

Élodie Nguyen- -Rabot

M1 Économie de l'Environnement, de l'Énergie et des Transports

(EEET)

2022-2023

Université de Nanterre, Université Paris-Saclay, AgroParisTech

Estimer les coûts de renaturation des sols

Rapport de stage

sous la tutelle de Harold Levrel

CIREC, Centre International de Recherche sur l'Environnement et le
Développement, UMR 8578

CNRS / École des Ponts ParisTech / Cirad / EHESS / AgroParisTech

Jury : Harold Levrel, Kim Pham



Sommaire

Remerciements	3
Résumé	4
Partie I : Contexte du stage	5
1. Présentation de la structure : CIRED & Chaire Comptabilité Écologique.....	5
2. Mes missions.....	5
3. Un contexte de travail collaboratif.....	5
Partie II : Estimer les coûts de renaturation des sols	6
1. Introduction	6
2. Méthodologie	9
2.1 Enquête exploratoire.....	9
Entretiens.....	9
Collecte de données par documents.....	10
Événements.....	11
2.2 Collecte de données.....	11
2.3 Constitution et alimentation des bases de données.....	14
3. Résultats	14
3.1 Structuration d'un processus de désartificialisation.....	14
3.2 La filière de la renaturation des sols en France.....	17
Évolution de la typologie au cours de nos recherches.....	17
Description détaillée et coût de chaque étape.....	18
3.3 Les bases de données sur les coûts de renaturation d'un sol.....	24
4. Discussion et conclusion	24
Bibliographie et médiagraphie	26
Références juridiques	27
Annexes	28
Carte mentale des étapes de la désartificialisation d'un sol.....	28
Exemple de projets aboutis de renaturation.....	28
Questionnaire administré aux acteurs de la renaturation.....	28
Tableau des entretiens à partir du questionnaire réalisés en phase de collecte de données.....	35
Tableau des fourchettes de coûts par sous-étape.....	37
Abréviations	46
Glossaire	46

Remerciements

Je remercie vivement Harold Levrel pour son accompagnement et ses points réguliers qui ont donné à ce travail la bonne direction.

Je tiens à remercier chaleureusement mes encadrants de stage, Mathilde Salin et Charles Claron, pour leurs conseils avisés, leur gentillesse perpétuelle et leur présence.

J'adresse enfin toute ma gratitude à Nicolas Mondolfo, sans qui tout ce travail n'aurait pu voir le jour. Il était stagiaire comme moi et nous avons travaillé ensemble sur ce sujet de façon efficace et toujours dans la bonne humeur : une ambiance de travail que l'on regretterait presque en vacances !

Ce rapport de stage est le fruit d'un travail collectif.

Merci également à Clément Surun qui nous a prodigué des conseils fort utiles pour la constitution des bases de données. Il nous a de plus patiemment expliqué les objectifs multiples de la comptabilité écologique et a marqué le lien avec notre travail.

Résumé

Le rôle crucial des sols dans la lutte contre le réchauffement climatique et l'érosion de la biodiversité a été porté dans le débat public par la Convention Citoyenne pour le Climat (2020). Or il est apparu que le rythme de l'artificialisation des sols est quatre fois plus soutenu que l'augmentation de la population¹. Pour freiner ce phénomène, des mesures de sobriété foncière sont envisagées. Il est également possible de recourir à des opérations de désartificialisation (ou renaturation) d'un sol pour lutter contre les îlots de chaleur urbains, limiter le ruissellement d'eau et permettre son infiltration ou encore augmenter le bien-être des populations par la création d'espaces verts. Au-delà des services écosystémiques rendus par un sol désartificialisé, la création d'habitats pour le vivant contribue à endiguer l'extinction de masse actuelle de la biodiversité². Mais alors que les bénéfices de la renaturation d'un sol ne sont plus à prouver, la filière et le coût de ces opérations n'ont pas encore été documentés. Ce travail vise à estimer les coûts de renaturation des sols en recensant et interrogeant les différents acteurs qui œuvrent à des opérations de renaturation.

¹ voir <https://www.ecologie.gouv.fr/artificialisation-des-sols>

² voir [National Geographic. La sixième extinction massive a déjà commencé](#)

Partie I : Contexte du stage

1. Présentation de la structure : CIREC & Chaire Comptabilité Écologique

Le stage s'est déroulé au sein du Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIREC), qui est une Unité Mixte de Recherche (UMR 8568) sous tutelle principale du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'École des Ponts ParisTech, avec le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), AgroParisTech et l'École des Hautes Études en Sciences Sociales (EHESS)³.

Plusieurs chercheurs et doctorants du CIREC travaillent également pour la Chaire Comptabilité Écologique (CCE) dans laquelle j'ai réalisé le stage. Cette Chaire est hébergée par la fondation AgroParisTech et est co-dirigée par Harold Levrel. L'objectif de la CCE est de « développer, modéliser, promouvoir et expérimenter des comptabilités en durabilité forte, pour mettre les systèmes comptables au service d'une transition écologique. »⁴. Pour ce faire, la plupart des membres de la CCE travaillent sur le modèle CARE (Comprehensive Accounting in Respect of Ecology) qui vise à intégrer les enjeux environnementaux au cœur même de l'entreprise. Dans ce modèle, les entités naturelles, comme le sol, plutôt que d'être considérées comme une ressource, sont intégrées au passif du bilan de l'entreprise afin de matérialiser la dette écologique. Par exemple, lorsqu'une entreprise dégrade le sol en l'artificialisant, elle contracte une dette biophysique qui peut être estimée en termes monétaires à partir des coûts de préservation (Gonon, 2021 ; Surun, 2023).

2. Mes missions

Puisque l'objectif de mon stage était d'estimer les coûts de renaturation (ou désartificialisation) des sols, les résultats obtenus pourraient permettre de calculer, dans le cadre d'un modèle de comptabilité écologique comme le modèle CARE, la dette monétaire d'une entreprise qui déciderait d'artificialiser un espace.

J'étais chargée de segmenter un processus de désartificialisation en plusieurs étapes et sous-étapes afin de définir les fourchettes de coûts de ces sous-étapes et les facteurs de variabilité associés.

3. Un contexte de travail collaboratif

Ce stage s'insère dans un projet collectif mené par Harold Levrel, chercheur au CIREC, ainsi que Mathilde Salin, doctorante CIFRE au CIREC et à la Banque de France, et Charles Claron, doctorant au CIREC. J'étais de plus accompagnée par un autre stagiaire, Nicolas Mondolfo, avec qui j'ai collaboré de façon quotidienne.

³ voir le [site du CIREC](#)

⁴ voir le [site de la CCE](#)

Partie II : Estimer les coûts de renaturation des sols

1. Introduction

Les sols, entité écologique encore méconnue, sont devenus un enjeu majeur dans la préservation de la biodiversité et la lutte contre le changement climatique. Non seulement leur dégradation par l'artificialisation constitue le premier pilier d'érosion de la biodiversité en détruisant les habitats du vivant, mais elle entraîne par ailleurs la destruction des nombreuses fonctions écologiques permises par les sols.

D'un point de vue économique, la dégradation des sols empêche l'adaptation au changement climatique car des sols en bonne santé⁵ représentent des puits de carbone importants. Par ailleurs, des sols perméables réduisent le risque d'inondation en permettant à l'eau de s'infiltrer plutôt que de ruisseler. Autre avantage et pas des moindres, des sols fertiles rendent possibles les pratiques agricoles. De ce fait, l'artificialisation, en diminuant la surface agricole utile, menace notre capacité à nous nourrir sur le long terme.

Ainsi, le sol est devenu un enjeu de préoccupation politique à plusieurs échelles. La [Directive relative à la surveillance et à la résilience des sols](#) souligne la mauvaise santé de la majorité (60 à 70%) des sols européens et rappelle les menaces que constituent des sols dégradés en termes de souveraineté alimentaire, de qualité de l'eau, de protection contre les inondations et les sécheresses, de production de biomasse, de stockage de carbone et d'habitats pour la biodiversité. La loi de restauration de la nature adoptée le 12 juillet 2023 au sein du Pacte Vert européen fixe des objectifs pour protéger les espaces verts urbains. L'article 6 de cette loi indique que les États-membres doivent veiller « à ce qu'il n'y ait **pas de perte nette d'espaces verts urbains** ni de couvert arboré urbain **d'ici à 2030**, par rapport à 2021, dans l'ensemble des agglomérations et dans les villes et banlieues. »⁶, avec la volonté d'augmenter la surface d'espaces verts urbains d'au moins 3% d'ici à 2040 par rapport à 2021 et d'au moins 5% d'ici à 2050.

