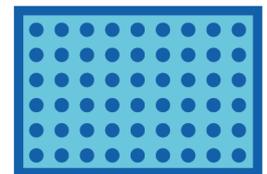
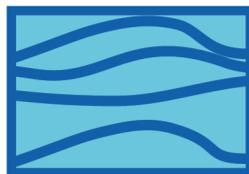


COMMUNICATIONS ORALES

5^e 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^{1*}, Thomas Beilvert¹, Julie Aumont¹, Julien Toutain¹, Geoffroy Séré², Antoine Tribotté¹, Olivier Hugues³, Enzo Miottini³

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

²: Université de Lorraine, INRAE, LSE, F-54000 Nancy, France.

³: 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 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 Rétention 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	1,88	1,83	1,67	2,98	1,5	1,3	1,4	1,22	2,25	1,76	1,78
	PM11	1,74	2,42	1,18	2	2	1,92	1,75			1,18	0	0,86			
	PM2	1,99	2,34	1,52	2,25	1,41	1,82	1,82	2,6	2	1,09	2,1	1,67	1,97	2,15	2,11
	PM3	2,01	2,32	1,41	1,75	1,76	1,86	1,86			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	1,6	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				2,14			0	1,6		
	Z02_A Pmoy2								1,6			0	0,74			
	Z02_B Pmoy2								1,8			0	1,8			
Z03	Z03_A_P03	1,37	2,14	1,15		0,68	0,56	0,56			0,94	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	1,19		0,57	0	0,97			
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	1,83	1,83	1,88	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).

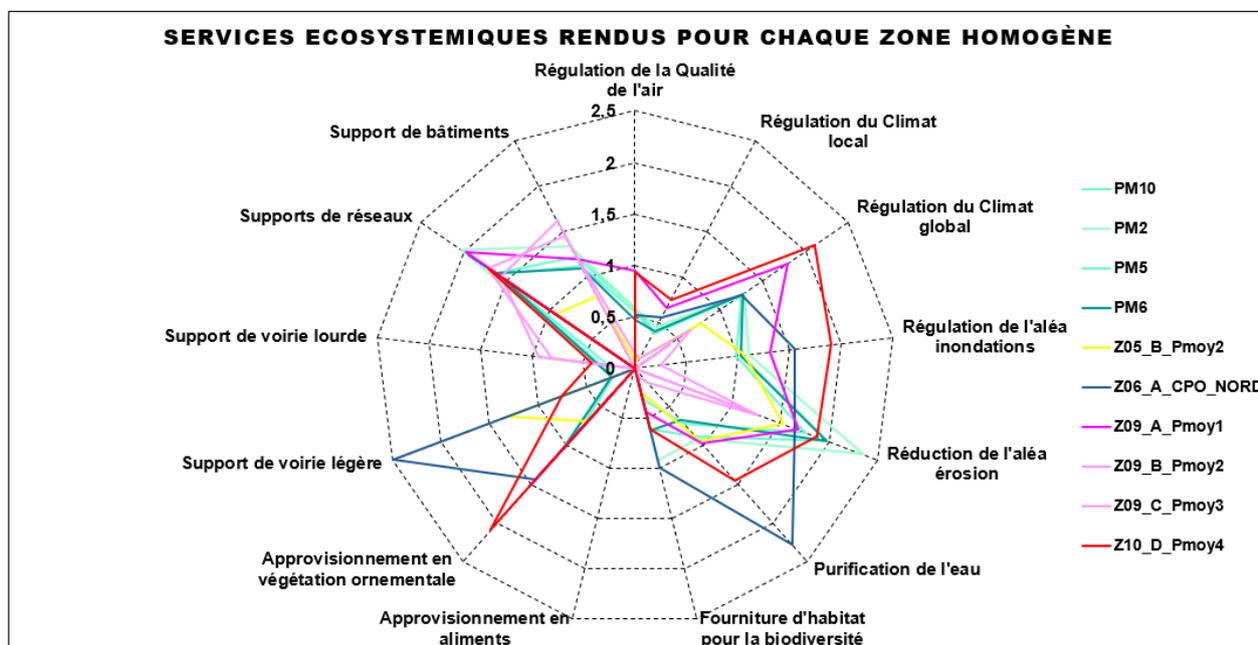


Figure 2 - Note de services rendus par les sols pour les profils de sols dans le scénario d'aménagement de base de la pointe ouest de l'île de Nantes. Les profils retenus sont ceux avec les données présentant la meilleure complétude.

