,6 ± 2,6 <b>a</b>	10,2 ± 0,5 <b>a</b>	10,0-60,0
P échangeable Olsen (mg/kg) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	103 ± 5,5 <b>a</b>	80 ± 5,6 <b>b</b>	50-500
K échangeable (mg/kg) K <sub>2</sub> O	232 ± 2,5 <b>a</b>	185 ± 4,1 <b>b</b>	100-500

Tableau 1 : Quelques paramètres agro-pédo-physico-chimiques mesurés dans les sols des deux modalités établies sur le site 2. Les différences significatives entre les modalités sont indiquées par les différentes lettres à un seuil de risque  $\alpha = 0,05$ .

Au regard des paramètres mesurés, le pH, la matière organique totale et le CaCO<sub>3</sub> total confirme le premier profil de sol. En effet, un sol est considéré comme calcaire lorsqu'il contient plus 10% de CaCO<sub>3</sub> (**TERREOM, 2022**) et est riche en matières organiques à partir de 4 à 5%. Par ailleurs, un rapport C/N supérieur à 12 est

observable dans les sols riches en matières organiques (**Lagrange et al., 2022**). Il traduit une capacité de minéralisation du N organique plus réduite (proportion élevée de C organique par rapport au N total). Cela signifie que l'azote est en quantité suffisante pour les plantes, tout comme le phosphore et le potassium, avec des concentrations plus élevées dans la modalité « Fourré ». Le pH alcalin mesuré tend à réduire la mobilité des métaux dans la solution du sol (**Kabata-Pendias, 2010**) mais peut conduire à des carences en oligo-éléments essentiels (Cu, Fe, Mn, B). Enfin, bien que la texture diffère entre les deux modalités, elles restent équilibrées, fertiles, favorables au développement des plantes et offrent une bonne perméabilité à l'eau et à l'air.

## **Tests de germination**

Dans chaque serre, le nombre d'espèces et d'individus par espèce a été recensé pour identifier d'éventuelles espèces qui n'ont pas été répertoriées lors des inventaires floristiques, notamment en raison de la compétition végétale, etc. (**Tableau 2**). Par la suite, ces données serviront à calculer des indicateurs écologiques tels que l'indice de Shannon qui permet d'évaluer la diversité végétale d'un site (**Shannon & Weaver, 1949**).

Paramètres	Modalité « Fourré »	Modalité « Saulaie »
Nombre moyen de germinations	119 ± 17 a	99 ± 7 a
Nombre moyen d'espèces différentes	16 ± 2 a	18 ± 2 a
Espèce la plus abondante	Ortie dioïque	Lampsane commune

*Tableau 2 : Nombre moyen de germinations et d'espèces différentes dans les serres des deux modalités établies sur le site 2. Les différences significatives entre les modalités sont indiquées par les différentes lettres à un seuil de risque  $\alpha = 0,05$ .*

Aucune différence significative n'a été observée entre les deux modalités quant au nombre de germinations et d'espèces différentes. Sur le site 2, les espèces les plus abondantes sont l'ortie dioïque et le gaillet gratteron. Dans la modalité « Fourré », les trois serres ont rapidement été dominées par l'ortie et est l'espèce la plus abondante (représentant 38 à 55%). Le gaillet, en revanche, n'a été retrouvé que dans une seule serre avec un unique individu. Pour la modalité « Saulaie », l'espèce la plus abondante est la lampsane commune (représentant 23 à 36%), espèce non-répertoriée lors de l'inventaire floristique. L'ortie dioïque est également présente dans les trois serres, tandis que le gaillet gratteron est observé dans deux d'entre elles. En outre, des collemboles et des vers de terre ont été détectés dans les deux modalités, indiquant que la contamination aux métaux ne limite pas l'établissement de la microfaune du sol. Enfin, ces tests de germination ont permis d'identifier 30 espèces de 22 familles différentes dont 30% sont spécifiques à la modalité « Saulaie » et 20% à la modalité « Fourré ». Par ailleurs, 56% des espèces recensées lors de ces tests n'avaient pas été observées lors des inventaires précédents.

## **Conclusions et perspectives**

L'inventaire floristique sur le site 2, associé aux tests de germination, a démontré que la présence de métaux dans le sol n'est pas un facteur limitant pour le développement des espèces végétales. De plus, les deux modalités présentent des espèces propres à chacune. Ainsi, les résultats permettront de renforcer les acquis concernant les mesures de gestion de la pollution résiduelle basées sur l'utilisation du végétal en milieu urbain à l'aide de divers indicateurs agro-pédo-physico-chimiques, écotoxicologiques et écologiques qui reflètent les fonctions clés du sol requises pour son usage futur. D'autre part, ces travaux serviront à alimenter l'appui aux politiques publiques en matière de gestion des SPP, et plus particulièrement sur le volet usage de renaturation.

## Références

Bert, V., Douay, F., Faure, O. & Cadière, F., ADEME, INERIS, ISA-Lille, Mines Saint-Etienne, 2017. Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués (nouveaux résultats de recherche et démonstration).

Décret 2022/1588 du 19 décembre 2022. Définition des types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués. Journal officiel de la République française, 20 Décembre 2022.

European Commission, 5<sup>th</sup> July 2023. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law). COM/2023/416 final.

Grignet, A., 2021. Étude des performances de phytoextraction du Zn et du Cd de l'hyperaccumulateur *Arabidopsis halleri* en co-culture avec *Salix viminalis*. Sciences des sols. Université du Littoral Côte d'Opale.

Kabata-Pendias, A., 2010. Trace Elements in Soils and Plants, 0 edn. CRC Press.

Lagrange, H., Le Souder, C. & Masson, E. (ARVALIS), 2022. Analyse de terre – La matière organique du sol, un indicateur à suivre, pas forcément à corriger.

Shannon, C.E., Weaver, W., 1949. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana.

TERREOM, 2022. Bien comprendre son analyse de sol : Indicateurs, signification, valeur.

## Remerciements

Julien Goutant est financé par l'INERIS (axe de recherche Comportement des polluants et RISques du site au Territoire). Le projet REVE est un projet financé par l'ADEME dans le cadre de l'APR GESIPOL 2023. Le projet REECOL est financé par le Research Fund of Coal and Steel (RFCS). Nous remercions la communauté d'Agglomération Creil-Sud-Oise (ACSO) pour l'accès aux sites du projet REVE et le groupe Économie Circulaire des Terres excavées (ECT) et Guillaume Lemoine pour l'accès au site du projet REECOL.

# Nouvelles perspectives pour la sécurité alimentaire et la gestion des sites contaminés aux POC

## Transfert de dieldrine dans des cucurbitacées et non-cucurbitacées et optimisation de la phytoextraction des plantes sur des sites pollués

Grégory COHEN<sup>1\*</sup>, Marie-Cécile AFFHOLDER<sup>1,2</sup>, Michel MENCH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> : Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux-INP, EPOC-PROMESS UMR 5805, 1 allée F. Daguin, 33607, Pessac, France – [gregory.cohen@ipb.fr](mailto:gregory.cohen@ipb.fr)

<sup>2</sup> : Univ. Bordeaux, INRAE, BIOGECO, Allée Geoffroy St-Hilaire – bât. B2, CS 50023, 33615 PESSAC cedex, France – [michel.mench@inrae.fr](mailto:michel.mench@inrae.fr)

\* contact : [gregory.cohen@ipb.fr](mailto:gregory.cohen@ipb.fr)

### Résumé

La dieldrine est un pesticide organochloré (POC) utilisé entre 1950 et 1972 encore présent dans des sols agricoles. Elle peut être absorbée par des végétaux, en particulier les Cucurbitacées, selon les espèces et cultivars, pouvant conduire à la production de fruits et légumes ne respectant pas les Limites Maximales en Résidus (LMR) et à des restrictions de vente et d'usage. Il est crucial d'identifier des solutions pour diminuer la biodisponibilité en POC dans les sols et récolter des produits conformes. Les phytotechnologies seraient une solution (i) à court terme pour maintenir une production respectant les LMR et (ii) à long terme pour diminuer la fraction biodisponible de POC dans les sols. Les capacités d'accumulation en dieldrine et son allocation ont été caractérisées pour 17 espèces de non-Cucurbitacées et 10 variétés de courgettes. La variabilité interspécifique d'accumulation dans les fruits de Cucurbitacées a aussi été étudiée pour 14 variétés de 6 autres espèces. En dehors des Cucurbitacées, le vétiver est la seule espèce à accumuler des quantités significatives de dieldrine, surtout dans ses racines. Les Cucurbitacées absorbent de fortes quantités de dieldrine et les transfèrent vers les parties aériennes, montrant un pouvoir de phytoextraction élevé (entre 147 et 275 µg plant<sup>-1</sup>) et une variabilité intraspécifique en dieldrine pour les fruits des courgettes. L'influence des teneurs en dieldrine, du temps d'exposition et de la biomasse du fruit sur les teneurs en dieldrine des fruits de courgette est variable et fonction de la variété. La production de fruits conformes et la phytoextraction progressive de la dieldrine des sols peuvent ainsi être assurées par sélection de variétés peu accumulatrices dans les fruits.

# Introduction

La dieldrine est un pesticide organochloré (POC) qui a été largement utilisé comme insecticide pour la protection des cultures entre les années 50 et 1972, année de son interdiction en agriculture en France (INRS, 2007). En 2001, ce POC a intégré la liste des 12 premiers Polluants Organiques Persistants (POP) lors de la Convention de Stockholm, bannissant sa production et son utilisation (EFSA, 2007 ; Jennings et Li, 2015 ; Matsumoto *et al.*, 2009). Cependant, à cause de son caractère rémanent, cette molécule est encore présente de nos jours dans certains sols agricoles (Colin *et al.*, 2022 ; Gavrilescu, 2005) et peut être absorbée par des végétaux (Namiki *et al.*, 2018 ; Otani *et al.*, 2007 ; Singh et Singh, 2017). Les espèces de la famille des Cucurbitacées en particulier sont connues pour absorber la dieldrine, la transloquer vers les parties aériennes et l'y accumuler, selon les espèces et cultivars (Donnarumma *et al.*, 2009 ; Hashimoto, 2005). En conséquence, certains produits de consommation peuvent contenir de la dieldrine avec des concentrations pouvant parfois dépasser les Limites Maximales en Résidus (LMR) réglementaires (Affholder *et al.*, 2023). En lien avec la toxicité de cette molécule, ceci représente un potentiel danger pour les consommateurs ainsi qu'une mise en péril de la viabilité des exploitations concernées par cette problématique (Colin *et al.*, 2022). Afin d'apporter des solutions innovantes en terme de sureté alimentaire et de gestion et remédiation de ces sols contaminés, cette étude a évalué la variabilité intra et interspécifique d'accumulation de la dieldrine dans les fruits de 7 espèces de Cucurbitacées ainsi que l'accumulation et la distribution de la dieldrine chez 17 espèces de non-Cucurbitacées et 10 variétés de courgette (*Cucurbita pepo*) afin d'évaluer leur potentiel de phytoextraction.