En France, la [Stratégie Nationale pour la Biodiversité](#) (SNB) sur la période 2011-2020 découle de la stratégie de l'Union Européenne en faveur de la biodiversité à l'horizon 2020⁷. De plus, la [Convention Citoyenne pour le Climat](#) (2020) réaffirme l'objectif de « zéro artificialisation nette » (ZAN) fixé dans le [Plan Biodiversité](#) (2018) (Claron et al., 2021). Cet objectif a été repris dans la [loi Climat et Résilience](#) (2021) à l'horizon 2050. L'article 192 de cette loi définit l'artificialisation comme « l'altération durable de tout ou partie des **fonctions écologiques** d'un sol »⁸. Cependant, si cette définition tient compte des fonctions écologiques des sols, il est indiqué dans l'article 193 que « pour la première tranche de dix années, le rythme d'artificialisation est traduit par un objectif de **réduction de la**

⁵ “‘soil health’ means the physical, chemical and biological condition of the soil determining its capacity to function as a vital living system and to provide ecosystem services”, Proposition de la Commission Européenne pour une [Directive relative à la surveillance et à la résilience des sols](#)

⁶ voir la Proposition de [Règlement du Parlement Européen et du Conseil relatif à la restauration de la nature](#)

⁷ [Biodiversité, utilisation des sols et sylviculture](#)

⁸ [LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets](#)

consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF) par rapport à la consommation réelle de ces espaces observée au cours des dix années précédentes »⁹. Cela signifie que d'ici 2031, la notion d'artificialisation des sols est confondue avec la consommation d'ENAF (Claron et al., 2021). Ainsi cette loi définit l'artificialisation de deux façons, d'une part comme la dégradation des fonctions écologiques et d'autre part comme une surface binaire où le sol est artificialisé ou non.

Discussion autour des définitions¹⁰

Le Code de l'Urbanisme, dont le but est de détailler la manière dont les collectivités publiques doivent lutter contre l'artificialisation, définit la renaturation de cette façon¹¹ :

*« La renaturation d'un sol, ou désartificialisation, consiste en des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de **transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé.** »*

Cette définition génère certaines confusions. Premièrement, la notion de « renaturation » est présentée comme synonyme de « désartificialisation » sans qu'il soit précisé selon quelle définition de l'artificialisation dictée par la loi Climat et Résilience on comprend la « désartificialisation » - dans la suite de ce présent rapport, nous utiliserons indistinctement « désartificialisation » et « renaturation ». Ici, il semble y avoir les deux : l'amélioration des fonctionnalités du sol serait censée le transformer en sol non artificialisé. Cela suppose qu'il existerait un seuil au-delà duquel, en raison de ses fonctionnalités, un sol artificialisé est transformé en sol non artificialisé. Toutefois, contrairement à ce que laisse penser la définition du Code de l'Urbanisme, ce n'est pas la qualité fonctionnelle des sols qui déterminent leur caractère artificiel ou non mais leurs usages et occupations. Ainsi, comment articuler la définition fonctionnelle avec la nomenclature de l'artificialisation retenue jusqu'en 2031¹² ?

D'autre part, de nombreux flous subsistent encore dans le droit concernant la renaturation des sols. L'article 197 de la loi Climat et Résilience prévoit notamment la possibilité que « les mesures de compensation [soient] mises en œuvre en priorité au sein des zones de renaturation préférentielle »¹³, or cet article introduit une confusion majeure entre « renaturation des sols » et « compensation écologique » ; les risques de mauvaises pratiques sont alors importants car ces deux dispositifs visent à organiser des réparations en nature pour des entités naturelles très différentes que sont les sols et les espèces ou milieux naturels.

⁹ *Ibid.*

¹⁰ Le contenu de cette partie s'appuie sur un travail d'analyse juridique réalisé par un membre de l'équipe (C. Claron).

¹¹ [article L101-2-1 du code de l'urbanisme](#)

¹² Voir le [Décret n° 2022-763 du 29 avril 2022 relatif à la nomenclature de l'artificialisation des sols pour la fixation et le suivi des objectifs dans les documents de planification et d'urbanisme](#) et la catégorie n°6

¹³ [LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets](#)

Avec la loi de mise en œuvre du ZAN, sénateurs et gouvernement ont souhaité faire de la renaturation un levier de mise en œuvre de la lutte contre l'artificialisation dès 2023, et plus précisément dès la première décennie de référence pour l'objectif (2021 - 2031). Cette possibilité avait été écartée par la loi Climat et Résilience qui avait prévu qu'elle ne soit intégrée aux stratégies de lutte contre l'artificialisation qu'à partir de 2031. La renaturation fait ainsi son entrée dans l'opérationnalisation du ZAN alors que son régime juridique reste marqué par de nombreux angles morts. En effet, aucune clause ne définit la nature des équivalences qui devront être atteintes au terme de ces opérations ; il n'est pas précisé que l'équivalence concerne les fonctions écologiques des sols et à quel point celles-ci doivent être restaurées. Par ailleurs, il n'existe pas de précision sur les temporalités ou la durée de la renaturation. À partir de quel seuil ou résultat écologique peut-on estimer qu'une renaturation est effective ? La restauration écologique signifie le retour d'un système à son état d'origine alors que la réhabilitation écologique est plus largement définie par toute action visant à améliorer l'état dégradé de l'écosystème (BenDor et al., 2015).

À ce jour, outre ces questions encore non résolues, la filière de la renaturation n'est pas mature bien que de nombreux acteurs œuvrent déjà à restaurer la nature. Les coûts de ces opérations restent un sujet méconnu ; or, dans une perspective ZAN, cette information est cruciale pour les acteurs de l'aménagement du territoire qui ont besoin de comparer le coût de l'artificialisation (et celui associé de la renaturation) au coût des mesures de sobriété foncière (densification) pour prendre une décision optimale sur le plan économique. France Stratégie, dans le [rapport Objectif « Zéro artificialisation nette »: quels leviers pour protéger les sols ?](#) (2019) distingue quatre étapes qui composent un processus de renaturation et chiffre chaque étape mais la méthodologie de ces estimations n'est pas précisée.

Tableau 1 – Éléments de chiffrage des coûts de renaturation

Étape du processus	Coût moyen
Déconstruction	65 €/m ² dont 35 €/m ² de coûts de démolition et 30 €/m ² de traitement des déchets*
Dépollution	2 à 65 €/m ² pour les processus de phytoremédiation
Désimperméabilisation	60 à 270 €/m ²
Construction de technosols	33 à 55 €/m ² **

* Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi (2010), *Guide relatif à la prise en compte du coût global dans les marchés publics de maîtrise d'œuvre et de travaux*, mai.

** Il faut 3,34 à 3,42 tonnes d'anthroposol pour construire un mètre carré de sol. À partir des coûts pour une tonne d'anthroposol, nous estimons ensuite les coûts par unité de surface. Nous estimons un coût de 33 à 57 €/m² en fonction de la ville considérée et de l'hypothèse retenue.

Source : France Stratégie

Mon stage a donc pour objectif de compléter les informations données par France Stratégie en segmentant de façon plus détaillée un processus de renaturation en différentes étapes et

sous-étapes (qui sont des techniques de renaturation) pour estimer le coût de chaque sous-étape.

Ne nous y trompons pas : désartificialiser un espace pour recréer un sol ne pourra jamais remplacer un sol naturel qui s'est construit sur un millénaire et dont la structure a été créée par la vie. Comme le dit le microbiologiste Marc-André Selosse, « le sol est un patrimoine : on ne peut qu'en hériter ; [...] à l'échelle des surfaces nécessaires à nourrir l'humanité, on ne peut le construire. »¹⁴ Ainsi, s'il est primordial de réintégrer la nature en ville pour les nombreuses fonctions écologiques et la protection de la biodiversité, la capacité à restaurer un sol ne saurait justifier l'artificialisation.

2. Méthodologie

2.1 Enquête exploratoire

Entretiens

La phase exploratoire entamée par Mathilde Salin et Charles Claron a duré entre avril et mi-juin 2023 ; l'objectif était de défricher le sujet avec les professionnels pour caractériser les grandes étapes associées à un processus de désartificialisation et identifier les acteurs et réseaux qui pourront, dans un second temps, nous apporter des informations plus précises. Les personnes interrogées à ce stade sont les suivantes :

ID	Prénom Nom	🔧 Fonction - Organisme	📅 Date	🎤 Modalité	🕒 Durée (min)
	Patrice Valantin	Président - UPGE	7 avr. 2023	Visio	70
	Guillaume Lemoine	Écologue - ECT Hauts-de-France	18 avr. 2023	Visio	105
	Xavier Marié	Directeur - Sol Paysage	26 avr. 2023	Visio	70
	Charlotte Martinez	Chargée de missions - Indura	2 mai 2023	Visio	63
	Sylvain Moulherat	Directeur - A-IGÉco	3 mai 2023	Présentiel	60
	Sébastien Gallet	Président - REVER	5 mai 2023	Téléphone	30
	Claire Vieillard, Robin Dagois	Doctorante, Chargé de missions - Plante & Cité	9 mai 2023	Visio	88
	Cécile Grand	Spécialiste SSP - ADEME	10 mai 2023	Visio	115

¹⁴ [Intervention du 9 mai 2023](#) au Forum de la Transition Foncière

ID	Prénom Nom	Fonction - Organisme	Date	Modalité	Durée (min)
	Marc Barra	Écologue - ARB	16 mai 2023	Visio	52
	Patricia Gentil	Ingénieure proto aménagement - EPFL Dauphiné	23 mai 2023	Téléphone	30

Ces entretiens semi-directifs se sont déroulés avec des personnalités scientifiques ou techniques qualifiées et des têtes de réseau : Union Professionnelle du Génie Écologique (UPGE), Réseau d'Échanges et de Valorisation en Écologie de la Restauration (REVER), Association fédérative des acteurs de l'Ingénierie et du Génie Écologiques (A-IGÉco).