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^{1*}, Jennifer HARRIS², Nicolas LEGAY³, Laure SANTONI⁴,
Pascaline HERBELIN⁴, Geoffroy SÉRE¹

¹Université de Lorraine, Laboratoire Sols et Environnement, France

²Bureau de Recherches Géologiques et Minières, F-45100 Orléans, France

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

⁴EDF 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 100m² présentant une végétation et un sol, considérés homogènes mais distinctes les uns 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.).

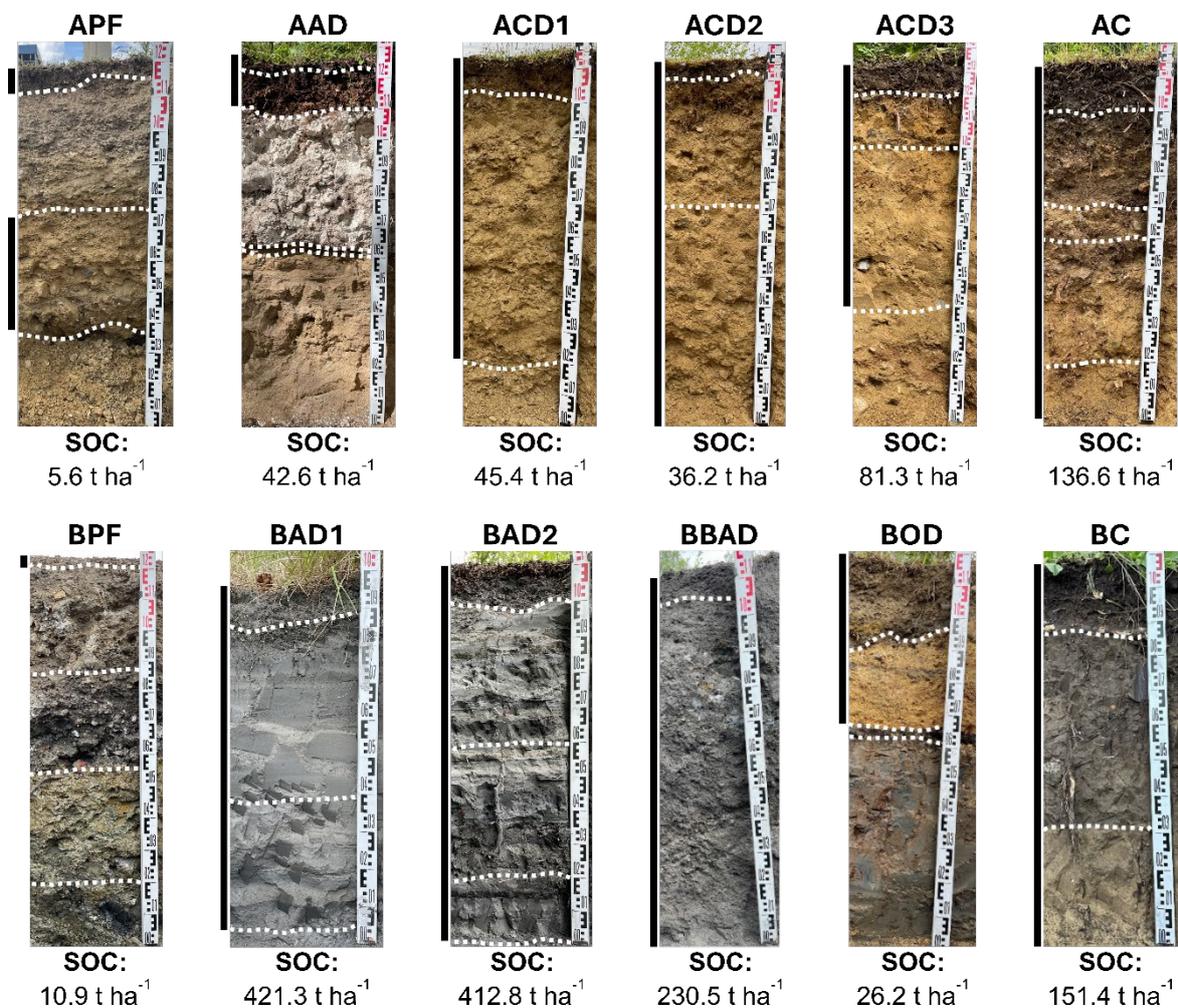
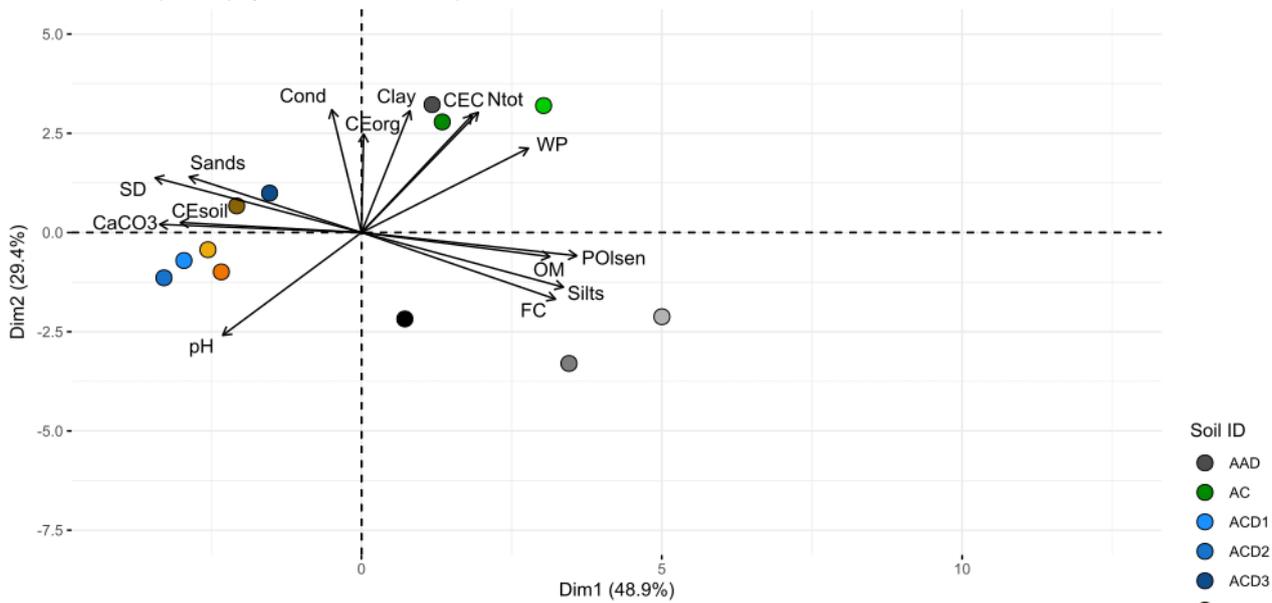