## Matériel et méthodes

La sélection des espèces de Cucurbitacées a été réalisée à partir d'une enquête, menée auprès d'exploitants agricoles d'une zone maraîchère concernée par cette problématique, mettant en avant les principales espèces de Cucurbitacées cultivées localement. Ainsi, 24 variétés de 7 espèces (11 variétés de *C. pepo* L., 4 variétés de *Cucurbita moschata* Duchesne, 2 variétés de *Cucurbita maxima* Duchesne, 4 variétés de *Cucumis sativus* L., 1 variété de *Momordica charantia* L., 1 variété de *Melothria scabra* Naudin et 1 variété de *Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai) ont été sélectionnées. Pour *C. pepo*, la sélection a été réalisée sur les différences phénotypiques offertes par 11 variétés (Adrielle, Anissa, Bélor, Floridor, Gold Rush, Kopana, Mirza, Noire maraîchère, Ola escaladora, Orélia, et Verte non coureuse d'Italie). Les 17 espèces de non-Cucurbitacées ont été sélectionnées à partir de leurs capacités potentielles à dissiper ou accumuler les POC, leur(s) intérêt(s) agronomique et/ou leurs capacités à produire des tensio-actifs pour solubiliser la dieldrine : *Chenopodium quinoa*, *Coriandrum sativum*, *Chrysanthemum coronarium*, *Tagetes patula*, *Helianthus annuus*, *Cannabis sativa*, *Ricinus communis*, *Medicago sativa*, *Lupinus albus*, *Ocimum basilicum*, *Linum usitatissimum*, *Abelmoschus esculentus*, *Corchorus olitorius*, *Zea mays*, *Miscanthus x giganteus*, *Chrysopogon zizanioides*, *Nicotiana tabacum*, et *Tropaeolum majus*. L'ensemble de ces végétaux ont été cultivées après semis dans du terreau non contaminé et une pré-croissance d'un mois en serre avant transplantation *in situ*, conformément aux pratiques agricoles locales. La transplantation a été réalisée sur une parcelle maraîchère dans de large pots de 25 L contenant le sol sableux de cette parcelle et présentant une contamination historique en dieldrine (en moyenne  $123 \pm 32 \mu\text{g kg}^{-1}$  de matière sèche (MS), 0-30 cm, pH 6,8), préalablement tamisé (1 cm) et homogénéisé. Pour chaque variété testée, 4 réplicats ont été réalisés dans des pots individuels, pour un total de 164 plants, enterrés au 2/3 de leur hauteur sur la parcelle afin de limiter leur échauffement. Les éventuelles racines sortantes des trous de drainage étaient coupées régulièrement. La récolte des plants s'est faite 3 à 3,5 mois après leur mise en place et les fruits de Cucurbitacées ont été prélevés à taille marchande (15 - 20 cm de longueur pour *C. pepo*) sur la période de culture. Les biomasses et les concentrations en dieldrine ont été analysées pour tous les organes des non-Cucurbitacées et 10 variétés de courgette. Pour les autres Cucurbitacées et la variété de *C. pepo* Adrielle, seuls les fruits ont été analysés. La quantification en dieldrine a été réalisée sur les sols, les fruits et les autres organes des plantes après extraction au n-heptane et analyses par GC-MS suivant les protocoles de Colin *et al.* (2022), Affholder *et al.* (2023) et Colin *et al.* (2024), respectivement.

# Résultats et discussion

L'ensemble des biomasses récoltées indiquent une biomasse racinaire plus faible pour *C. pepo* par rapport à celle des non-Cucurbitacées. A l'inverse, la biomasse aérienne de *C. pepo* est plus grande que celle des non-Cucurbitacées. En moyenne, 69 % de la biomasse aérienne de *C. pepo* est liée aux fruits alors que 68 % de la biomasse aérienne des espèces non-Cucurbitacées testées est portée par les organes végétatifs. Au total, 334 fruits de Cucurbitacées ont été récoltés et analysés pour les 24 variétés testées, avec de grandes différences de productivité allant en moyenne de 1,5 (*C. pepo* Adrielle) à 9,75 (*C. pepo* Mirza) fruits par plant. Plus de 250 fruits de *C. pepo* mais moins de concombres (30) et très peu de pastèques (4) ont été récoltés en lien avec le nombre de variétés testées pour chaque espèce et des conditions climatiques peu appropriées lors de la saison de culture. Les non-Cucurbitacées allouent plus de 70 % la dieldrine dans leurs racines, sauf le maïs, le ricin et le tabac qui présentent environ 50 % de la dieldrine dans les parties aériennes. En revanche, la distribution en dieldrine pour *C. pepo* montre un stockage de la dieldrine surtout dans les organes aériens (95 ± 1 %), avec en moyenne 38,9 ± 5,2 % de la dieldrine contenue dans les fruits, 33,7 ± 4,9 % dans les tiges et 24,0 ± 2,5 % dans les feuilles (Figure 1). Les résultats montrent que *C. pepo* et le vétiver sont capables d'extraire dans le plant entier entre 4,1 ± 0,9 et 8,3 ± 2,7 % de la dieldrine extractible au n-heptane du sol (en pot), soit entre 147,0 ± 33,6 et 275,0 ± 86,4 µg de dieldrine par plant, avec des différences entre les variétés de *C. pepo* principalement liées à leur productivité en fruits et les teneurs en dieldrine associées. En revanche, les autres espèces de non-Cucurbitacées extraient en moyenne entre 2 et 200 fois moins de dieldrine que *C. pepo*, soit entre 0,04 ± 0,01 et 2,1 ± 0,4 %, correspondant à des masses comprises entre 1 et 73 µg de dieldrine par plant pour le gombo et le chrysanthème, respectivement, cette masse étant stockée dans leurs racines.

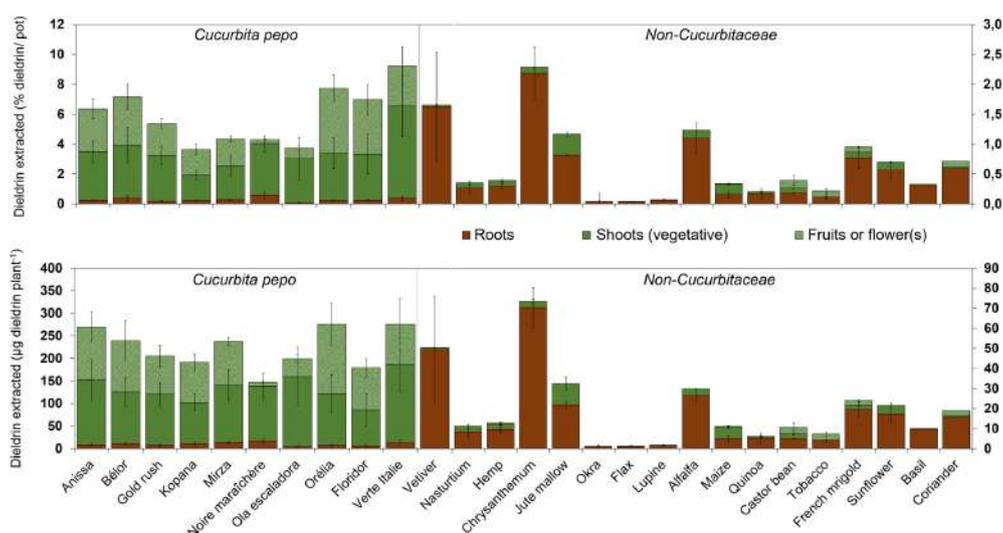


Figure 1 : Pourcentage de dieldrine extraite du sol par pot (en haut) et quantité de dieldrine extraite du sol par plant (en bas) pour les différentes espèces végétales et variétés de courgette. L'échelle de gauche est à utiliser pour toutes les variétés de *C. pepo* et le vétiver tandis que celle à droite est associée à toutes les autres espèces végétales.

Par ailleurs, il existe une variabilité inter et intraspécifique d'accumulation de la dieldrine dans les fruits pour les espèces et variétés de Cucurbitacées testées. En effet, les concentrations en dieldrine dans les fruits des Cucurbitacées (Figure 2) varient significativement, avec des teneurs allant de  $4,2 \pm 7,0 \mu\text{g kg}^{-1}$  MF pour les pastèques à  $85,0 \pm 19,4 \mu\text{g kg}^{-1}$  MF pour les concombres. Ces concentrations en dieldrine suivent l'ordre décroissant suivant : *C. sativus* > *C. maxima* = *M. scabra* > *C. pepo* = *C. moschata* > *M. charantia* = *C. lanatus*. Pour *C. pepo*, ces résultats diffèrent d'autres études montrant une contamination plus importante pour les fruits de courgette que pour les concombres (Donnarumma *et al.*, 2009 ; Khandekar *et al.*, 1982 ; Saito *et al.*, 2012). Ceci peut être expliqué par des variétés, des pratiques culturales et/ou des prospections racinaires dans des sols aux profils de contamination hétérogènes et différents.

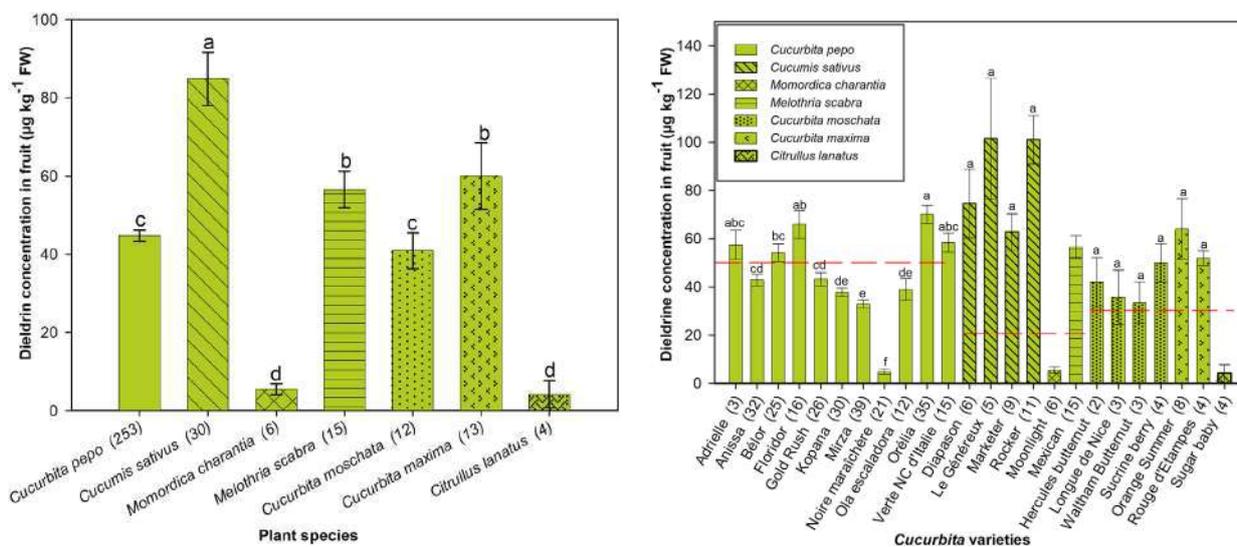


Figure 2 : Concentration moyenne (et erreur standard) en dieldrine dans les fruits des espèces (à gauche) et variétés (à droite) de Cucurbitacées. Pour chaque espèce/variété, le nombre de fruits analysés est indiqué entre parenthèse et les différentes lettres indiquent une différence significative (Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ ). Les lignes en pointillés rouges de la figure de droite indiquent les LMR pour les différentes espèces : 50, 20 et  $30 \mu\text{g kg}^{-1}$  MF pour *C. pepo* et les Cucurbitacées avec et sans peau comestible, respectivement.