Collecte de données par documents

Pour compléter les informations obtenues, nous avons effectué une revue de littérature grise. Dans ces rapports, nous avons cherché les occurrences « € » ou « coût ». En plus des informations quantitatives, ces rapports et notamment celui de l'Agence régionale de la biodiversité d'Île-de-France et de la CDC Biodiversité nous ont permis de d'ébaucher les étapes d'un processus de désartificialisation.

Titre	Année
Deboeuf De Los Rios, G., Barra, M., Grandin., G. 2022. Renaturer les villes. Méthode, exemples et préconisations. ARB îdF, L'Institut Paris Region.	2022
CDC BIODIVERSITÉ & OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ. 2022. Renaturer les sols, des solutions pour les territoires. Castaing J., Monod K., Norève V. Dossier de la MEB N°42, 60p.	2022
CEREMA. 2021. Retours d'expérience et outils mobilisables pour la renaturation des espaces. 40p.	2021
Limasset E., Merly C., Bâlon P., Desrousseaux M., Quadu F., Hucq A., Born C.H., Malherbe A., Baptist F. 2021. Projet SOILval - Quelle prise en compte de la valeur des sols dans la planification et l'aménagement du territoire en France et en Wallonie ? Pour une meilleure reconnaissance de la qualité des sols en contexte de mise en oeuvre des objectifs européens de zéro artificialisation nette. 111p.	2021
Taugourdeau O., Hellal J., Montfort D., Limasset E., Chauvin C. 2020. Enjeux de la reconversion d'une friche et comment évaluer la réhabilitation écologique d'un sol dégradé, Synthèse projet BioTUBES. 39p.	2020
Agence Eau RMC, DREAL AuRA, CEREMA, 2017. Vers la ville perméable, comment désimperméabiliser les sols ? 64p.	2017

Titre	Année
ADEME, 2015. Procédé de construction de Sols à partir de matériaux Innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière - Rapport final. 408p.	2015

De plus, nous avons collecté les coûts obtenus *via* des documents de type devis ou factures que certains professionnels nous ont envoyés, ou bien récupérés sur les sites internet tels que ceux des EPF par exemple.

Événements

Nous avons également assisté à plusieurs événements. Le 9 mai dernier à l'Académie du Climat s'est tenu le lancement de l'Institut de la Transition Foncière. Participer à cette journée nous a permis de cerner une partie des acteurs qui travaillent à la renaturation d'espaces artificialisés (paysagistes, élus locaux, architectes, chercheurs) et récupérer des contacts pour mener des entretiens ultérieurs. Par ailleurs, le 21 juin dernier, nous avons assisté à la journée de l'agriculture urbaine, toujours à l'Académie du Climat, où nous avons discuté avec des professionnels de la dépollution et un chercheur du BRGM. Cet événement nous a permis de nouer des contacts en vue d'entretiens fondés sur un questionnaire. D'autre part, nous avons eu la chance d'effectuer une visite de terrain à Aubervilliers, où deux projets de renaturation ont fleuri : la forêt urbaine, qui a nécessité un travail autour de la construction de sol et la revégétalisation, et le Jardin des Joyeux¹⁵ où une réflexion s'est mise en place autour d'un paysage alpin créé à partir de morceaux d'enrobé concassé. Nous avons enfin assisté à un webinaire proposé par l'ADEME à l'occasion de la sortie de l'outil Bénéfriches, qui permet aux collectivités souhaitant réhabiliter une friche industrielle d'être informées sur les actions à mettre en place. Suite à cette présentation, nous avons discuté avec le Coordinateur friches de l'ADEME pour réfléchir au partenariat possible selon les données dont dispose l'ADEME.

Les informations recueillies à ce stade ont permis de structurer la trame des étapes et sous-étapes d'un processus de désartificialisation. En effet, au vu des discussions et de la lecture du [rapport de France Stratégie](#) (cité plus haut), il est apparu qu'une opération de renaturation est constituée de plusieurs grandes catégories (ou étapes) qui se déclinent en différentes techniques (ou sous-étapes). Comme notre objectif était de déterminer une fourchette de coûts de chaque sous-étape et le coût global de chaque grande étape, une fois celles-ci déterminées, la phase exploratoire nous a permis de cerner ces différentes techniques et les acteurs qui les mettent en œuvre.

2.2 Collecte de données

En vue de constituer une base de données, nous avons créé un questionnaire¹⁶ qui regroupe les étapes et sous-étapes d'un processus de désartificialisation. Suite à la phase exploratoire, le questionnaire a été administré à l'oral auprès des professionnels du secteur afin de récolter des informations qualitatives permettant d'expliquer la variabilité des coûts associés aux sous-étapes. Le choix de segmenter une opération de désartificialisation en

¹⁵ voir Annexes, p.27

¹⁶ *Ibid.*

plusieurs étapes et sous-étapes permet de retrouver des itinéraires techniques pertinents selon l'état initial d'un site et l'état escompté.

La base de données constituée à partir des réponses à ce questionnaire suit les mêmes items : Études préalables, déconstruction ou démolition, dépollution et/ou mesures constructives, désimperméabilisation, réhabilitation des sols, végétalisation ou aménagement paysager, gestion et suivi, opérations transversales.

Entre mi-juin et fin juillet 2023, 160 personnes différentes ont été contactées et 29 entretiens ont pu être effectués, dont 23 à partir du questionnaire et 6 pour définir nos attentes et les contributions possibles avec les organismes contactés. Les premiers entretiens menés ont surtout été utiles pour les aspects qualitatifs : nous avons modulé la trame des étapes selon les remarques des professionnels interrogés. Une fois notre questionnaire éprouvé et nos étapes en concordance avec les dires des professionnels, les entretiens ont eu pour objectif de récolter un maximum de données chiffrées relatives aux sous-étapes. Toutefois ces échanges n'ont pas toujours abouti sur des éléments de coûts car certains acteurs ont pu discuter de la structuration des étapes mais n'ont pas été dans la capacité de nous donner des informations quantitatives.

Tableau 1 - Bilan des sollicitations, contributions et entretiens réalisés

	Nombre	Taux de succès
Personnes contactées	160	100,00%
Personnes ayant répondu	81	50,63%
Personnes ayant effectivement contribué*	49	30,63%
Appels	29	18,13%
Dont entretiens	23	14,38%

**Dans le contexte de cette étude nous appelons « contributions » des partages de contacts, de documents ou des entretiens.*

Le tableau suivant présente le type d'acteurs contactés. La majorité des entretiens ont été effectués avec des entreprises, et notamment des bureaux d'études spécialisés dans le conseil autour des sols¹⁷.

¹⁷ voir Annexes, p.34

Tableau 2 - Nombre d'appels par type d'organisme

	Nombre	Fréquence
Entreprise	17	58,62%
Etablissement public	8	27,59%
Collectivité territoriale	2	6,90%
Organisme de recherche	1	3,45%
Association	1	3,45%
Total	29	100,00%

Le tableau 3 présente la fréquence à laquelle nous avons abordé chaque étape parmi la totalité des entretiens. Sur les 23 appels, nous avons en grande majorité abordé les études préalables, avec 15 entretiens qui les mentionnaient. C'est révélateur du milieu de la désartificialisation des sols : c'est souvent un laboratoire de recherche qui propose un projet de renaturation pour effectuer des expérimentations et cela nécessite des études préalables importantes. De plus, la filière n'est pas encore structurée et les opérations de renaturation telles que nous l'entendons se font à la marge ; dans la plupart des cas, la réhabilitation d'une friche industrielle entraîne une valorisation foncière par la reconstruction. Cela explique que de nombreux acteurs sont spécialisés dans la dépollution et ont pu nous renseigner, toutefois cette étape est particulièrement dépendante du site en question donc il est difficile d'estimer les coûts ; nous y reviendrons dans la partie 3.2. La réhabilitation des sols est visiblement un milieu en plein essor car le monde de la recherche s'en empare (Laboratoire Sol & Environnement, BRGM) et de nombreux sites pilotes co-financés par l'ADEME permettent de faire progresser les connaissances dans ce domaine. Cependant, ces expérimentations concernent des petits sites et les coûts ne sont donc pas représentatifs de ce qu'ils seraient si une véritable filière de la renaturation était structurée.