Figure 1. Photographies des profils de sol observés sur les sites d'études. Les lignes en pointillés délimitent les différents horizons observés lors de la description des fosses pédologiques. Le stock de carbone organique (SOC) a été estimé sur les horizons analysés de chaque profil (barre noire à gauche 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

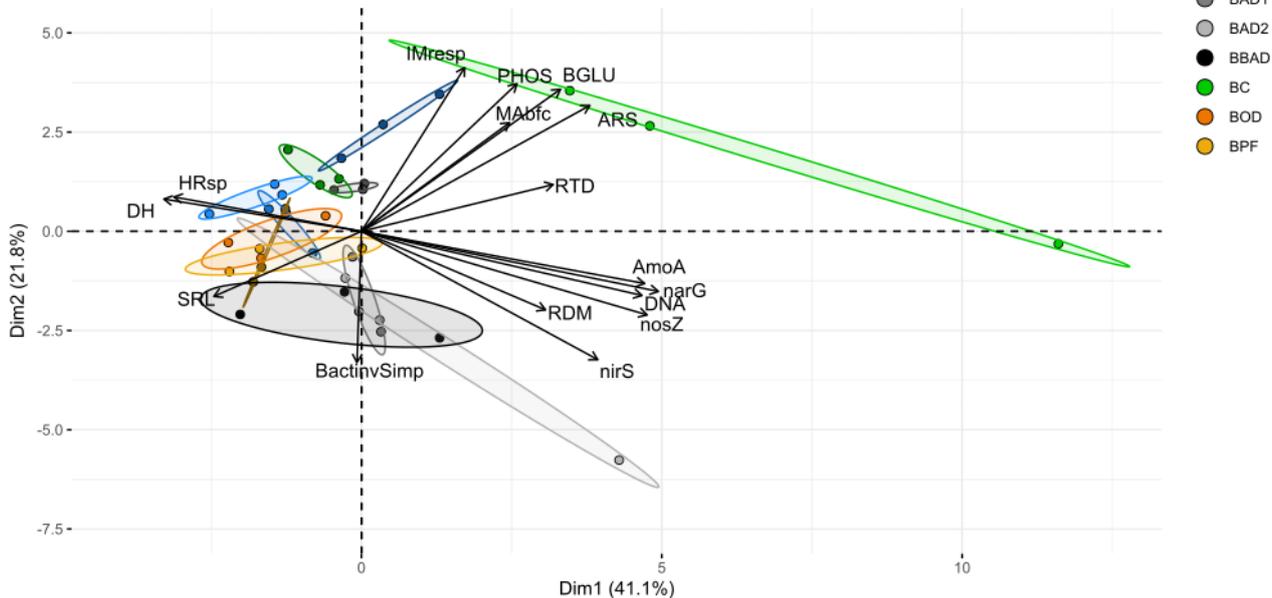


Figure 2. Analyses en Composante Principale des prélèvements de surface et de leurs paramètres physico-chimiques (A) et biologiques (B). Légende : *AmoA* = gène fonctionnel *AmoA* (copies.g⁻¹ sol sec) ; *ARS* = activité enzymatique de l'Arylsulfatase (nmol.min⁻¹.g⁻¹ sol sec) ; *BactinvSimp* = Indice inverse de Simpson de la communauté bactérienne ; *BGLU* = activité enzymatique de la B-Glucosidase (nmol.min⁻¹.g⁻¹ sol sec) ; *CaCO₃* = concentration en carbonate de calcium (g. kg⁻¹ sol sec) ; *CEC* = Capacité d'Echange Cationique (méq. 100g⁻¹) ; *CEorg* = teneur en éléments organiques grossiers (%) ; *CEsoil* = teneur en éléments minéraux grossiers (%) ; *Clay* = teneur en argile (%) ; *Cond* = Conductivité du sol (mS.cm⁻¹) ; *DH* = Indice de Simpson de la strate végétale herbacée ; *DNA* = concentration en ADN microbien du sol extrait (ng g⁻¹ sol sec) ; *FC* = Capacité au champ (%) ; *HRsp* = Richesse spécifique de la strate végétale herbacée (nombre individus. 100m⁻²) ; *IMresp* = Respiration microbienne induite (mg CO₂-C.kg⁻¹ sol sec .h⁻¹) ; *MAbfc* = Abondance fonctionnel de la macrofaune (nombre individus. 100m⁻²) ; *narG* = gène fonctionnel *narG* (copies.g⁻¹ sol sec) ; *nirS* = gène fonctionnel *nirS* (copies.g⁻¹ sol sec) ; *nosZ* = gène fonctionnel *nosZ* (copies.g⁻¹ sol sec) ; *pH* = pH eau du sol ; *PHOS* = activité enzymatique de la Phosphatase « neutre » (nmol.min⁻¹.g⁻¹ sol sec) ; *POlsen* = concentration de phosphore Olsen (g. kg⁻¹ sol sec) ; *RDM* = Matière racinaire sèche (mg.g⁻¹ sol sec) ; *RTD* = Densité de tissu racinaire (g.cm⁻³) ; *Sands* = teneur en sables (%) ; *SD* = Densité réelle du sol (g.cm⁻³) ; *Silts* = teneur en limons (%) ; *SRL* = Longueur spécifique racinaire (m.g⁻¹ 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_{Olsen}, la teneur en limons, la densité réelle et la concentration en CaCO₃ ; 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^{1*}, Olivier HULLOT², Maria-Fernanda ROMERO-SARMIENTO³, Jennifer HELLAL², Maira ALVES FORTUNATO³, Yannis PITTATORE¹, Sacha PUECH¹, Jérôme NESPOULOUS¹, Virginie DERYCKE², Daniel MONFORT-CLIMENT², David SEBAG³, et Hassan BOUKCIM¹

¹ Département de Recherche et Développement, Valorhiz SAS, Montpellier, France

² BRGM, F-45071 Orléans, France

³ 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 200m² 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.