Les concentrations en dieldrine des fruits pour chaque variété de Cucurbitacée sont présentées sur la Figure 2. Elles varient significativement pour les 11 variétés de *C. pepo*, avec des teneurs comprises entre  $4,9 \pm 1,1$  et  $70,3 \pm 3,6 \mu\text{g kg}^{-1}$  MF pour les variétés Noire Maraichère et Orelia, respectivement. Ce n'est pas le cas pour les 4 variétés de concombres (*C. sativus*), les 2 variétés de potirons (*C. maxima*) et les 4 variétés de courges (*C. moschata*). Compte tenu du faible nombre de variétés testées pour ces dernières espèces, il ne peut être exclu que des différences d'accumulation dans les fruits existent aussi pour d'autres cultivars. Par ailleurs, la concentration en dieldrine dans le sol, le temps d'exposition du plant et la biomasse du fruit ont une influence faible sur la contamination des fruits de *C. pepo*, avec des tendances variables selon les variétés.

Les analyses des sols après culture montrent que, dans presque l'intégralité des cas, la concentration en dieldrine dans le sol après une culture ne diffère pas de façon significative de la concentration initialement mesurée (Figure 3). Seul le sol collecté après culture de la courgette Mirza semble montrer une diminution de la concentration en dieldrine extractible d'environ 30 %. Ceci est en parti lié aux incertitudes induites par l'hétérogénéité des concentrations en dieldrine dans les sols de culture qui ne permettent pas d'observer de diminution après une seule rotation, ni d'autres mécanismes de dissipation qui semblent ici négligeables. Plusieurs rotations de culture seraient ainsi nécessaires pour diminuer de façon significative la concentration en dieldrine des sols.

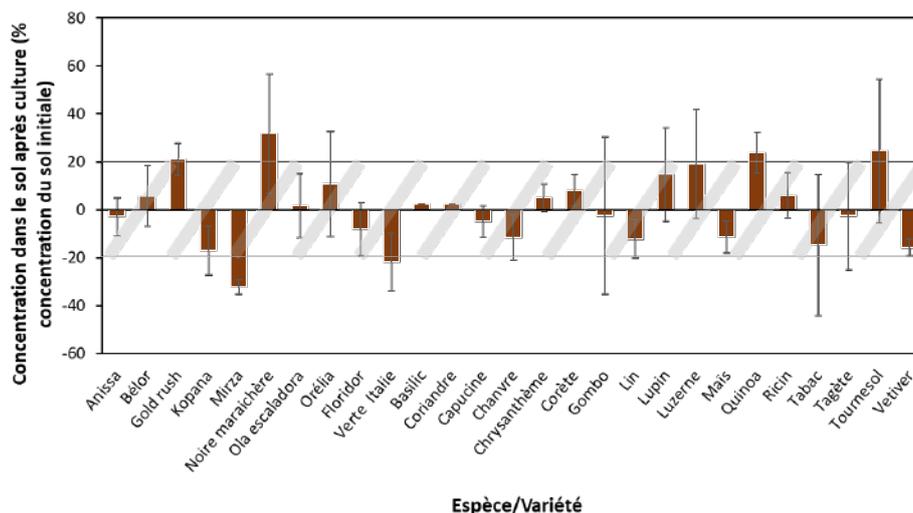


Figure 3 : Evolution de la concentration de dieldrine (en pourcentage) dans le sol rhizosphérique après culture par rapport à la concentration initiale. La partie rayée correspond à l'incertitude moyenne sur la concentration en dieldrine mesurée dans les pots (évaluée sur la mesure de 3 échantillons par pot pour 10 % des pots)

## Conclusions et perspectives

Parmi les non-Cucurbitacées, seul le vétiver est capable d'accumuler une masse importante de dieldrine, surtout dans ses racines. Des variations interspécifiques de concentration en dieldrine dans les fruits de Cucurbitacées, ainsi qu'une variabilité intraspécifique d'accumulation en dieldrine dans les fruits de *C. pepo* sont aussi mises en avant dans cette étude, avec certaines variétés de courgette présentant des teneurs en dieldrine dans les fruits très inférieures à la LMR. La concentration en dieldrine dans le sol, le temps d'exposition du plant et la biomasse du fruit ont une influence faible sur la contamination des fruits de *C. pepo*, avec des tendances variables selon les variétés. En effet, pour *C. pepo*, toutes les variétés montrent une capacité à extraire la dieldrine du sol et la transloquer vers les parties aériennes en quantités importantes, présentant ainsi le plus grand potentiel de phytoextraction parmi les espèces testées, avec des quantités de dieldrine extraites comprises entre 147 et 275 µg par plant cultivé en pot de 25 L, soit 4 à 8 % de la dieldrine extractible au n-heptane contenue dans le sol. L'aspect novateur de ces recherches est la possibilité de cultiver des variétés de courgette respectant la LMR de concentration en dieldrine dans les fruits, tout en exportant progressivement la dieldrine accumulée dans les tiges et les feuilles afin de diminuer progressivement la fraction biodisponible dans les sols. Ces parties végétales contenant de la dieldrine doivent être récoltées au cours et fin de culture et ne pas être retournées à la parcelle pour éviter d'alimenter le pool de matières organiques fraîches pouvant se minéraliser ou s'humifier. Les solutions pour éliminer la dieldrine de cette biomasse après séchage sont en perspectives. Cette approche scientifique du transfert sol-plante sur les parties accumulatrices des courgettes est transférable à l'échelle du territoire dans un contexte de sécurité alimentaire.

## Références

- Affholder M.-C., Cohen G., Gombert-Courvoisier S., Mench M., 2023. Inter and intraspecific variability of dieldrin accumulation in Cucurbita fruits: New perspectives for food safety and phytomanagement of contaminated soils. *Science of the Total Environment*, 859, 160152.
- Colin F., Cohen G., Delerue F., Chéry P., Atteia O., 2022. Status of Dieldrin in vegetable growing soils across a peri-urban agricultural area according to an adapted sampling strategy. *Environmental Pollution*, 295, 118666.
- Colin F., Cohen G., Affholder M.-C., Delerue F., Atteia, O., 2024. Response of vegetative and reproductive organs of *Cucurbita pepo* L. Subsp pepo 'Allegria' exposed to aged dieldrin contamination in regards to soil concentration and plant development. *Plant and Soil*, 499, 655-669.
- Donnarumma L., Pompei V., Faraci A., Conte E., 2009. Dieldrin uptake by vegetable crops grown in contaminated soils. *Journal of Environmental Science and Health*, 44 (5), 449-454.
- European Food Safety Authority (EFSA), 2007. Opinion of the Scientific Panel on plant protection products and their residues on a request from the Commission on the risks associated with an increase of the MRL for dieldrin on courgettes. *EFSA Journal*, 5(10), 554.
- Gavrilescu M., 2005. Fate of pesticides in the environment and its bioremediation. *Engineering in life sciences*, 5(6), 497-526.
- Hashimoto Y., 2005. Dieldrin residue in the soil and cucumber from agricultural field in Tokyo. *Journal of Pesticide Science*, 30 (4), 397-402.
- INRS, 2007. Fiche Toxicologique Dieldrine.
- Jennings A. A., Li Z., 2015. Residential surface soil guidance values applied worldwide to the original 2001 Stockholm Convention POP pesticides. *Journal of Environmental Management*, 160, 16-29.
- Khandekar S. S., Noronha A. B. C., Banerji S. A., 1982. Organochlorine pesticide residues in vegetables from Bombay markets: a three-year assessment. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, 4(2), 127-134.
- Matsumoto E., Kawanaka Y., Yun S.-J., Oyaizu H., 2009. Bioremediation of the organochlorine pesticides, dieldrin and endrin, and their occurrence in the environment. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 84, 205-216.
- Namiki S., Otani T., Motoki Y., Seike N., Iwafune T., 2018. Differential uptake and translocation of organic chemicals by several plant species from soil. *Journal of Pesticide Science*, 43(2), 96-107.
- Otani T., Seike N., Sakata Y., 2007. Differential uptake of dieldrin and endrin from soil by several plant families and Cucurbita genera. *Soil Science and Plant Nutrition*, 53(1), 86-94.
- Saito T., Otani T., Seike N., Okazaki M., 2012. A comparison of dieldrin residues in various vegetable crops cultivated in a contaminated field. *Soil science and plant nutrition*, 58(3), 373-383.
- Singh T., Singh D. K., 2017. Phytoremediation of organochlorine pesticides: Concept, method, and recent developments. *International Journal of Phytoremediation*, 19(9), 834-843.

## Remerciements

Le projet PhytoPOC (Phytomanagement et remédiation de sols agricoles contaminés par les pesticides organochlorés) a été financé par l'ADEME, Bordeaux-Métropole et le Conseil Départemental de Gironde. Les auteurs souhaitent remercier les agriculteurs qui ont accepté de participer à cette étude et fourni le site expérimental ainsi que des conseils pour les cultures. M. Mench est membre du réseau INRAE Ecotox (<https://eng-ecotox.hub.inrae.fr/>)

# Agromine des métaux sur une friche polycontaminées

## Retour d'expérience du projet SOLAMET

**Catherine SIRGUEY<sup>1</sup>, Emile BENIZRI<sup>1</sup>, Guillaume ECHEVARRIA<sup>1,2</sup>, Claire HAZOTTE<sup>2</sup>, Julien JACQUET<sup>1,2</sup>, Baptiste LAUBIE<sup>2,3</sup>, Gaylord MACHINET<sup>4</sup>, Gabrielle MICHAUDEL<sup>2</sup>, Jean-Louis MOREL<sup>1,2</sup>, Ramez SAAD<sup>2</sup>, Mathieu SCHWEITZER<sup>5</sup>, Marie-Odile SIMONNOT<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> : Université de Lorraine, INRAE, LSE, 54000, Nancy, France

<sup>2</sup> : Econick, 1 Rue Grandville, 54000, Nancy, France

<sup>3</sup> : Université de Lorraine, CNRS, LRGP, 54000, Nancy, France

<sup>4</sup> : Microhumus, 3 allée de Chantilly, 54500, Vandoeuvre-les-Nancy, France

<sup>5</sup> : Daum, 22 rue de la Trémoille, 75008, Paris, France

## Résumé

L'agromine des métaux issus de sites polycontaminés est une voie prometteuse pour valoriser économiquement les friches industrielles délaissées tout en dépolluant les sols. Le projet SOLAMET a pour objectif de mettre en œuvre un démonstrateur d'agromine sur une friche industrielle contaminée en plomb (Pb), cadmium (Cd) et zinc (Zn) par des activités verrières. Différents parcelles ont été mis en place en privilégiant des associations culturales de plantes hyperaccumulatrices (*Sedum plumbizincicola*, *Noccaea caerulescens*) et non accumulatrices (*Anthyllis vulneraria*). La faible fertilité physique et chimique du site a nécessité une refunctionalisation de l'horizon de surface. L'optimisation agronomique de la phytoextraction a permis d'obtenir des rendements en biomasse corrects mais avec des rendements d'extraction du Zn et du Cd qui sont restés faibles avec toutefois une baisse significative de la teneur totale en Cd de l'horizon de surface. Le mode de gestion a permis de maintenir un niveau élevé de biodiversité sur le site. *S. plumbizincicola* n'a pas accumulé de Cd (< 4 mg/kg) tandis que *N. caerulescens* a été capable de l'hyperaccumuler (> 100 mg/kg), offrant des perspectives intéressantes pour la phyto-séparation du Zn et du Cd à partir de matrices co-contaminées, contribuant ainsi au développement de l'agromine du Zn. Toutefois le développement à long terme de l'agromine en milieu polycontaminé et à fortes contraintes apparaît limité.