Une difficulté a été de dialoguer avec les acteurs du génie écologique. Ceux que nous avons interrogés interviennent plutôt en milieu naturel, ou bien en ville dans le cadre de renaturation de cours d'eau, or notre cible était prioritairement les sols artificialisés. Ainsi, pour parvenir à obtenir des informations relatives à la végétalisation ou l'aménagement paysager et à la gestion et le suivi, nous avons pu discuter avec un paysagiste et d'autres acteurs de bureaux d'études qui effectuent notamment la gestion.

Tableau 3 - Nombre d'entretiens par étape de la désartificialisation

	Nombre*	Fréquence
Etudes préalables	15	65,22%
Maîtrise foncière	2	8,70%
Déconstruction ou démolition	3	13,04%
Désimperméabilisation	8	34,78%
Dépollution et/ou mesures constructives	9	39,13%
Réhabilitation des sols	12	52,17%

Végétalisation ou aménagement paysager	6	26,09%
Gestion et suivi	3	13,04%
Opérations transversales	8	34,78%
Total	66	

**Le nombre affiché est supérieur au nombre d'entretiens réalisés car les personnes interrogées ont généralement des connaissances dans plusieurs étapes*

2.3 Constitution et alimentation des bases de données

Lors de la phase d'enquête exploratoire, les informations chiffrées récupérées ont été intégrées dans un document qui regroupe trois bases de données. La première est constituée des dires d'experts, à savoir des coûts donnés lors d'entretiens exploratoires ou des coûts provenant de sources telles que l'ADEME, SelecDEPOL et France Stratégie. La seconde base de données contient les coûts globaux des études de cas issues de documents envoyés par des professionnels ou provenant d'organismes tels que les Agences de l'Eau, la CDC Biodiversité, le CEREMA et les EPF. La troisième base est composée des coûts précis (d'une étape particulière) des études de cas obtenues des professionnels. L'enjeu est la normalisation des termes autour de la renaturation. En effet, il n'existe pas de typologie standardisée, donc le vocabulaire peut changer d'un acteur à l'autre ; le parti pris a été de conserver les termes employés par les acteurs car à ce moment, nous ne disposons pas suffisamment d'éléments pour trancher sur les catégories d'un processus de renaturation et modifier les termes donnés par les acteurs.

Le questionnaire nous a permis de standardiser les étapes et sous-étapes d'un processus de renaturation. Ainsi suite aux entretiens fondés sur ce questionnaire, une autre base de données a été constituée, exclusivement complétée par les informations recueillies lors de cette phase.

3. Résultats

3.1 Structuration d'un processus de désartificialisation

Au gré des discussions, nous avons modifié la structuration d'un processus de désartificialisation d'un sol pour en retenir la trame ci-dessous¹⁸. Chaque étape est définie plus loin.

1. Études préalables

- Études agro-pédologiques (peut inclure analyses physico-chimiques, biologiques, agronomiques)
- Inventaire faune, flore et habitats
- Recherches historiques
- Diagnostic pollution des sols (peut inclure étude hydrogéologique)
- Évaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS)
- Test de perméabilité

¹⁸ Voir la carte mentale dans Annexes, p.27

- Etude de gestion des eaux pluviales
 - Diagnostic amiante
 - Diagnostic Produits Équipements Matériaux et Déchets (PEMD)
 - Plan de Conception des Travaux (PCT)
 - Plan de gestion pollution
 - Plan de gestion écologique
2. Déconstruction ou démolition
- Curage du bâtiment
 - Déconstruction sélective (pour réemploi)
 - Désamiantage
 - Déplombage
 - Ecrêtage
 - Démolition (abattage)
 - Démantèlement (industriel)
3. Désimperméabilisation
- Découpage (scie diamant)
 - Décroulage (mini-pelle/BRH)
4. Dépollution et/ou mesures constructives
- > Dépollution des nappes phréatiques
- Pompage et traitement (hydrocarbures lourds et légers, métaux)
 - Sparging (hydrocarbures)
- > Dépollution des sols :
- Excavation des sols pollués (hydrocarbures lourds et légers, métaux)
 - Venting/bioventing (polluants volatils)
 - Oxydation/réduction chimique in situ (hydrocarbures lourds et légers, métaux)
 - Désorption thermique (hydrocarbures lourds et légers, métaux)
 - Lavage (hydrocarbures lourds et légers, métaux)
 - Biodégradation in situ (hydrocarbures)
 - Biopile (hydrocarbures)
 - Phytoextraction (métaux)
 - Myco-phytodégradation (hydrocarbures)
- > Mesures constructives :
- Phytostabilisation (métaux)
 - Étanchéification - confinement (hydrocarbures lourds et légers, métaux)
5. Réhabilitation des sols
- Griffage (décompaction en surface)
 - Sous-solage (décompaction en profondeur)
 - Construction de sol (apport de déchets ou sous-produits)
 - Apport de compost
 - Bioaugmentation/biostimulation
6. Végétalisation ou aménagement paysager

- Enherbement
- Plantation de végétation herbacée
- Plantation de ligneux
- Paillage
- Suppression de ligneux
- Création de plan d'eau

7. Gestion et suivi

- Suivi de la pollution
- Surveillance des accès et des usages (mise en défens par exemple)
- Gestion des espèces exotiques envahissantes (animales et végétales)
- Irrigation
- Entretien de la végétation ligneuse (taille, coupe, recépage)
- Entretien de la végétation herbacée (désherbage,....)
- Valorisation des déchets verts (broyage,...)
- Evacuation des déchets verts
- Entretien des cycles du sol
- Suivi écologique

8. Opérations transversales

- Évacuation des déchets (Pour des déchets inertes, non dangereux ou dangereux)
- Stockage de déchets inertes
- Stockage de déchets non-dangereux
- Stockage (confinement) de déchets dangereux
- Concassage des déchets inertes
- Élimination des déchets (dangereux)
- Apport de terre végétale
- Compactage

Pour les étapes identifiées, voici les définitions qui ont été présentées aux professionnels lors des entretiens :

- **Études préalables** : Toute opération effectuée en amont de la mise en œuvre du projet de renaturation. Cela inclut les diagnostics et le plan de gestion.
- **Déconstruction** : Étape qui comprend une phase de destruction et une phase d'évacuation des matériaux. Elle concerne les bâtiments, infrastructures bétonnées, chenaux et endiguements. Elle se différencie de la démolition « par la volonté explicite de ne pas générer de déchets en quantité importante » (CDC Biodiversité, 2022). Nous envisageons une opposition entre la méthode « déconstruction » et la méthode « démolition ».
- **Désimperméabilisation** : Suppression du revêtement imperméable situé sur tout type de surface afin de rétablir le fonctionnement hydraulique du site. (CDC Biodiversité, 2022). Nous l'utilisons comme synonyme de « descellement » et « déminéralisation ». Cette étape est dissociée de la gestion des déchets générés

par l'opération. Les activités de gestion des déchets sont regroupées dans l'étape « opérations transversales ».

- **Dépollution** : Élimination de tout ou partie des polluants d'un milieu. Le degré de dépollution est fonction de l'usage ultérieur du site (CDC Biodiversité, 2022). Nous nous concentrons ici sur la dépollution des sols et des eaux (nappes phréatiques). Par ailleurs, les mesures constructives ne visent pas à supprimer la pollution, mais à la contrôler. Nous admettons qu'il est possible de recourir à ces deux types de méthodes dans un même projet, en fonction des objectifs ciblés (SelecDEPOL). Les sous-étapes sont dissociées de la gestion des déchets qu'elles peuvent générer. Les activités de gestion des déchets sont regroupées dans les « opérations transversales ».
- **Réhabilitation des sols** : Toute opération visant à améliorer l'état et les fonctions des sols après désimperméabilisation et éventuellement dépollution. Les sous-étapes sont dissociées de la gestion des déchets qu'elles peuvent générer. Les activités de gestion des déchets sont regroupées dans les « opérations transversales ».
- Nous distinguons deux manières de réinvestir des sols réhabilités. La **végétalisation** dans le cadre du génie écologique se définit comme « la conception d'aménagements durables, adaptatifs, multifonctionnels, inspirés de, ou basés sur, les mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques » (Abbadie et al, 2015). Nous ajoutons à la végétalisation l'**aménagement paysager**, qui peut accorder autant ou plus d'importance à l'esthétique qu'à la fonctionnalité écologique.
- Par **gestion et suivi**, nous entendons l'ensemble des opérations qui peuvent être nécessaires pour assurer le bon fonctionnement écologique des milieux renaturés. Cela passe notamment par le maintien des habitats existants (ARB ÎdF, 2022). « Gestion » est ici utilisé comme synonyme de « maintenance ».
- **Opérations transversales** : Cette catégorie regroupe des opérations qui peuvent se retrouver à plusieurs étapes d'un projet de désartificialisation des sols. Elles ne constituent pas une étape à proprement parler, mais un ensemble de points de passage éventuels.