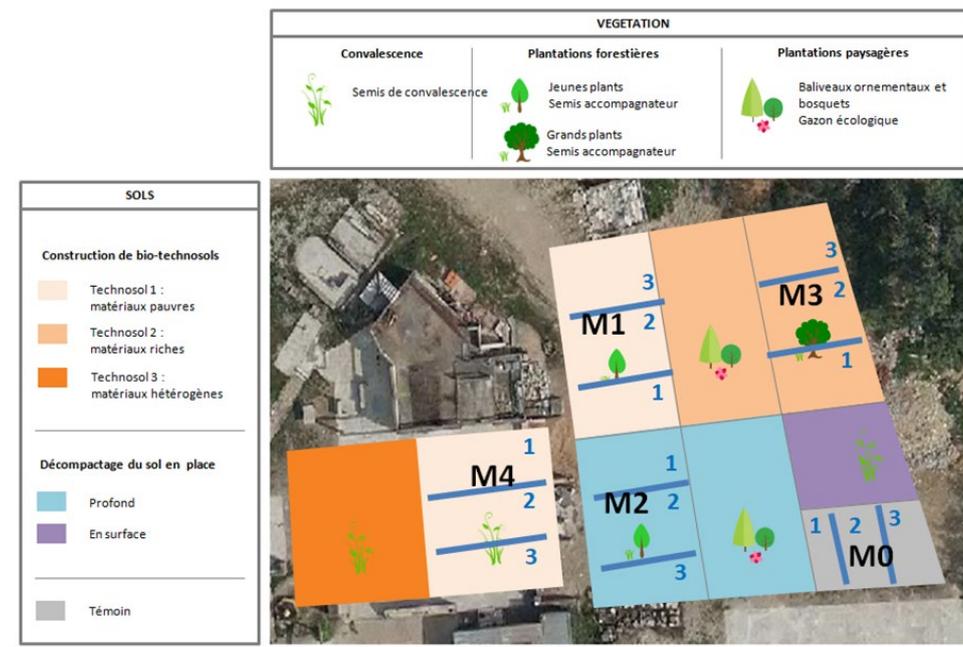


Figure 1 : Exemple du design des modalités expérimentales sur le site de Pierre-Bénite (Métropole de Lyon). Les numéros (1 à 3) représentent les sous-modalités échantillonnées.

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^{ème} 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.

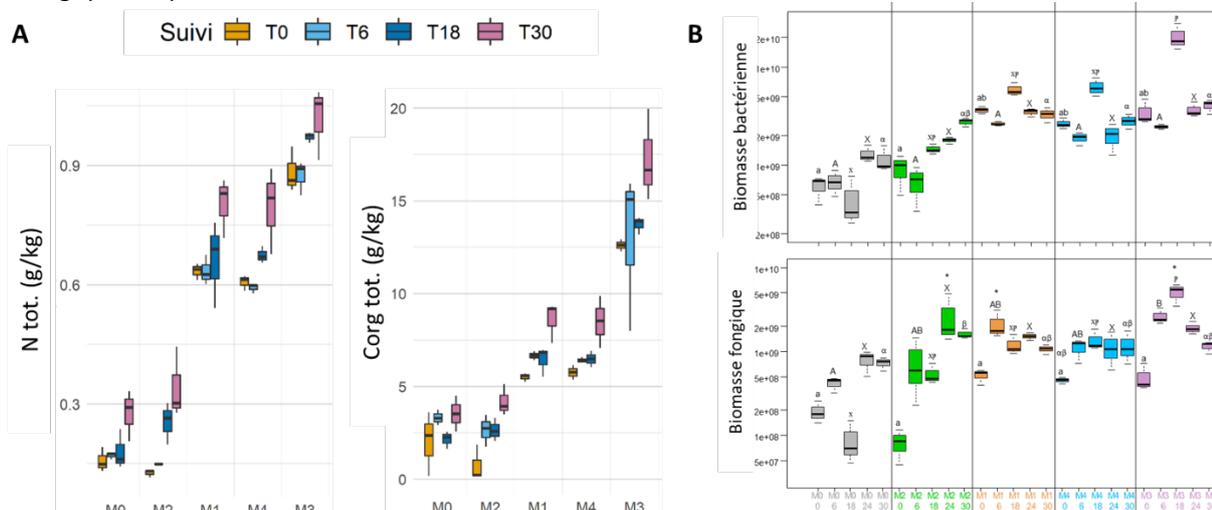


Figure 2 : Sélection d'indicateurs biotiques et abiotiques de la fertilité des sols. Azote total (N tot.), Carbone organique total (Corg tot.); Biomasses microbiennes exprimées en nombre de copie 16S (bactéries) et ITS (champignons) /g de sol); Suivi dans le temps exprimé en mois.