## Introduction

Les SUTMAs (sols de zones urbaines, industrielles, de trafic, minières et militaires) diffèrent considérablement des sols naturels en ce qui concerne leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques, leurs fonctions et leurs services. Ils sont généralement caractérisés par des propriétés physico-chimiques limitées comme une forte teneur en éléments grossiers, une faible capacité de rétention en eau ou une moindre fertilité associée à de plus ou moins fortes teneurs en polluants métalliques et/ou organiques <sup>1-3</sup>. Toutefois, des points de vue récents soulignent également leur capacité à fournir des fonctions et des services importants comme le support de la végétation, la purification de l'eau, le rôle de réserve de biodiversité ou encore le stockage de carbone <sup>4</sup>.

La phytoremédiation rassemble diverses techniques de dépollution s'appuyant sur des solutions basées sur la nature pour limiter la migration des éléments en trace (ET) métalliques et métalloïdes au sein d'un écosystème, parmi lesquelles, la phytoextraction. Dans une filière intégrée, l'agromine consiste en la mise en œuvre de

cultures de phytoextraction d'éléments d'intérêt industriel contenus dans une gamme large de ressources secondaires (sols, effluents, sédiments, sous-produits industriels) et leur récupération par les voies de la métallurgie <sup>5</sup>. Cette récupération est assurée par des procédés écoresponsables qui permettent la fabrication de composés de haute pureté <sup>6</sup>. Les plantes utilisées doivent répondre à deux principaux critères : produire une biomasse suffisante et accumuler des concentrations élevées en ET <sup>7</sup>. Afin d'améliorer les rendements, diverses approches sont actuellement à l'étude parmi lesquelles la co-culture de par son rôle dans la protection contre les ravageurs, l'augmentation de la biomasse, et la réduction significative de la contamination métallique du sol <sup>8,9</sup>. En outre la co-culture s'inscrit dans les pratiques agroécologiques, et a déjà montré des effets positifs sur le maintien de la biodiversité globale <sup>10</sup> tout en permettant une amélioration des rendements des cultures <sup>11,12</sup>.

Le projet SOLAMET cible des éléments de plus faible intérêt économique mais préoccupants en raison de leur impact environnemental, comme le Zn, le Pb et le Cd. Les objectifs du projet se déclinent en quatre items distincts : (1) élaborer un démonstrateur d'agromine de métaux à partir de sols polycontaminés ; (2) concilier l'économie circulaire avec la préservation de la biodiversité des friches industrielles ; (3) apporter de nouvelles connaissances scientifiques sur les friches industrielles et le comportement de plantes

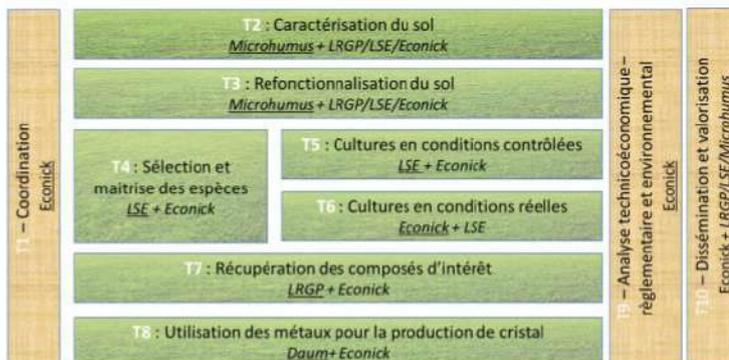


Figure 1 : Logigramme du projet SOLAMET

hyperaccumulatrices de Pb, de Zn et de Cd associées en co-culture ; (4) développer des outils pour la phytoremédiation des sols co-contaminés en ET en respectant une démarche agro-écologique. Pour répondre à ces objectifs, le projet a été mené suivant le logigramme présenté en Figure 1.

## Matériels et méthodes

Le site étudié a été utilisé comme décharge pour les déchets de l'industrie du verre (fragments de verre, matériaux réfractaires et résidus de combustion du coke) sur une épaisseur de 10 m. Jusqu'à sa fermeture en 1990, il a reçu du  $Pb_3O_4$ , des déchets acides, des boues de neutralisation riches en Pb et des cristaux. Au cours des trente dernières années, le site a vu se développer un écosystème bien végétalisé. Aujourd'hui, cette petite colline artificielle est recouverte d'une couverture herbacée de 1200 m<sup>2</sup> à son sommet (environ 60 m de long et 20 m de large), entourée de pentes boisées.

### Diagnostic agro-environnemental du site

Le site a été découpé suivant une grille de 35 quadras de 25 m<sup>2</sup> au sein desquelles un composite de l'horizon de surface du sol (0-10 cm) a été prélevé pour les analyses agronomiques (pH eau, conductivité électrique, capacité d'échange cationique et cations échangeables et phosphore assimilable) ainsi que des teneurs pseudo-totales (extractibles à l'eau régale) et potentiellement disponibles (extractibles au DTPA) suivant des méthodes normalisées. Des analyses par diffraction X et par spectrométrie infra-rouge en réflexion diffuse ont été réalisées sur les fractions fines pour identifier les phases porteuses de métaux. Concernant le diagnostic écologique, plusieurs inventaires ont été réalisés en juillet 2019 sur la strate herbacée, située au sommet de la colline. L'identification des taxons végétaux a été réalisée jusqu'au niveau de l'espèce. Un inventaire des communautés d'orthoptères et de lépidoptères diurnes a été réalisé pendant deux jours en juillet et août 2019. Afin d'évaluer l'impact des trois années successives d'agromine sur le site, un second diagnostic agro-environnemental a été réalisé en fin de projet dans des conditions similaires.

## Conception des parcelles d'agromine

Un apport unique d'une couche de surface de 7 cm d'un amendement organique de production locale a été réalisé en octobre 2020 sur une surface de 350 m<sup>2</sup>, soit environ 35 t/ha. Les essais de co-culture ont été mis en place huit mois après. Un système d'arrosage par aspersion a été installé sur la zone cultivée. Un premier démonstrateur d'agromine s'est étendu sur 225 m<sup>2</sup> (Figure 2). Une première association a été établie entre deux plantes hyperaccumulatrices de Cd et de Zn : *N. caerulescens* population Ganges 13 et *S. plumbizincicola* 14. Une légumineuse, *A. vulneraria*, a été intégrée à cette co-culture d'hyperaccumulateurs afin de recréer un microclimat plus frais et humide face aux sécheresses estivales dont peut souffrir *N. caerulescens* et de participer à l'enrichissement du sol en azote, au bénéfice des plantes hyperaccumulatrices installées en co-culture avec elle. Le sol a été recouvert par une toile de paillage biodégradable afin de limiter le développement d'adventices et d'assurer une meilleure gestion du parcellaire. Deux densités de *N. caerulescens* ont été testées avec respectivement un et deux rangs de 10 plants par mètre linéaire avec un espacement de 10 cm de largeur. La culture a été menée sur deux années successives. Un deuxième parcellaire de 45 m<sup>2</sup> (3 parcelles de 15 m<sup>2</sup>) a été conçu dans le but d'étudier l'effet de la densité de l'association de *N. caerulescens* (N) et *S. plumbizincicola* (S) sur le rendement de phytoextraction avec trois densités testées : (D1) 11 plants N/m<sup>2</sup> et 13 plants S/m<sup>2</sup>, (D2) 21 plants N/m<sup>2</sup> et 11 plants S/m<sup>2</sup>, et (D3) 32 plants N/m<sup>2</sup> et 8 plants S/m<sup>2</sup>. Ce parcellaire a été répliqué sur un sol agricole (noté sol B) à pH neutre ( $7,1 \pm 0,2$ ) et présentant une teneur plus faible en Zn pseudo-total ( $87 \pm 17$  mg/kg) et extractible au DTPA ( $15 \pm 4$  mg/kg). La deuxième année, une nouvelle association a été testée : *N. caerulescens* avec *Pelargonium capitatum* var. Attar of Roses pour son aptitude à accumuler le Pb 15,16.



Figure 2 : Illustration du parcellaire d'agromine en septembre 2021

## Résultats et discussion

### Potential du crassier pour la phytoextraction du Pb, du Zn et du Cd en contexte d'agromine

Le sol du crassier est particulièrement complexe avec des phases porteuses des métaux difficiles à identifier. L'optimisation du système de culture a nécessité beaucoup de main d'œuvre et une irrigation rendue difficile par manque d'accès à une source d'eau. Par ailleurs, les fortes teneurs en éléments grossiers (70-80 %) ont rendu le travail du sol impossible, ne permettant pas une implantation directe des cultures de plantes hyperaccumulatrices, ce qui a conduit à l'apport en surface d'une couche de compost de 7 cm. Enfin, le développement dense de la végétation spontanée a nécessité le décapage d'une couche de terre sur 10 cm. Ces caractéristiques peuvent être des facteurs limitants pour le développement de l'agromine. Par ailleurs, l'ensemble de ces pratiques ont également eu des impacts négatifs tels qu'une surfertilisation azotée pouvant conduire à l'émission de gaz à effet de serre, une perte de biodiversité, une augmentation des teneurs totales en Cu et en Zn et une plus forte complexation de Pb et Zn dans le sol. Les rendements en biomasse obtenus étaient tout à fait corrects (entre 1,1 et 1,6 t ha<sup>-1</sup>) avec toutefois de faibles rendements d'extraction des métaux (5 à 50 g Cd ha<sup>-1</sup> et 2,1 kg Zn ha<sup>-1</sup> extraits au maximum). Les résultats des essais effectués avec *P. capitatum* cultivar Attar of Roses en conditions réelles sur le crassier ne révèlent aucune capacité de phytoextraction du Pb (4,2 mg kg<sup>-1</sup> dans les parties aériennes), et cela en dépit d'une biodisponibilité potentielle élevée. Ces résultats contrastent fortement avec les quelques données

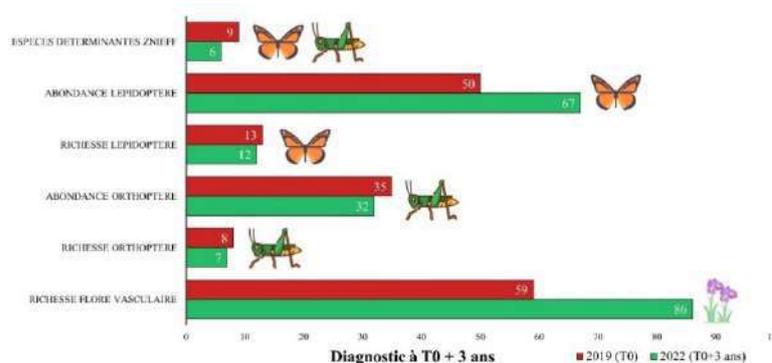


Figure 3 : Evolution de l'abondance et de la richesse spécifique de la flore vasculaire et de l'entomofaune de la strate herbacée après trois années de phytomanagement, à l'échelle du site.

de la littérature sur cette espèce qui indiquaient des teneurs pouvant dépasser 1000 mg kg<sup>-1</sup> sur des sites contaminés analogues. Les travaux dédiés à la récupération des métaux d'intérêt ont dû être réalisés sur des lots de biomasses en provenance d'autres sites faute de rendements en Zn suffisants sur le site d'étude. Il a toutefois pu être démontré que l'extraction du Zn à partir de plantes hyperaccumulatrices est techniquement réalisable avec un rendement supérieur à 60 % sur l'ensemble du procédé.