3.2 La filière de la renaturation des sols en France

Évolution de la typologie au cours de nos recherches

La structuration initiale des étapes et sous-étapes que nous avons identifiées a évolué au fil des entretiens. En particulier, nous avons modifié l'étape concernant la « végétalisation ou l'aménagement paysager » qui était source de discussion avec certains professionnels. En effet, nous avons d'abord nommé cette étape « restauration écologique ou aménagement paysager » car nous avons inclus la réintroduction d'espèces animales, mais après discussion avec un écologue, cette pratique n'est pas courante. Nous avons donc centré cette étape sur la végétalisation qui comprend des pratiques d'ingénierie écologique.

Par ailleurs, d'autres étapes ont été complétées et modifiées après discussion avec des professionnels, notamment la partie « déconstruction » dont un échange avec une professionnelle de Demcy-Eiffage qui nous a éclairés, et la partie « réhabilitation des sols » amendée après discussion avec deux chercheurs, l'un au BRGM et l'autre au Laboratoire Sols & Environnement. D'autre part, la dépollution a été objet de débats auprès des personnes interrogées. En effet, certains ont pointé le fait que les techniques de gestion de la pollution que nous mentionnons ne sont pas des mesures constructives. Cependant, nous avons fait le choix de laisser ce terme en nous appuyant sur l'outil [SelecDEPOL](#) qui recense les techniques que nous avons relevées sous le nom de mesures constructives. Toujours sur la partie dépollution, nous avons réfléchi à intégrer la dépollution des eaux, en s'interrogeant sur le lien avec notre sujet. Les sols étant liés à l'eau, nous avons décidé de conserver la dépollution des eaux car il est possible que les professionnels aient recours à la dépollution des eaux lors d'une opération de renaturation.

Une étape importante que nous avons au départ intégrée mais que nous avons finalement laissée de côté est la maîtrise foncière, car elle est très spécifique à la localisation. Les Établissements Publics Fonciers (EPF) nous ont apporté des éléments de réponse mais le coût d'un terrain est tellement dépendant de sa localisation et de son statut décidé par le Plan Local d'Urbanisme (PLU) qu'il est impossible d'estimer une fourchette de coûts homogène pour le territoire français.

Nous avons choisi d'inclure dans un processus de désartificialisation l'étape nommée « opérations transversales », qui regroupe des opérations communes à plusieurs étapes (déconstruction, désimperméabilisation, dépollution, réhabilitation des sols) telles que la gestion des déchets, l'apport de terre végétale et le compactage. Cette manipulation permet d'éviter les éventuelles redites dans les estimations de coût et permet de capturer le coût précis de chaque sous-étape.

Dans la partie suivante, les coûts de chaque étape et sous-étape que nous avons obtenus seront présentés avec les facteurs de variabilité et les limites à ces estimations.

Description détaillée et coût de chaque étape

Concernant la première étape, tous les professionnels s'accordent sur le fait que des **études préalables** bien faites et où les moyens sont mis peuvent empêcher d'importants surcoûts dus à une mauvaise compréhension du terrain et à l'obligation de refaire des études. Pour toutes les études, le coût dépend notamment de la tarification d'une journée ingénieur ou technicien. Pour la plupart des estimations, nous avons obtenu entre 650 et 800€ par jour pour un ingénieur et entre 550 et 600€ par jour pour un technicien. Ces coûts fixes représentent la majeure partie du coût des études préalables car quel que soit le site, les techniciens et ingénieurs effectuent *a minima* une visite terrain et produisent un rapport avec interprétations d'analyses et conseils.

De plus, une façon de diminuer les coûts des études serait de coupler les études agro-pédologiques avec le diagnostic pollution. En effet, les études agro-pédologiques nécessitent l'ouverture d'une fosse à la mini-pelle et un diagnostic pollution demande à effectuer un sondage du sol puis une analyse en laboratoire. Prises séparément, ces études coûtent respectivement de 5000 à 15000€ pour les études agro-pédologiques et 4000 à

20000€ pour le diagnostic pollution. Pour ce qui est des études agro-pédologiques, les facteurs pouvant déterminer le coût à la hausse sont : la mise en oeuvre d'un diagnostic biologique, l'hétérogénéité des usages passés qui implique autant d'échantillons de sols et la tarification des analyses en laboratoire qui varie entre 60 et 200€ l'unité selon la réputation du laboratoire. Hormis ces éléments, le coût des études préalables se compose majoritairement de coûts fixes dus aux ingénieurs pédologues (700 à 800€ par jour) et techniciens pédologues (550 à 600€ par jour) qui se rendent sur le site pour prélever les échantillons et les analysent ensuite. Concernant le diagnostic pollution des sols, une simple levée de doute est peu onéreuse alors qu'un diagnostic complet avec là encore une hétérogénéité des usages passés complexifie le travail du bureau d'études et augmente le coût de l'étude. Si le site est étiqueté installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) ou s'il s'avère que le sol présente des polluants en quantité supérieure à la normale, alors la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués doit être appliquée. Les sous-étapes qui ont trait à la pollution que nous avons identifiées sont le diagnostic pollution des sols, l'étude quantitative des risques sanitaires (EQRS), le plan de gestion pollution et le plan de conception des travaux (PCT). Par ailleurs, les études de gestion des eaux pluviales constituent une sous-étape nécessaire dans les études préalables car elles déterminent en partie le projet. Mettre de côté cette réflexion autour de la gestion de l'eau peut amener à des dégâts suite à des pluies intenses qui ne permettent pas à l'eau de s'infiltrer. Un test de perméabilité coûte entre 400 et 500€ l'unité pour un test Porchet et entre 500 et 700€ l'unité pour un test Matsuo. Le principe de ces tests est de creuser un trou dans le sol puis y verser de l'eau jusqu'à saturation pour vérifier quel taux s'infiltrer effectivement. Le test Matsuo implique de creuser une fosse donc requiert plus de matériel, d'où le coût plus élevé que le test Porchet. Suite à ces tests, une étude de gestion des eaux pluviales est réalisée et coûte entre 3000 et 20000€ l'unité selon le nombre de professionnels mobilisés. Ces coûts ont été obtenus auprès d'un bureau d'études spécialisé en hydrologie urbaine donc ils peuvent être considérés comme représentatifs du secteur.

Comme indiqué dans la partie 2.2, les études préalables ont été mentionnées par la plupart des acteurs interrogés, et les estimations obtenues convergent souvent donc elles peuvent être considérées comme fiables. Cette étape est cruciale car elle permet de définir et dimensionner le projet de renaturation.

Selon l'état du site, il peut falloir recourir à la **déconstruction**. Pour un site dont la surface est entre 5000m² et 1 hectare - qui implique donc des économies d'échelle importantes - concernant les sous-étapes que nous avons identifiées, le curage coûte entre 10 et 15€/m², l'écrêtage qui nécessite un dispositif important et qui présente donc un coût fixe important varie entre 120 et 180€/m² et contient le coût du tri des déchets de chantier. La démolition finale est comprise entre 27 et 35€/m² ; c'est le tri des déchets qui fait varier les coûts à la hausse. Les coûts de la démolition sont en grande partie constitués par la mobilisation du personnel et la location du matériel (pelle). Dans le cas particulier d'un site industriel, le démantèlement est nécessaire mais les coûts sont tellement contextuels qu'il n'est pas possible de donner une estimation globale.

Si le bâtiment contient de l'amiante, le coût peut s'avérer extrêmement élevé et dépend fortement du contexte et des règles de sécurité à appliquer. Selon la difficulté d'accès au site, la mitoyenneté éventuelle du bâtiment à démolir et des règles des Architectes des Bâtiments de France, le coût de la déconstruction peut être plus élevé.

Concernant les estimations obtenues pour la déconstruction, elles sont fiables car elles s'appuient sur un document interne à l'entreprise qui nous a renseignés. Cependant, nous n'avons pu obtenir qu'une source principale et de plus, ces estimations sont valables pour des gros chantiers (généralement entre 5000 et 10000m²). Nous avons donc une idée des coûts de déconstruction avec des économies d'échelle, mais pas sans économies d'échelle sur un site petit ou de taille moyenne.

La définition de la désartificialisation implique le passage d'un sol artificiel à un sol naturel. Ainsi, la **désimperméabilisation** des sols est un point de passage obligatoire des opérations de désartificialisation. L'opération la plus courante est le décroulage. D'après nos estimations actuelles, son coût se situe entre 20 et 100€/m² (opérations transversales comprises). Nous possédons pour le décroulage un nombre satisfaisant d'estimations (une quinzaine). Une autre technique employée moins fréquemment est le découpage, qui coûte entre 4 et 10€ le mètre linéaire (ml) ; le découpage concerne dans la plupart des cas les bordures. Décroulage et découpage peuvent donc se compléter.