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 refunctionalisation 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)

Vincq (2018). Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (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^{1*}, Sébastien KASKASSIAN², Clotilde JOHANSSON¹, Louise DESSERTINE¹, Baptiste FILLEBEEN², Niâma EL KARI²

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

² 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 CO₂ émis / m³ 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^{ème} 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 CO₂ 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 CO₂. 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂POL 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 m³ 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 ₂ e	Amortissement – T CO ₂ e
Transport de matériaux (y.c. équipement et terres / déchets vers les exutoires) TOTAL = 72,6 T CO₂e	Camion 40T = 387 820 t.km Camion plateau = 2 100 km Tombereau 30-50T = 89 jours Camion 6x4 = 4 jours	CO ₂ e Camion 40T = 32,9 CO ₂ e Camion plateau = 0,82 CO ₂ e Tombereau 30-50T = 31.9 CO ₂ e Camion 6x4 = 1.44	CO ₂ e Camion 40T = 4,65 CO ₂ e Camion plateau = 0,06 CO ₂ e Tombereau 30-50T = 0.84 CO ₂ e Camion 6x4 = 0,02
Transport de personnes (AR agence / chantier) TOTAL = 37,6 T CO₂e	Dist. Voit. Ess. = 32 510 km Dist. Voit. Diesel = 120 750 km Dist. Train (TGV + TER) = 10 560 km	CO ₂ e Voit. Ess. = 6,40 CO ₂ e Voit. Diesel = 22,5 CO ₂ e Train (TGV + TER) = 0,06	CO ₂ e Voiture Ess. = 1,83 CO ₂ e Voit. Diesel = 6,79 CO ₂ e Train (TGV + TER) = 0,003
TOTAL = 110,2 T CO₂e	-	CO₂e Exploitation = 96.02	CO₂e Amortissement = 14.2

Tableau 1 : Emissions de CO₂ 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 CO₂e en fonction du mode de traitement de ces déchets (déchets dangereux moyen = 0,13 CO₂e / T déchet, déchets dangereux incinérés = 0,84 CO₂e / 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 ₂ e	Amortissement – T CO ₂ e
Analyses en laboratoire TOTAL = 3,75 T CO₂e	9 kEUR Indicateur financier	CO ₂ e = 3,75 (min. : 2,5 - max. : 5) Les FE associés aux indicateurs financiers intègrent les deux postes	
Forage pour l'échantillonnage TOTAL = 3,49 T CO₂e	21 puits/piézomètres à 9m 17 j de forage (dont 1 journée de sondages sol)	CO ₂ e Foreuse = 2,41 CO ₂ e Transport = 0,60 CO ₂ e Equipment Piézo. = 0,32	CO ₂ e = 0,16 Foreuse et engins de transport
Déplacement pour l'échantillonnage TOTAL = 0,33 T CO₂e	Dist. Voit. Diesel = 1 336 km	CO ₂ e Voit. Diesel = 0,25	CO ₂ e Voit. Diesel = 0,08
Déchets liés à l'échantillonnage Non estimé	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	
TOTAL = 7,57 T CO₂e	Hors déchets induits	CO₂e Analyses labo. = 3,75 (incluant exploitation et amortissement)	
		CO ₂ e Engins / Equipement = 3,58	CO ₂ e Engins / Equipement = 0,24

Tableau 2 : Emissions de CO₂ 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 CO₂e) et la prise en compte des déchets générés par l'échantillonnage (1,3 à 8,4 T CO₂e). 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 CO₂ émis par m³ 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 ₂ équivalent
Venting/sparging	5 à 15 kgCO ₂ e/m ³
Excavation + élimination hors site	80 à 160 kgCO ₂ e/m ³

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^{ème} 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'Énergie 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 \(fntp.fr\)](#), 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.