## Diagnostiques environnementaux

Le diagnostic environnemental initial<sup>17</sup> montre que l'horizon de surface présente une forte contamination par le Pb (1800-3100 mg kg<sup>-1</sup>) et le Cd (1,4-28,7 mg kg<sup>-1</sup>) avec une fraction potentiellement biodisponible élevée (800-1300 mg Pb kg<sup>-1</sup> et 0,4-3,4 mg Cd kg<sup>-1</sup>). Toutefois, les concentrations en ET échangeables étaient toutes inférieures aux limites de quantification analytique. En outre, le site était caractérisé par une fertilité moyenne du sol. La biodiversité sur le site s'est avérée substantiellement plus élevée que celle attendue, avec des assemblages d'orthoptères similaires à ceux des prairies et une diversité diurne de lépidoptères comparable à celle des parcs urbains. Nous avons également constaté une influence positive de la richesse végétale sur la structure de la communauté diurne de lépidoptères. D'après ces résultats, la contamination en ET ne semble pas être un facteur limitant primaire pour l'établissement de ces communautés.

Après trois années de phytomanagement, l'impact global sur la biodiversité du crassier, telle que mesurée, demeure relativement faible (Figure 3). Les principaux effets négatifs concernent la réduction du nombre d'espèces déterminantes pour les Zones Naturelles d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF), ainsi que la légère diminution des indices de biodiversité des lépidoptères diurnes et des orthoptères. Les pratiques adoptées ont engendré une amélioration significative de la richesse spécifique de la flore vasculaire et de l'abondance des lépidoptères diurnes. Entre 2019 et 2022, les autres bio-indicateurs restent stables. Les concentrations en Cd pseudo-totales et potentiellement disponibles mesurées en 2022 sur le grand parcellaire sont en moyenne cinq fois inférieures à celles de 2019. Le décapage du sol avant culture et l'apport d'une couche épaisse de compost explique en partie cette baisse qui reste majoritairement due à l'efficacité de la phytoextraction du Cd par *N. caerulescens*. En revanche, les apports massifs de compost ont augmenté les quantités de Cu et de Zn tant pseudo-totales que potentiellement biodisponibles.

## Potentiel de la co-culture entre *N. caerulescens* et *S. plumbizincicola*

Des réponses contrastées des systèmes de co-culture ont été observées entre les deux sols (Figure 4). Dans le sol du crassier (A), la phytoextraction du Zn a été plus efficace à la densité D1 (+33 %), principalement grâce à une augmentation significative de la biomasse de *S. plumbizincicola*, alors que les concentrations de Zn dans les parties aériennes ne différaient que très légèrement entre les espèces

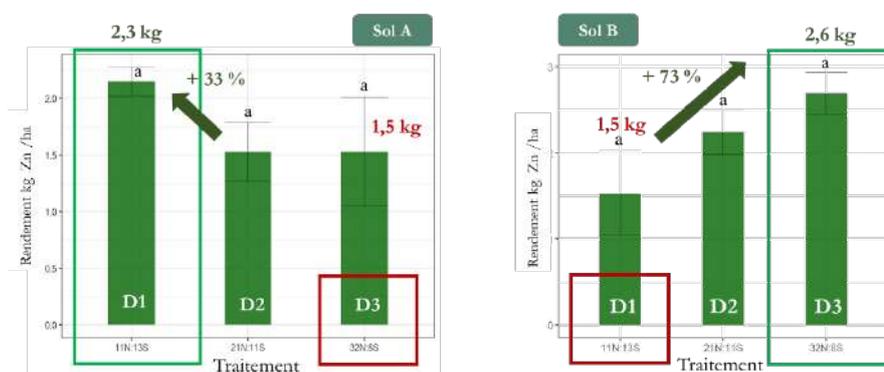


Figure 4 : Rendements de phytoextraction du Zn (kg/ha) à différentes densités de co-culture (D1, D2, D3) entre *N. caerulescens* (N) et *S. plumbizincicola* (S). Sol A : sol de crassier, sol B : sol agricole

et les densités testées. Avec des ressources en Zn plus limitantes dans le sol agricole (B), la phytoextraction du Zn était considérablement plus élevée à D3 qu'à D1 (+73 %), principalement en raison d'une augmentation significative de la biomasse de *N. caerulescens* avec la densité. Cet effet s'est également accompagné d'une diminution significative (-50 %) de l'accumulation de Zn par *S. plumbizincicola* par rapport à *N. caerulescens*, qui a maintenu le même niveau de performance entre les deux sols. Les systèmes de co-culture ont produit jusqu'à 1,6 t/ha et 2,4 t/ha sur les sols A et B, respectivement. De manière inattendue, *S. plumbizincicola* n'a pas accumulé de Cd (< 4 mg/kg) dans ces deux contextes édaphiques, contrairement à *N. caerulescens* qui a été capable de l'(hyper)accumuler *in situ* (> 100 mg/kg).

# Conclusions et perspectives

Une approche multidimensionnelle est nécessaire pour concevoir et réaliser un projet d'agromine. Une analyse approfondie du site est impérative afin de définir ses limites et ses contraintes spécifiques et concilier son potentiel agro-environnemental (nature des sols et biodiversité des écosystèmes) avec les objectifs de phytoremédiation (et de la phytoextraction spécifiquement). Dans le cadre des SUITMAs, un compromis est nécessaire dans l'optimisation des fertilités physiques et chimiques des sols polycontaminés. La prise en compte de la fertilité physique du sol couplée à la surface du chantier permet de déterminer les techniques à employer que ce soit *via* la mécanisation ou le travail manuel. La biodiversité initialement présente sur le site est également un élément crucial à considérer. En sols pauvres, des systèmes de co-cultures intégrant des hyperaccumulateurs et des légumineuses sont à privilégier pour abattre les concentrations en ET, diminuer la toxicité du sol et favoriser la réimplantation de la végétation spontanée, de la faune et de la microflore du sol. Sur les sites présentant une biodiversité initiale élevée, il convient de minimiser l'impact des interventions pour atteindre au minimum une perte nulle de biodiversité, voire une amélioration. Enfin, il est nécessaire d'adapter les choix des espèces végétales (plantes pérennes, rustiques, indigènes...), le système de recouvrement du sol, et l'irrigation en fonction du climat, en anticipant les fortes chaleurs ou les températures négatives (mise en place d'un voile d'hivernage).

Malgré tous les moyens mis en œuvre pour l'optimisation agronomique de la phytoextraction sur le crassier, les rendements d'extraction du Zn et du Cd sont restés faibles. Le potentiel de phytoextraction du Pb, du Zn et du Cd apparaît comme limité sur des SUITMAs analogues au crassier industriel étudié dans le cadre du projet SOLAMET. D'autres voies de valorisation seraient à privilégier comme la libre évolution en atténuation naturelle, qui permet de limiter l'impact des pratiques anthropiques sur la biodiversité<sup>17</sup>, la phytostabilisation pour limiter l'envol de poussières riches en ET, l'implantation d'espèces ligneuses en agroforesterie, ou l'installation de panneaux photovoltaïques. Finalement le potentiel de phytoextraction ou d'agromine du Pb, du Zn et du Cd semble plus élevé sur d'autres anthroposols contaminés tels que des jardins ou des sols agricoles, ou même sur d'autres friches urbaines ou industrielles présentant moins de freins au niveau de leur fertilité physico-chimique et moins de contraintes pratiques (irrigation, taux de recolonisation par la végétation spontanée élevée, déplacements).

## Références

1. Hostyn, G., Schwartz, C., Côme, J.-M. & Ouvrard, S. Assessment for combined phytoremediation and biomass production on a moderately contaminated soil. *Environ Sci Pollut Res* **29**, 59736–59750 (2022).
2. Joimel, S. *et al.* Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality. *Sci Total Environ* **584–585**, 614–621 (2017).
3. Vincent, Q., Auclerc, A., Beguiristain, T. & Leyval, C. Assessment of derelict soil quality: Abiotic, biotic and functional approaches. *Sci Total Environ* **613–614**, 990–1002 (2018).
4. Morel, J. L., Chenu, C. & Lorenz, K. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *J Soils Sediments* **15**, 1659–1666 (2015).
5. *Agromining: Farming for Metals. Extracting Unconventional Resources Using Plants. Second Edition.* (Springer Berlin Heidelberg, Cham, 2021).
6. Simonnot, M. O., Vaughan, J. & Laubie, B. Processing of bio-ore to products. in *Agromining: Farming for Metals* (eds. Van der Ent, A., Echevarria, G., Baker, A. & Morel, J. L.) 39–52 (Cham, 2018).
7. Kidd, P. *et al.* Agronomic Practices for Improving Gentle Remediation of Trace Element-Contaminated Soils. *Int J Phytorem* **17**, 1005–1037 (2015).
8. Whiting, S. N., Leake, J. R., McGrath, S. P. & Baker, A. J. M. Hyperaccumulation of Zn by *Thlaspi caerulescens* Can Ameliorate Zn Toxicity in the Rhizosphere of Cocropped *Thlaspi arvense*. *Environ Sci Technol* **35**, 3237–3241 (2001).
9. Fuksova, Z., Szakova, J. & Tlustos, P. Effects of co-cropping on bioaccumulation of trace elements in *Thlaspi caerulescens* and *Salix dasyclados*. *Plant Soil Environ* **55**, 461–467 (2009).
10. Dainese, M. *et al.* A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Sci Adv* **5**:eaax0121, 1–13 (2019).
11. Saad, R. F. *et al.* Crop rotation associating a legume and the nickel hyperaccumulator *Alyssum murale* improves the structure and biofunctioning of an ultramafic soil. *Ecol Res* (2018) doi:10.1007/s11284-017-1526-4.

- 12.Saad, R. F., Echevarria, G., Rodríguez-Garrido, B., Kidd, P. & Benizri, E. A two-year field study of nickel-agromining using *Odontarrhena chalcidica* co-cropped with a legume on an ultramafic soil: temporal variation in plant biomass, nickel yields and taxonomic and bacterial functional diversity. *Plant Soil* **461**, 471–488 (2021).
- 13.Gonneau, C., Genevois, N., Frérot, H., Sirguy, C. & Sterckeman, T. Variation of trace metal accumulation, major nutrient uptake and growth parameters and their correlations in 22 populations of *Noccaea caerulea*. *Plant Soil* **384**, 271–287 (2014).
- 14.Zhou, T. *et al.* Repeated phytoextraction of metal contaminated calcareous soil by hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*. *Int J Phytorem* **20**, 1243–1249 (2018).
- 15.Arshad, M. *et al.* A field study of lead phytoextraction by various scented *Pelargonium* cultivars. *Chemosphere* **71**, 2187–2192 (2008).
- 16.Arshad, M. *et al.* Phytoavailability of lead altered by two *Pelargonium* cultivars grown on contrasting lead-spiked soils. *J Soils Sediments* **16**, 581–591 (2016).
- 17.Jacquet, J., Benizri, E., Echevarria, G. & Sirguy, C. New insights on glass industry wasteland ecosystems. *Environ Pollut* **315**, 120431 (2022).