La forte variabilité des coûts de désimperméabilisation est principalement imputable aux différents types de revêtement, en lien avec leur épaisseur et leur dureté. En particulier, il est plus coûteux de retirer du béton que de l'enrobé (bitume) car la couche à retirer est à la fois plus dure et plus profonde. Par ailleurs, en présence d'amiante dans le revêtement, les coûts augmentent du fait des mesures de sécurité à mettre en place. En outre, si l'on désimperméabilise pour réutiliser les matériaux - comme il est possible de le faire pour des pavés -, alors il faudra aller vers des méthodes plus légères (comme de l'arrachage) qui impliquent d'être plus méticuleux et sont donc plus coûteuses. La réutilisation de matériaux implique cependant des coûts évités qui sont à prendre en compte dans un calcul coûts-bénéfices - ce qui dépasse notre démarche.

La manière la plus pertinente de segmenter les coûts de désimperméabilisation semble être d'établir des fourchettes par typologie de revêtement (puisqu'il s'agit du principal facteur de variabilité). Si les données actuelles fournissent une première appréhension des fourchettes par type de revêtement, les estimations ne sont pas aujourd'hui en nombre suffisant pour que l'on puisse donner des estimations fiables pour chaque type de revêtement. À noter que nous n'avons pas encore pu identifier le poids de la présence d'amiante dans la variabilité des coûts de désimperméabilisation. Les coûts ont été donnés dans le cas de sites non amiantés.

La **dépollution** constitue une étape clé et très dépendante du contexte. La pratique la plus courante est l'excavation des sols pollués, qui n'est pas de la dépollution en tant que telle mais du retrait de la pollution du site. Toutefois, comme les installations de stockage des déchets tendent à augmenter la taxe de mise en décharge, l'excavation devient de moins en moins compétitive et les professionnels se tournent vers d'autres pratiques de dépollution telles que le venting¹⁹, la biodégradation *in situ*²⁰, la désorption thermique²¹ et à la marge, la myco-phytoremédiation²². Au-delà des questions économiques, l'excavation et la mise en

¹⁹ Voir Glossaire

²⁰ *Ibid.*

²¹ *Ibid.*

²² *Ibid.*

décharge des sols pollués ne peuvent être des pratiques viables à terme car les installations de stockages sont de plus en plus saturées de déchets et par ailleurs, excaver les sols implique souvent d'importer ensuite de la terre végétale, sol qui provient de l'artificialisation d'espaces agricoles. Dans la perspective de la sobriété foncière, la renaturation doit pouvoir se passer de terre dont l'origine est l'artificialisation.

Concernant les autres techniques de dépollution, elles sont dépendantes du type de polluant dans le sol. En effet, si les polluants sont multiples (hydrocarbures lourds et légers, métaux lourds...), la méthode la plus simple reste l'excavation - qui ne fait que déplacer le problème -. Cependant, si le site ne contient que des polluants organiques volatils, il est possible de recourir au venting qui permet d'extraire la pollution *in situ* en déprimant la zone insaturée²³. Cette méthode entraîne des infrastructures conséquentes qui génèrent des coûts fixes importants ; un acteur du secteur de la dépollution a estimé le coût minimum à 100 000€. D'autres techniques fondées sur la nature permettent de retirer les polluants organiques de type HAP (hydrocarbure aromatique polycyclique), comme la biodégradation *in situ*, dont le coût est estimé entre 20 et 30€/t de sol pollué. Cette pratique vise à introduire des bactéries qui dégradent la pollution organique. La myco-phytodégradation, pratique encore très à la marge mais qui paraît être intéressante pour certains acteurs du secteur et collectivités car plus vertueuse que l'excavation, consiste à détruire la pollution *via* les champignons présents sur les racines de certaines plantes. La mise en place simple est estimée à 2.5€/m² par un acteur du secteur. De la même façon, la phytoextraction consiste à retirer les polluants métalliques du sol grâce aux plantes qui font migrer la pollution des racines vers les parties aériennes. La mise en place varie entre 5 et 10€/m². Cependant, ces techniques génèrent d'autres coûts car les études préalables sont cruciales, notamment les études agro-pédologiques permettant de déterminer si les plantes pourront pousser. Cela implique de sanctuariser le site en cours de traitement sur un temps long pour que les plantes aient le temps de pousser et il est par ailleurs nécessaire que le taux de pollution ne soit pas trop élevé au-dessus du seuil sinon les plantes pourraient mourir et la dépollution serait inefficace.

Dans l'étape dépollution, nous avons inclus la dépollution des nappes phréatiques car dans le cadre d'une opération de renaturation, il peut être nécessaire de dépolluer aussi les eaux. Cependant, nous ne disposons pas de coûts pour les techniques que nous avons retenues, à savoir le pompage et traitement (équivalent de l'excavation pour les eaux) et le sparging (équivalent du venting pour les eaux).

Selon les estimations de l'ADEME, toutes méthodes confondues, le coût de la dépollution s'élève à 45€/m². Cependant cette estimation ne renseigne pas sur l'état du site initial, le niveau de dépollution à atteindre et les opérations incluses donc cette estimation n'est pas suffisante pour déterminer le coût de la dépollution.

Une fois que le sol est découvert par la désimpermeabilisation et qu'il est sain suite à la dépollution, il faut le fonctionnaliser de nouveau. La **réhabilitation des sols** inclut deux volets complémentaires : la remise en place de sols et leur refunctionalisation. Pour la remise en place de sols, deux méthodes sont concurrentes. La première méthode est l'apport de terre végétale. C'est la plus classique et, de très loin, la plus courante. Elle est en

²³ Voir <https://selecdepoll.fr/fiche-technique/ventilation-de-la-zone-non-saturee-venting>

revanche très critiquée par de nombreux acteurs car peu vertueuse : apporter de la terre végétale, c'est la prendre ailleurs, sur des espaces en construction anciennement agricoles. A rebours des logiques d'économie circulaire et de ZAN, ce processus est rendu possible par l'artificialisation des sols et y participe. Son coût est estimé entre 15 et 80€/m³ (de terre), incluant fourniture, transport et mise en place. La fourchette basse semble cependant relativement faible par rapport aux estimations associées au coût de la fourniture seule de terre végétale. La fourchette haute, quant à elle, correspond à l'apport d'une terre amendée (c'est-à-dire enrichie en compost), ce qui fait mécaniquement augmenter le coût. Cette fourchette pourra donc probablement être resserrée. Du fait de la dynamique du ZAN et de l'impopularité croissante de l'artificialisation des sols, la terre végétale pourrait être de moins en moins disponible, donc de plus en plus coûteuse et éloignée des sites. La disponibilité est d'ailleurs le principal facteur de variabilité des coûts, puisqu'elle joue à la fois sur le coût de la terre en elle-même, et de son acheminement jusqu'au site (via la distance par rapport aux plateformes).

La seconde méthode, plus récente et encore expérimentale, se veut plus vertueuse : il s'agit de la construction de sols. L'idée est ici d'utiliser des déchets ou sous-produits, si possible déjà présents sur site, pour créer des mélanges de matières qui doivent à terme donner des résultats tout aussi satisfaisants en termes de propriétés. Nous n'avons pas encore de coût total pour cette opération, mais avons identifié certains coûts liés à la fourniture, au transport et à la mise en place de sols. Les agréger, en prenant en compte le fait que seule une partie des matériaux sera achetée et importée (voire aucun matériau dans l'idéal), permettra d'obtenir un coût total.

Peu importe la méthode utilisée, les acteurs doivent choisir quelle profondeur ils souhaitent réhabiliter, en lien avec les objectifs de végétalisation ensuite. De manière générale, il faut réhabiliter plus en profondeur si l'on souhaite planter des ligneux (jusqu'à 1 m). En revanche, une couche de 30 cm peut suffire si l'on veut faire une prairie. Cela fait varier le coût au m² : il faudra apporter deux fois plus de matière si l'on veut réhabiliter à 80cm de profondeur plutôt qu'à 40 cm par exemple. La refonctionnalisation des sols regroupe les autres opérations incluses dans cette étape. Le décompactage vise à aérer les sols, il est à priori très peu coûteux (moins d'1€/m²) sauf éventuellement sur un petit site où des méthodes légères doivent être envisagées. L'apport de compost est une pratique très courante de refonctionnalisation, visant à augmenter le taux de matière organique dans les sols. Sa fourniture coûte entre 6 et 30€/t, selon la disponibilité (dans une logique d'offre-demande). Nous n'avons pas encore pu identifier de logique de distribution géographique des coûts du compost. La bioaugmentation/biostimulation est une méthode plus rare et spécifique de refonctionnalisation des sols. Du fait de cette rareté, nous avons pour l'instant seulement deux estimations, établissant une fourchette entre 10 et 16€/m².