## Remerciements

Ces travaux ont été soutenus par la convention ADEME N°1972C0020 et la convention ANRT Cifre N°2019/1926. Ils sont inclus dans le programme scientifique du Consortium de recherche GISFI dédié à la connaissance et au développement des technologies de requalification des territoires dégradés (<http://www.gisfi.univ-lorraine.fr>).

# Agromine et systèmes photovoltaïques sur friche industrielle

## Quel dispositif optimal pour le couplage plantes hyperaccumulatrices et systèmes photovoltaïques ?

Julien ANCOUSTURE<sup>1,2</sup>, Pierre LEGLIZE<sup>1</sup>, Ya Brigitte ASSOA<sup>2\*</sup>, Emile BENIZRI<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> : Université de Lorraine, INRAE, Laboratoire Sols et Environnement, 54000 Nancy, France

<sup>2</sup> : Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, Campus Ines, 73375 Le Bourget du Lac

\* contact : [ya-brigitte.assoa@cea.fr](mailto:ya-brigitte.assoa@cea.fr), [emile.benizri@univ-lorraine.fr](mailto:emile.benizri@univ-lorraine.fr)

### Résumé

Les sols de friches industrielles peuvent présenter une contamination en Eléments Traces Métalliques qui limite les services écosystémiques rendus par ces surfaces. Ces zones peuvent être réhabilitées par la mise en place de l'agromine. Cependant, ce processus est trop lent pour être rentable sur le court terme. L'installation de modules photovoltaïques (PV) pourrait améliorer la rentabilité durant la période de bioremédiation. Ainsi, le projet Voltagromine a pour objectif de déterminer le compromis optimal entre la production d'électricité et le développement de plantes hyperaccumulatrices. Pour cela, un premier dispositif expérimental a été mis en place sur un site pilote afin d'évaluer les interactions entre ces deux formes de production pendant environ quatre mois. Ce site pilote comprenait des modules PV monocristallins opaques et bifaciaux semi-transparents sous lesquels des bacs de culture d'une plante hyperaccumulatrice, *Noccaea caerulea* (*Nc*), étaient disposés en plus de bacs de référence exposés au soleil. Divers paramètres ont été mesurés, tels que la surface de recouvrement, la biomasse végétale sèche de *Nc* et les températures des modules PV. Concernant les couverts de *Nc*, les plantes à l'ombre d'un module PV étaient jusqu'à 5,5 fois plus développées que celles sans ombrage. De plus, les couverts de *Nc* semblaient augmenter le ratio de performance des modules PV de 18%. Des analyses agronomiques et microbiologiques sont en cours afin d'étudier l'impact du couplage sur la qualité des sols.

### Introduction

Dans un contexte de dérèglement climatique mondial, l'Union Européenne s'est engagée à atteindre une neutralité carbone d'ici 2050 [1]. Pour cela, l'utilisation d'énergies fossiles doit être réduite au profit des énergies renouvelables. Pour réaliser cette transition énergétique, le développement du photovoltaïque (PV) est prometteur. En France, le PV représente une faible part du mix énergétique annuel estimée à environ 3 %, avec une capacité de production d'environ 15 GW [2, 3]. En conséquence, le ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires avait fixé un objectif de capacité de production totale de 100 GW pour 2050 [4]. Cependant, la production optimale d'énergie électrique par des systèmes PV nécessite la plupart du temps une grande surface. Plusieurs opportunités pour intégrer le PV existent (*e.g.*, les bâtiments, les véhicules), mais seules les installations au sol seraient en mesure de répondre pleinement à cet objectif. Néanmoins, la surface de sol disponible par pays est limitée. Ces dernières années, l'agrivoltaïsme, qui vise à définir un couplage et un compromis entre l'agriculture et la production d'énergie PV, s'est développé et représente une opportunité pour augmenter la capacité de production d'électricité PV [5]. Ce procédé permet d'optimiser l'espace situé sous les modules PV, souvent inutilisé. Cependant, la mise en place de systèmes PV peut potentiellement artificialiser les sols et influencer le rendement des activités agricoles [6, 7]. De plus, le

gouvernement français a fixé un objectif de « Zéro Artificialisation Nette » des espaces Naturels, Agricoles et Forestiers dans le cadre du Plan Biodiversité [8].

Ainsi, une autre opportunité pour développer le PV est de réaliser la production d'énergie sur des sols délaissés, tels que les friches industrielles. En France, la surface de ces sites est de plus de 150 000 ha [9]. Ces zones représentent un potentiel élevé de surfaces disponibles et valorisables. Cependant, les friches industrielles sont des surfaces marquées par d'anciennes activités anthropiques, souvent contaminées par des Eléments en Traces Métalliques (ETMs) et fournissant potentiellement peu de services écosystémiques (*e.g.*, contrôle de l'érosion, stockage du carbone) [10, 11, 12]. Ainsi, ces sites peuvent être réhabilités à l'aide de techniques physico-chimiques ou par l'excavation des sols contaminés [13]. Cependant, ces méthodes sont coûteuses et peu respectueuses de l'environnement, contrairement à la filière de l'agromine, qui couple la phytoextraction des ETMs par des plantes hyperaccumulatrices à un procédé métallurgique spécifique adapté aux bio-minerais récoltés [14, 15].

L'agromine répond aux défis de la gestion de la pollution des friches industrielles, mais ce processus est lent et peu rentable à court terme. Dans le cas de l'agromine d'une friche industrielle, une approche dite écovoltaïque, consistant à valoriser des surfaces actuellement inutilisées sous les modules PV de centrales solaires, pourrait être mise en œuvre [16]. Ainsi, le système PV végétalisé global couplant la production d'électricité PV et l'agromine, appelé Voltagromine, permettrait la génération de revenus grâce à la production d'électricité PV pendant la mise en œuvre du procédé d'agromine.

A long terme, Voltagromine permettrait également de générer des revenus grâce à la valorisation de métaux stratégiques biosourcés, tout en réhabilitant les friches industrielles grâce à l'amélioration du bouquet de services écosystémiques rendus par ces surfaces. L'approche globale de Voltagromine est originale et inexplorée. Cependant, le meilleur compromis entre la production d'électricité PV, le développement de plantes hyperaccumulatrices et la phytoremédiation des sols doit être déterminé. Dans ce cadre, un dispositif expérimental pilote a été mis en place depuis 2023, pour étudier le développement d'une plante hyperaccumulatrice, *Noccaea caerulea* (*Nc*), sous des modules PV. Sur ce site, l'impact *in situ* des modules PV sur le développement de *Nc* et l'impact du couvert végétal de *Nc* sur la production d'énergie PV est en cours d'évaluation. En parallèle, un modèle numérique thermique et électrique, est en cours de développement. Il permettra de prédire le rendement électrique des modules PV et l'influence du couvert végétal sur la production d'énergie PV. En effet, la présence du couvert végétal pourrait réduire la température du module PV, qui est un paramètre clef de sa performance électrique.

Ce travail présente les résultats majeurs obtenus sur le site pilote concernant l'effet de modules PV sur le développement de plantes hyperaccumulatrices et l'effet du couvert végétal de *Nc* sur la performance des modules PV.

## Matériel et méthodes

Le dispositif expérimental pilote a été mis en place sur le site du CEA à Le Bourget du Lac (Savoie, France), pour une durée de 4 mois (du 13 juillet 2023 au 7 novembre 2023) afin d'évaluer l'effet des modules PV sur la croissance du couvert végétal de *Nc* et réciproquement l'effet du couvert végétal sur leurs performances électriques. Ce site pilote comprenait des modules PV opaques en silicium monocristallin (Solarworld et Panasonic), ainsi que des modules PV semi-transparents bifaciaux en silicium monocristallin (Jolywood), orientés vers le sud et inclinés à 30°. Sur ce site pilote, 21 bacs de culture de 1 m<sup>2</sup> contenant chacun de la terre végétale et 49 plants de *Nc* ont été placés. Sous chaque type des modules PV, 6 bacs de culture ont été installés, respectivement dénommés OP1 et OP2 pour les modules PV opaques Solarworld et Panasonic, et ST pour les modules PV semi-transparents Jolywood. Trois bacs de culture sur les 6 étaient constamment à l'ombre des modules PV (OP1.Sh, OP2.Sh et ST.Sh), tandis que les 3 autres étaient exposés à la fois au soleil et à l'ombre des modules PV au cours de la journée (OP1.Su, OP2.Su et ST.Su). En outre, 3 bacs de culture, sans aucune influence de l'ombre des modules PV, ont été positionnés sur le site et étaient nommés bacs C.

A partir de l'instrumentation installée sur le site, diverses mesures thermiques, aérauliques, électriques et météorologiques ont été réalisées. Les températures des modules PV ont été obtenues à l'aide de thermocouples de type T (JUMO) fixés sous une cellule PV au centre de la face arrière de chaque module PV. Ces mesures ont permis le calcul du ratio de performance ( $P_r$ ) des modules PV sans couvert végétal sous-jacents ( $P_r.C$ ) et avec des couverts végétaux sous-jacents ( $P_r.OP$ ) selon l'équation de Kahlid *et al.* [17].

Au niveau du sol des bacs de culture, diverses mesures ont été réalisées incluant la mesure des éléments majeurs et mineurs totaux, la mesure du carbone (C) et de l'azote (N) total, ainsi que du C organique, la mesure des éléments majeurs et mineurs biodisponibles, la mesure du pH, la mesure de la biomasse microbienne (carbonée et azotée), la mesure d'activités enzymatiques microbiennes (arylsulfatase,  $\beta$ -glucosidase, uréase et phosphatase alcaline), ainsi qu'une caractérisation de la diversité bactérienne des sols.

Au niveau des couverts végétaux de *Nc*, diverses mesures ont été réalisées incluant la biomasse sèche, la surface de recouvrement des bacs, les éléments majeurs et mineurs totaux, la mesure du C et de l'N, des pigments photosynthétiques (chlorophylles, anthocyanes et flavonoïdes). Concernant la biomasse sèche de *Nc*, elle a été mesurée après récolte (72 h à 40°C) et les surfaces de recouvrement de *Nc* ont été mesurées à l'aide de photographies prises dans le spectre des longueurs d'onde visibles et de la macro PHENOPSIS (LEPSE-INRAE, France) du logiciel ImageJ.

A partir de la mesure des éléments mineurs totaux de *Nc* et du sol, les facteurs de bioconcentration (BCF) de *Nc* ont été déterminés, pour le cadmium (Cd), le nickel (Ni) et le Zinc (Zn) (*i.e.*, les métaux potentiellement hyperaccumulés par *Nc*), avec le rapport entre la concentration en ETMs dans les parties aériennes de *Nc* à la récolte et la concentration en ETMs totaux du sol en début d'expérimentation [18]. Un BCF supérieur à 1 indique l'aptitude de la plante à stocker les ETM à des concentrations élevées dans ses parties aériennes à partir de teneurs initiales totales dans les sols plus faibles.

Pour chaque condition de culture OP1.Su, OP1.Sh, ST.Sh et C, un capteur mesurant le flux de photons photosynthétiques (Photosynthetic Photon Flux (PPF)) dans le spectre du rayonnement photosynthétiquement actif (Photosynthetically Active Radiation (PAR)) des couverts végétaux a été installé (Quantum PAR SQ321, Apogee). Ce capteur permet d'évaluer la quantité de photons reçus par le couvert selon les conditions d'ombrage dues aux PV. A partir du PPF mesuré, l'efficacité de photoconversion de l'ensoleillement en biomasse sèche, nommée Radiation Use Efficiency (RUE), a été déterminée sur la durée de l'expérimentation selon l'équation suivante :

$$RUE (\%) = \left( \frac{\frac{\beta_x}{Z_x} - \frac{\beta_C}{Z_C}}{\left( \frac{\beta_C}{Z_C} \right)} \right) * 100$$

où *x* correspond aux bacs de culture (*e.g.*, OP1.Su, OP2.Sh), *C* correspond aux bacs de culture sans l'ombrage des modules PV,  $\beta$  correspond à la biomasse sèche de *Nc* (en g), *Z* correspond au pourcentage de transmission du PPF. Dans cette équation, un indice supérieur à 1 correspond à une RUE supérieure au bac de culture C.

Dans cette étude, l'analyse statistique des données obtenues a été réalisée dans l'environnement RStudio (R v.4.0.3) [19]. La normalité des données a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk et l'homoscédasticité des variances par le test de Bartlett. Une fois ces conditions remplies, une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée en utilisant le test post hoc de Tukey et les différences étaient considérées comme significatives pour une valeur de  $p \leq 0,05$ .

## Résultats et discussion

Les résultats majeurs, à savoir les surfaces de recouvrement et la RUE ainsi que le ratio de performance des modules PV selon leurs températures en face arrière, sont présentés dans la Figure 1 et 2. Les BCF de *Nc* sont représentés dans le Tableau 1. Concernant les surfaces de recouvrement de *Nc* après 116 jours de culture, la surface de recouvrement de C était significativement plus faible que celles de OP1.Su et OP2.Su (facteur de 2,8), et que celles de OP1.Sh, OP2.Sh et ST (facteur de 5,5) (Figure 1.A). En outre, les surfaces de recouvrement de OP1.Su (0,134 m<sup>2</sup>) et OP2.Su (0,135 m<sup>2</sup>), ainsi que celles de OP1.Sh (0,233 m<sup>2</sup>) et OP2.Sh (0,223 m<sup>2</sup>), avaient des valeurs proches. Concernant ST, les surfaces de recouvrement de ST.Su et ST.Sh étaient proches l'une de l'autre (respectivement, 0,234 et 0,222 m<sup>2</sup>). Ainsi, l'exposition à un ensoleillement direct implique un impact négatif sur le développement des plantes, tandis que les modules PV apparaissent avoir un effet favorable sur le développement des plantes, en réduisant l'exposition à l'ensoleillement direct.

Sur la durée de l'expérimentation, le pourcentage de transmission du PPF au niveau des couverts végétaux était de 100 % pour les bacs de culture C, 51 % pour les bacs de culture ST, 22 % pour les bacs OP1.Sh – OP2.Sh et 10 % pour les bacs OP1.Su – OP2.Su. Après 116 jours de culture, les couverts végétaux C avaient une biomasse sèche 2 à 3 fois inférieure à celle des autres conditions de culture (e.g., 9,3 g contre 18,7 g pour OP1.Su et 29,9 g pour ST.Su). Ces différences étaient significatives entre C et ST.Su. Les couverts végétaux ST.Su avaient la biomasse sèche la plus élevée (i.e., +25,9 % et +37,6 % par rapport à OP2.Sh et C) suivis par OP2.Sh, OP2.Su, ST.Sh, OP1.Sh, OP1.Su et C. D'après le PPF et la biomasse sèche, la RUE la plus élevée des couverts végétaux était celle de OP2.Sh, suivie de celle de OP1.Sh, OP2.Su, OP1.Su, ST.Su et ST.Sh (Figure 1.B). En effet, par rapport à l'ensoleillement reçu par les bacs de culture C, les couverts végétaux de *Nc* des bacs de culture OP2.Sh avaient converti 21 fois plus efficacement l'ensoleillement reçu en biomasse sèche. Pour les autres bacs de culture, l'efficacité de photoconversion des couverts végétaux était plus de 18 fois supérieure pour OP1.Sh, plus de 9 fois pour OP2.Su, 8 fois pour OP1.Su, 5 fois pour ST.Su et 3 fois pour ST.Sh en comparaison de C. Le RUE était significativement plus élevé pour OP1.Sh et OP2.Sh, en comparaison à l'ensemble des autres conditions. Ainsi, les conditions de culture de *Nc* sous des modules PV étaient toujours plus efficaces pour convertir l'ensoleillement en biomasse sèche.

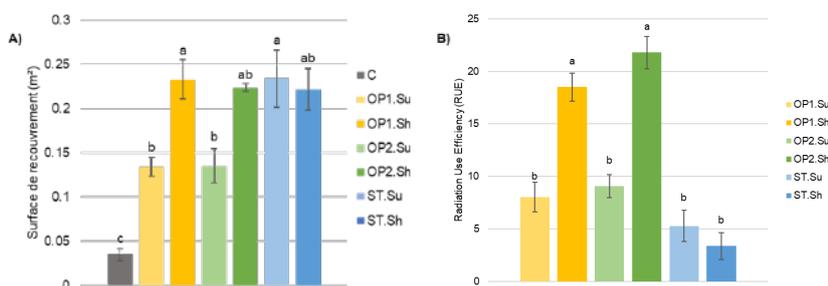


Figure 1 : Développement de *Nc* à T116 jours. A) Surface de recouvrement de *Nc*. B) RUE des couverts végétaux positionnés sous les modules PV en comparaison des couverts végétaux des bacs de culture C. La moyenne ( $n=3$ ) et  $\pm$  l'erreur standard suivie de lettres différentes indiquent des différences significatives entre les conditions considérées à une valeur  $p \leq 0,05$ , évaluée par ANOVA avec test post hoc de Tukey

A la fin de l'expérimentation, les BCF de *Nc* concernant le Cd et le Zn étaient fortement supérieurs à 1 montrant que la capacité de *Nc* à accumuler ces éléments à partir du sol, n'a pas été affectée par la présence des modules PV (Tableau 1). Concernant le Ni, les BCF étaient tous inférieurs à 1 quel que soit la position des bacs. Globalement, les valeurs de BCF sont proches quel que soit les conditions de culture. La seule différence observée concerne les BCF du cadmium pour OP1.Sh et OP1.Su avec une valeur significativement plus importante pour OP1.Sh. Ceci montre que malgré les différences observées au niveau du développement et de l'état physiologique de *Nc*, sa capacité à accumuler les métaux n'a pas été modifiée. Cependant, en raison du meilleur développement des couverts végétaux à l'ombre ainsi que sous les modules PV semi-transparents, ceux-ci avaient accumulés jusqu'à 5,5 fois plus de Cd et Zn en comparaisons des couverts végétaux C.

Tableau 1 : Facteur de bioconcentration de *Nc* à T116 jours. La moyenne ( $n=3$ ) et  $\pm$  l'erreur standard suivie de lettres différentes indiquent des différences significatives entre les conditions considérées à une valeur  $p \leq 0,05$ , évaluée par ANOVA avec test post hoc de Tukey

Condition de culture	Cd	Ni	Zn
C	48.05 $\pm$ 7.91 ab	0.64 $\pm$ 0.08 a	43.18 $\pm$ 5.23 a
OP1.Sh	67.34 $\pm$ 7.73 a	0.67 $\pm$ 0.1 a	59.39 $\pm$ 9.18 a
OP1.Su	35.81 $\pm$ 7.68 b	0.46 $\pm$ 0.05 a	42.27 $\pm$ 9.94 a
OP2.Sh	50.3 $\pm$ 1.59 ab	0.43 $\pm$ 0.03 a	38.03 $\pm$ 0.65 a
OP2.Su	53.01 $\pm$ 2.4 ab	0.58 $\pm$ 0.02 a	49.58 $\pm$ 5.79 a
ST.Sh	54.2 $\pm$ 5.91 ab	0.58 $\pm$ 0 a	63.12 $\pm$ 6.65 a
ST.Su	53.77 $\pm$ 4.5 ab	0.66 $\pm$ 0.05 a	63.76 $\pm$ 5.65 a

Dans le cadre du traitement des données de température des modules PV, la Figure 2 présente les résultats obtenus pour les Pr de Pr.C et de Pr.OP. Sur le mois d'octobre, les Pr de Pr.C et de Pr.OP diminuaient avec l'augmentation de la température en face arrière des modules PV. En outre, la moyenne journalière du Pr de Pr.C était de 0,35 et celle de Pr.OP était de 0,42. Ainsi, la présence d'un couvert végétal sous-jacent aux modules PV a augmenté le ratio de performance des modules PV et une amélioration de 18% a été mesurée dans cette étude.

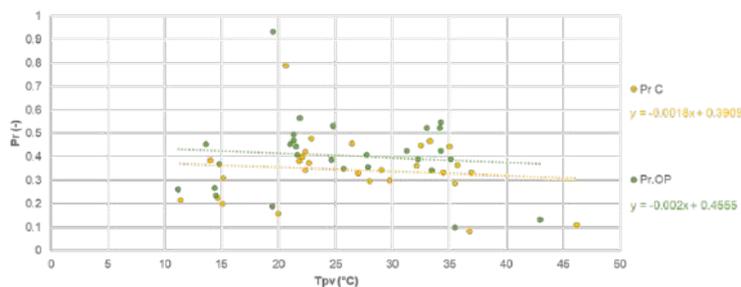


Figure 2 : Ratio de performance des modules PV sur le mois d'octobre selon la température en face arrière des modules PV. Pr.C correspond au module PV sans couvert végétal sous-jacents et Pr.OP correspond au modules PV avec couvert végétal sous-jacents

## Conclusions et perspectives

Ces résultats montrent que la culture de *Nc* a été affectée par un ensoleillement direct, alors que la culture sous les modules PV a un effet protecteur sur le développement des couverts végétaux. Parmi les différents systèmes PV, les modules PV bifaciaux semi-transparents fournissent la réduction d'ensoleillement la plus efficace à l'exposition directe au soleil, entraînant une augmentation de la biomasse végétale. Cependant, malgré la quantité la plus faible d'ensoleillement, les couverts végétaux positionnés sous les modules PV opaques ont été les plus efficaces pour convertir l'ensoleillement en biomasse. Pour chaque type de modules PV, l'emplacement ombragé est le plus propice au développement de *Nc*. De plus, la présence de couverts végétaux semble réduire la température en face arrière des modules PV et améliorer de 18% leur ratio de performance. Une première analyse des concentrations en ETMs de *Nc* et du sol montre que les BCF sont globalement similaires quel que soit le positionnement des couverts végétaux par rapport aux modules PV.

En perspectives, l'analyse de différents paramètres mesurés, tels que la teneur en carbone et en azote des sols, ainsi que la diversité bactérienne tellurique permettront de cerner un potentiel effet du couplage entre la production d'électricité PV et l'agromine sur l'amélioration de la qualité physico-chimique et biologique des sols.