Estimer le coût de la construction de sols est une tâche délicate et importante. Importante car cette pratique est amenée à se développer, et une estimation fiable de ses coûts et de sa structuration représenterait une réelle aide à la décision (notamment dans un arbitrage entre apport de terre végétale et construction des sols). Délicate car la structuration de cette sous-étape est variable en fonction des matériaux présents sur site : construire des sols pourrait tout autant impliquer d'aller acheter des matériaux qu'il faut acheminer, d'aller simplement chercher des matériaux donnés (étant jugés comme des déchets), ou de

réutiliser intégralement des déchets déjà présents sur site. Ces différents cas-types sont associés à des coûts très hétérogènes.

La partie **végétalisation ou aménagement paysager** possède plusieurs faces. Si c'est un écologue qui a en charge cette partie, il mettra en place des techniques de génie écologique ; si c'est un paysagiste, il apportera de la végétation avec une réflexion esthétique, sans nécessairement utiliser des pratiques de génie écologique. Dans les deux cas, si l'objectif est d'avoir des résultats visibles pour la population (par exemple des grands arbres) dans une logique électorale, le coût de la renaturation sera plus élevé. En effet, une plantation d'arbre mature coûte quelques centaines d'euros alors qu'un arbuste coûte entre 10 et 15€ l'unité. L'enherbement coûte entre 4 et 10€/m².

La difficulté principale de cette étape survient si le site contient des espèces exotiques envahissantes. Le cas échéant, le protocole est strict : le matériel utilisé pour l'arrachage de la plante envahissante doit être entièrement lavé à chaque utilisation pour que les graines ne se dispersent pas. Pour un arbre adulte, son abattage, dessouchage, évacuation et mise en décharge peuvent aller de 600 à 1200€ l'unité. En outre, il peut être très difficile voire impossible de supprimer l'espèce envahissante du terrain et cela entraîne le coût de la gestion à la hausse. Les coûts de cette étape sont donc fortement corrélés à la présence ou non d'espèces exotiques envahissantes.

Pour cette étape, il est délicat de définir une liste exhaustive des sous-étapes qui la constituent. En effet, les pratiques de végétalisation et d'aménagement paysager sont multiples et dépendent fortement du milieu à renaturer. Suivant le lieu, les espèces endogènes changent de fait et cela entraîne des coûts distincts et des préoccupations différenciées. De plus, les logiques et les pratiques peuvent être très différentes si le lieu dispose déjà d'un système d'irrigation ou si celui-ci reste à construire. Enfin, un écologue a souligné l'incertitude fondamentale des projets de génie écologique : puisque le vivant est imprévisible, il est potentiellement peu pertinent de segmenter cette étape en plusieurs sous-étapes rigides.

Pour parachever un processus de renaturation, la **gestion et le suivi** sont nécessaires, autant pour la partie écologique que pour la dépollution. Pour cette étape comme pour la précédente, nous disposons de peu de sources différentes. En ce qui concerne la surveillance des usages du site, une surveillance active augmente fortement le coût de gestion. S'il suffit de mettre en place une signalétique pour mettre en défens un site, le coût est de l'ordre de 4€/m². Si le site ne dispose pas de système d'irrigation, la création d'une citerne s'élève à 300€, en comptant l'acheminement de l'eau. Enfin, les opérations classiques sont le paillage, le défrichage et la fauche, qui coûtent quelques euros du m² pour un petit site.

La présence ou non d'espèces exotiques envahissantes, comme pour l'étape précédente, contribue fortement à l'augmentation du coût de la gestion du site.

Concernant la partie **opérations transversales**, les estimations sont globalement fiables car les personnes interrogées s'accordent sur les coûts donnés. Le transport de déchets inertes coûte entre 3 et 5€/t pour une distance d'environ 50 km - qui est la distance moyenne entre un chantier et une installation de stockage. Pour le transport de déchets non dangereux, le coût oscille entre 15 et 30€/t pour 50 km parcourus. Nous ne disposons pas d'estimation

pour l'évacuation de déchets dangereux mais le coût est nécessairement plus élevé car un niveau de sécurité plus important est requis. En ce qui concerne le stockage des déchets, les installations de stockage tendent à augmenter les taxes d'acceptation au fil des années car elles sont de plus en plus saturées. D'après un professionnel, l'acceptation en décharge coûte actuellement 8€/t pour les déchets inertes, 95€/t pour les déchets non dangereux et 185€/t pour les déchets dangereux. D'autre part, la valorisation des déchets (concassage) varie entre 4 et 8€/t. Enfin, l'apport de terre végétale a été souvent mentionné lors des entretiens ; en recoupant les estimations, nous obtenons une fourchette de coûts de 15 à 80€/m³. Ce coût dépend fortement de la disponibilité en terre végétale, et donc de l'artificialisation aux alentours du site à renaturer.

3.3 Les bases de données sur les coûts de renaturation d'un sol

Comme indiqué dans la partie 2.3, quatre bases de données ont été constituées. Les trois premières tirent leurs sources de dires d'experts ou de documents ; le vocabulaire technique n'est pas standardisé car nous les avons complétées avant d'avoir mis au point la typologie. La quatrième base a été alimentée par les réponses au questionnaire donc les termes sont standardisés et cette base est immédiatement exploitable pour effectuer de l'analyse de données.

4. Discussion et conclusion

Ce travail a permis de segmenter un processus de désartificialisation (ou renaturation) en plusieurs étapes et sous-étapes afin d'estimer pour chaque opération une fourchette de coûts et les facteurs de variabilité qui lui sont associés. Parmi les différentes méthodes retenues pour collecter les données (revue de littérature, récupération de documents type devis ou factures, entretiens), l'administration du questionnaire à l'oral a été la plus efficace pour obtenir des fourchettes de coûts et déterminer les facteurs de variabilité. Au cours de ces trois mois, nous avons cerné la filière de la renaturation des sols mais du temps supplémentaire aurait permis de prolonger les entretiens avec les contacts donnés par le réseau. Nicolas Mondolfo et moi avons achevé notre stage mais Mathilde Salin et Charles Claron poursuivent ce travail en effectuant les entretiens que nous n'avons pas pu mener. Même si nous n'avons pas eu de temps d'analyser les données en détail, en calculant par exemple une fourchette de coûts des différents itinéraires techniques (état initial du site, état final escompté, techniques et moyens utilisés), nous avons quand même une idée des facteurs susceptibles d'augmenter ou diminuer les coûts.

La difficulté principale, outre le manque de temps, a été la période sur laquelle s'est déroulé le stage : les professionnels partent souvent en vacances au mois de juillet et cela a momentanément freiné la dynamique des entretiens. Heureusement, grâce au réseau que nous avons constitué au fil des rencontres, il a tout de même été possible de mener de nombreux entretiens avec les acteurs du milieu.

J'ai quitté le CIRED très heureuse d'avoir découvert ce laboratoire de recherche et déterminée à y revenir potentiellement en thèse. Ce stage m'a plus largement permis de découvrir la comptabilité écologique grâce à la Chaire dans laquelle j'ai travaillé. Ainsi, j'ai l'opportunité de poursuivre mes études en effectuant une alternance chez RTE dans le département R&D. J'y étudierai la comptabilité écologique de cette entreprise en travaillant

sur l'artificialisation des sols due aux infrastructures et sur le développement de la biodiversité sous les lignes à haute tension. Je garderai donc des contacts avec les membres de la CCE dans le cadre de mon alternance.

Bibliographie et médiagraphie

Abbadie, L., Bastien-Ventura, C. & Frascaria-Lacoste, N. (2015). Bilan et enjeux du programme interdisciplinaire Ingeco du CNRS (2007-2011) : un tournant pour l'ingénierie écologique en France ?. *Natures Sciences Sociétés*, 23, 389-396.

Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France. (2022). *Renaturer les villes. Méthode, exemples et préconisations*.
<https://www.arb-idf.fr/nos-travaux/publications/renaturer-les-villes/>

BenDor T., Lester TW., Livengood A., Davis A., Yonavjak L. (2015). Estimating the Size and Impact of the Ecological Restoration Economy. *PLoS ONE* 10(6): e0128339. doi:10.1371/journal.pone.0128339

Centre de ressources Génie Écologique. (s. d.) <https://www.genieecologique.fr/>

Claron, C., Sonia, G. (2022). Zéro artificialisation nette : de la convention citoyenne au texte de loi, une trajectoire en débat. *Fonciers en débat*.
<https://fonciers-en-debat.com/zero-artificialisation-nette-de-la-convention-citoyenne-au-texte-de-loi-une-trajectoire-en-debat/>

Curage (BTP). (s. d.) Wikipédia [https://fr.wikipedia.org/wiki/Curage_\(BTP\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Curage_(BTP))

Économie circulaire. (2020). ADEME
<https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/quoi-parle-t/types-dechets/dechets-inertes>

Feger, C., Levrel H., et Rambaud, A. « Trois méthodes comptables complémentaires pour mettre les problèmes écologiques au cœur de la chose publique ». *Revue française d'administration publique* 183, no 3 (2022): 815-29. <https://doi.org/10.3917/rfap.183.0174>.