## Références

- [1] Kuhn, T.E., Erban, C., Heinrich, M., Eisenlohr, J., Ensslen, F., Neuhaus, D.H., 2021. Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV). *Energy Build.* 231, 110381. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110381>
- [2] Gestionnaire du réseau de transport. (2021). Production totale. [https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/production\\_totale/](https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/production_totale/)
- [3] International Renewable Energy Agency. (2022). Renewable Capacity Statistics 2022. <https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022>
- [4] Vie publique. (2022). Déclaration de M. Emmanuel Macron, Président de la République, sur la politique de l'énergie, à Belfort le 10 février 2022. <https://www.vie-publique.fr/discours/283773-emmanuel-macron-10022022-politique-de-lenergie>
- [5] Mamun, M.A.A., Dargusch, P., Wadley, D., Zulkarnain, N.A., Aziz, A.A., 2022. A review of research on agrivoltaic systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 161, 112351. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351>
- [6] Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., Högy, P., 2021. Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agron. Sustain. Dev.* 41. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>
- [7] Fu, J., Li, C.-H., Zhao, J.-R., Ma, L., Liu, T.-X., 2009. Shade-tolerance indices of maize: Selection and evaluation. *Chin. J. Appl. Ecol.* 20, 2705–2709.

- [8] Portail de l'artificialisation des sols. (2023). Parution des données de consommation d'espaces 2009-2022. <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/parution-des-donnees-consommation-despaces-2009-2022>
- [9] Cerema. (2023). Cartofriches : plus de 8300 sites en friches répertoriés et caractérisés, l'API données foncières du Cerema en accès libre. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cartofriches-plus-8300-sites-friches-repertories>
- [10] Morel, J.L., Chenu, C., Lorenz, K., 2014. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *J. Soils Sediments* 15, 1659–1666. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0926-0>
- [11] Salemaa, M., Vanha-Majamaa, I., Derome, J., 2001. Understorey vegetation along a heavy-metal pollution gradient in SW Finland. *Environ. Pollut.* 112, 339–350. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00150-0)
- [12] Salisbury, A., Gallagher, F.J., Parag, H.A., Meneses-Florián, L., Holzapfel, C., 2021. Plant diversity increases in an urban wildland after four decades of unaided vegetation development in a post-industrial site. *Urban Ecosyst.* 24, 95–111. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-01018-x>
- [13] Liu, L., Li, W., Song, W., Guo, M., 2018. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Sci. Total Environ.* 633, 206–219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
- [14] Ali, H., Khan, E., Sajad, M.A., 2013. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere* 91, 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- [15] Morel, J.-L., 2013. Using plants to “micro-mine” metals. In: <http://www.inra.fr/en/Scientists-Students/Biomass/All-the-news/Using-plants-to-micro-mine-metals>
- [16] Grison, C., Cases, L., Le Moigne M., Hossaert-McKey M., 2021. Photovoltaïsme, agriculture et écologie : de l'agrivoltaïsme à l'écovoltaïsme, Collection écologie-environnement. ISTE editions Ltd, London SW19 4EU, UK, 172 pages.
- [17] Khalid, A.M., Mitra, I., Warmuth, W., Schacht, V., 2016. Performance ratio—Crucial parameter for grid connected PV plants. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 65, 1139–1158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.066>
- [18] Van der Ent, A., Baker, A.J.M., Reeves, R.D., Pollard, A.J., Schat, H., 2013. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fiction. *Plant Soil* 362, 319–334. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1287-3>
- [19] RStudio Team, 2020. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>.

## Remerciements

Ce travail a été partiellement financé par l'appel à projets 2022 « Compétences recherche de la Région Grand-Est ». Ce travail réalisé dans le cadre de l'INES.2S a été partiellement soutenu par l'Etat français dans le cadre du programme des Investissements d'Avenir (ANR-10-IEED-0014-01).

# Intégration « délicate » des enjeux de biodiversité dans le cadre des travaux de mise en sécurité d'une ancienne décharge de laitiers

Thomas PERRIER<sup>1</sup>, Joris ROSSAT<sup>1</sup>, Olivier SIBOURG<sup>2</sup>

<sup>1</sup> RAMBOLL FRANCE, 155 rue Louis de Broglie 13100 Aix-en-Provence,

<sup>2</sup>RAMBOLL FRANCE, 2 rue Maurice Moissonier- 69120 Vaulx-en-Velin,

Auteur : [tperrier@ramboll.com](mailto:tperrier@ramboll.com)

Contact : [osibourg@ramboll.com](mailto:osibourg@ramboll.com)

*Communication orale* : Thème 5 : Approches environnementales des solutions de gestion des sols pollués

## Résumé

La présentation proposée porte sur une ancienne décharge de laitiers d'aciérie, actuellement arrêtée. Les autorités ont demandé un réaménagement pour une mise sécurité du site. Une évaluation a été lancée pour examiner les avantages de dépolluer le site en préservant et valorisant la biodiversité. L'objectif est de présenter les interactions et parfois les confrontations entre la gestion de la pollution et la préservation de la biodiversité.

Le défi du projet est de concilier deux approches : environnementale et biodiversité. Des divergences terminologiques et de priorisation entre les disciplines peuvent compliquer le projet, nécessitant des compromis pour la protection de la biodiversité sans bloquer les travaux de sécurisation.

Le projet cherche un équilibre entre la préservation de la biodiversité et la sécurisation environnementale. Il demande une gestion multidisciplinaire et une communication soignée entre les différents acteurs.

## Introduction

Le site d'étude est une ancienne décharge de laitiers issue d'une aciérie située dans le centre de la France, exploitée depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. Dans le cadre de la fin de l'exploitation de la décharge et de la cessation administrative de ces activités, les Autorités ont demandé à l'exploitant (« Le Client ») de définir les conditions de réaménagement et de mise en sécurité.

Une réflexion a été initiée afin d'évaluer les besoins et bénéfices nets de procéder à la dépollution du site au regard des enjeux de préservation et valorisation de la biodiversité déjà installée.

Il est proposé de présenter les interactions entre l'approche de gestion des sites et sols pollués et celle de préservation de la biodiversité dans le cadre de la mise en sécurité du site d'étude en mettant en lumière comment elles se complètent et parfois se confrontent.



Figure 1 : Vue générale du site avec la décharge de laitiers (à gauche), la plateforme au bord du plan d'eau et l'environnement boisé (à droite)

## Matériel et méthodes

Dans sa démarche de réhabilitation de la décharge, le Client est conscient dès la demande initiale des autorités des enjeux liés à la préservation de la biodiversité souhaitant l'intégration dès le stade du Plan de Gestion (au sens de la méthodologie nationale des Sites et Sols Pollués) du principe de la séquence Eviter, Réduire Compenser (ERC).

Ainsi, dès la phase d'études les deux méthodologies ont co-existé avec en complément des différentes investigations réalisées classiquement pour ce type de site (caractérisation des pollutions dans les différents milieux et matrices, investigations géotechniques, etc.), la réalisation des inventaires écologiques faune/flore. A l'issue de ces étapes de caractérisation, l'évaluation des différentes options de gestion et la réalisation d'un bilan coûts/avantage intégrant en complément des critères technico-économiques classiques, la préservation de l'environnement naturel et la promotion de solutions durables, a permis de sélectionner le scénario de gestion le plus adéquat.

Après sa validation par la DREAL, des études d'avant-projet ont été initiées par le Client afin de valider la faisabilité des solutions techniques de sécurisation géotechnique et de revégétalisation des talus. Les contraintes liées à la préservation de la biodiversité, ont été intégrées par la mise en application de la séquence ERC en y intégrant non seulement l'état final post-réhabilitation mais également les phases préparatoires et en cours de travaux.

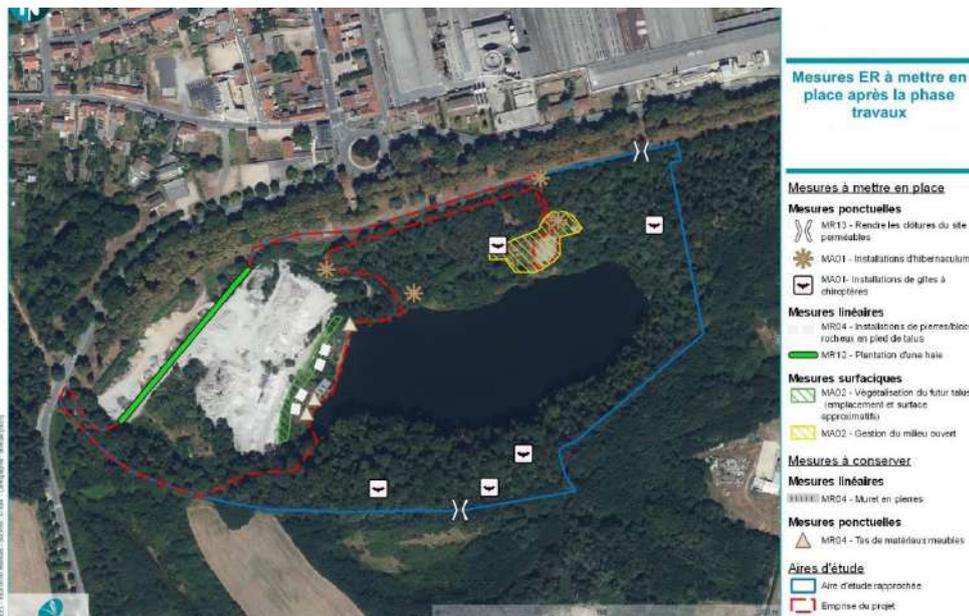


Figure 2 : Exemples de proposition de mesures ER pouvant être mises en place après la phase de travaux

## Résultats et discussion

La spécificité de ce projet réside dans l'imbrication des deux approches parfois complémentaires, parfois antagonistes. A titre d'exemple, la réalisation d'inventaires faunistiques révèle la présence d'espèces protégées ayant construit leurs habitats au droit du massif de déchets. La prise en compte de la préservation de ces habitats dans l'élaboration et la future réalisation des travaux d'aménagement est une obligation réglementaire visant à sécuriser l'impact environnemental. Pour autant, son application stricte peut entraîner des contraintes opérationnelles incompatibles avec le déroulé même du chantier voire entraîner un blocage complet rendant impossible l'autre nécessité réglementaire de mise en sécurité du site.

Les difficultés de conciliation de ces deux métiers se retrouvent également dans la sémantique utilisée pour caractériser la notion d'enjeux et de contraintes. Ainsi, certaines zones du site se retrouvent avec des contraintes fortes d'un point de vue biodiversité alors qu'il s'agit d'un enjeu faible au vu de l'impact environnemental. La hiérarchisation des priorités devient également complexe dans les interactions avec l'Administration suivant le service consulté. Ces aléas génèrent des points de blocage pour la réalisation des travaux de sécurisation et doivent impliquer la mise en œuvre de compromis pragmatique adaptés à l'enjeu de biodiversité locale.

## Conclusions et perspectives

Tout l'équilibre du projet de réhabilitation de l'ancienne décharge réside donc dans le fait trouver le bon compromis entre les enjeux de préservation de la biodiversité, via l'application de la séquence ERC, et la nécessité de sécurisation environnementale et de concilier des approches parfois antagonistes d'un point de vue réglementaire. S'y ajoutent des difficultés de communication entre des disciplines scientifiques très similaires mais disposant d'une vision dont l'échelle temporelle n'est pas forcément la même.

Notre présentation s'attachera à faire un retour d'expérience sans compromis sur les challenges issus de l'application conjointe de cette double approche au sein de ce même projet de réhabilitation, en mettant en lumière les points communs et divergences entre approches SSP et biodiversité.

## Remerciements

Le maître d'ouvrage, propriétaire du site qui a autorisé RAMBOLL a présenté le projet et nos partenaires sur le projet, plus particulièrement BIOTOPE pour les études réalisées sur les volets touchant à la biodiversité et Valhoriz sur les aspects revégétalisation