France Stratégie. « Objectif "Zéro artificialisation nette" : quels leviers pour protéger les sols ? ». Rapport au ministre de la Transition écologique et solidaire, au ministre de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales et au ministre chargé de la Ville et du logement (2019).
<https://www.strategie.gouv.fr/publications/objectif-zero-artificialisation-nette-leviers-protoger-sols>

Gonon, M., Surun, C., Levrel, H. « Limiter l'artificialisation des sols pour éviter une dette écologique se chiffrant en dizaines de milliards d'euros ». *The Conversation* (octobre 2021).
<https://theconversation.com/limiter-lartificialisation-des-sols-pour-eviter-une-dette-ecologique-se-chiffrant-en-dizaines-de-milliards-deuros-166073>

Le dictionnaire professionnel du BTP. (s. d.) Éditions Eyrolles
<https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=3580>

Office français de la biodiversité. (2022). *Renaturer les sols - Des solutions pour les territoires*.

<https://www.ofb.gouv.fr/documentation/renaturer-les-sols-des-solutions-pour-des-territoires-durables>

SelecDEPOL - Outil interactif de pré-sélection des techniques de dépollution et des mesures constructives. (s. d.) SelecDEPOL <https://selecdepol.fr/>

Selosse, M-A., Institut de la Transition foncière. (2023, 9 mai). *Forum Transition Foncière #1 Du foncier aux sols vivants* [Vidéo]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=C8KhqhnO3KI>

Surun, C., 2023. La comptabilité des dettes écologiques nationales et d'entreprises, un outil de pilotage vers une économie durable (Thèse de doctorat). Paris-Saclay, Paris, France.

Références juridiques

Code de l'Urbanisme :

[Article L101-2-1](#)

Loi :

[LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets](#)

Annexes

Carte mentale des étapes de la désartificialisation d'un sol

Disponible sur ce lien : <https://www.mindmeister.com/app/map/2801361230?t=8QxXfjCBcl>

Exemple de projets aboutis de renaturation

À Aubervilliers, Fieldwork (agence d'architectes) et Wagon Lanscaping (agence de paysagistes) ont mené deux projets de renaturation à partir d'un parking. Après désimperméabilisation, Fieldwork a créé une forêt urbaine comme en témoigne la photo (de gauche) de la Tierce Forêt et Wagon Lanscaping a créé le Jardin des Joyeux à travers un paysage alpin en utilisant le bitume concassé sur place (photo de droite).



source : auteurs

Tierce Forêt



Jardin des Joyeux

Questionnaire administré aux acteurs de la renaturation



POUR QUE LA NATURE ET LES HUMAINS COMPTENT.

Script du questionnaire - Collecte de données

1. Présentation

Ce questionnaire vous est adressé car vous êtes spécialiste d'une ou plusieurs étapes qui composent une opération de désartificialisation de sol.

Pour atteindre l'objectif de « **Zéro Artificialisation Nette** » d'ici 2050, la loi dite « Climat & Résilience » prévoit la possibilité de « renaturer » ou « désartificialiser » les sols. Elle en donne la définition suivante :

« La renaturation d'un sol, ou désartificialisation, consiste en des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé. » (Code de l'urbanisme, art. L101-2-1).

La [Chaire Comptabilité Écologique](#) (qui nous emploie) s'intéresse à cette évolution législative car elle crée les conditions institutionnelles pour la reconnaissance d'une « dette écologique » à l'égard des fonctions écologiques des sols. La notion de dette écologique repose sur la représentation des entités naturelles comme un « capital naturel » inscrit au passif du bilan comptable des organisations. À mesure qu'elles utilisent et dégradent ces entités, les organisations contractent une dette biophysique qui peut être évaluée via les coûts de préservation, c'est-à-dire le montant des investissements et dépenses courantes nécessaires pour prévenir ou réparer ces pertes. En appliquant cette logique aux usages des sols, le coût de la « renaturation » des sols pourrait servir de base pour estimer la dette écologique liée à leur artificialisation.

Or, les coûts associés aux opérations de renaturation demeurent mal connus. À ce jour, les données de référence sont issues d'un rapport de France Stratégie (2019) qui apporte peu de détails sur la méthodologie retenue pour produire ces estimations. Afin de compléter ce travail, **nous souhaitons estimer de façon détaillée les coûts associés aux différentes opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité des sols qui participent à leur « renaturation » (au sens juridique).**

C'est l'objectif de ce questionnaire. Tout apport de document (étude de cas, devis, facture, rapport, littérature grise, benchmark interne...) **permettant d'appuyer notre recherche est le bienvenu.** Il est possible de signer un accord de non divulgation si les données sont confidentielles. Le cas échéant, nous vous remercions de prendre contact à ces adresses :

charles.claron@enpc.fr ; mathilde.salin@banque-france.fr ; nmondolfo@gmail.com ; elodie.nguyen-rabot@agroparistech.fr.

- Nom et prénom : _____
- Organisme pour lequel vous travaillez : _____
- Fonction au sein de cet organisme : _____

2. Étapes de désartificialisation des sols

- Sur quelle(s) étape(s) d'une opération de désartificialisation vous situez-vous principalement ? Si vous êtes spécialiste de plusieurs étapes, choisissez-en une et nous vous demanderons ensuite des informations sur les autres.
 - études préalables
 - déconstruction ou démolition
 - désimperméabilisation
 - dépollution et/ou mesures constructives
 - réhabilitation des sols
 - végétalisation ou aménagement paysager
 - gestion
 - opérations transversales

3. Structure du questionnaire pour chaque étape

- Vous allez donner des coûts :
 - HT
 - TTC

Coût des sous-étapes

Pour chaque sous-étape :

- Indiquer après la sous-étape une fourchette de coûts, en précisant l'unité (€/m², €/m³, €/t...)
- Indiquer également les facteurs de variabilité susceptibles de faire varier ces coûts (en particulier : quel cas-type est associé à la fourchette basse, lequel à la fourchette haute).

4. Description détaillée de chaque étape

4.1. Études préalables

On applique la structure décrite dans la section 3.

Études préalables : Toute opération effectuée en amont de la mise en œuvre du projet de renaturation. Cela inclut les diagnostics et le plan de gestion.

Les principales sous-étapes que nous avons identifiées sont :

- Études agro-pédologiques (peut inclure analyses physico-chimiques, biologiques, agronomiques)
- Inventaire faune, flore et habitats
- Recherches historiques
- Diagnostic pollution des sols (peut inclure étude hydrogéologique)
- EQRS
- Test de perméabilité

- Etude de gestion des eaux pluviales
- Diagnostic amiante
- Diagnostic PEMD
- Plan Conception des Travaux
- Plan de gestion pollution
- Plan de gestion écologique

Coût global de l'étape : _____

4.2. Déconstruction ou démolition

On applique la structure décrite dans la section 3.

Déconstruction : Étape qui comprend une phase de destruction et une phase d'évacuation des matériaux. Elle concerne les bâtiments, infrastructures bétonnées, chenaux et endiguements.

Elle « se différencie de la démolition par la volonté explicite de ne pas générer de déchets en quantité importante » (OFB 2022).

Nous envisageons une opposition entre la méthode « déconstruction » et la méthode « démolition ».

Les principales sous-étapes que nous avons identifiées sont :

- Curage du bâtiment
- Déconstruction sélective (pour réemploi)
- Désamiantage
- Déplombage
- Ecrêtage
- Démolition (abattage)
- Démantèlement (industriel)

Coût global de l'étape : _____

4.3. Désimperméabilisation

On applique la structure décrite dans la section 3.

Désimperméabilisation : Suppression du revêtement imperméable situé sur tout type de surface afin de rétablir le fonctionnement hydraulique du site. ([Renaturer les sols](#), 2022, *CDC Biodiversité*). Nous l'utilisons comme synonyme de « descellement » et « déminéralisation ».

Les principales sous-étapes que nous avons identifiées, qui sont des méthodes différentes de désimperméabilisation, sont :

- Découpage (scie diamant)
- Décroulage (mini-pelle/BRH)

Coût global de l'étape : _____

Cette étape est dissociée de la gestion des déchets générés par l'opération. Les activités de gestion des déchets sont regroupées dans les « opérations transversales ».

Pour cette étape, les autres opérations liées à la désimperméabilisation relèvent des « opérations transversales », cf. section 4.10.

4.4. Dépollution et/ou mesures constructives

On applique la structure décrite dans la section 3.

Dépollution : Élimination de tout ou partie des polluants d'un milieu. Le degré de dépollution est fonction de l'usage ultérieur du site. ([Renaturer les sols](#), 2022, CDC Biodiversité)

Nous nous concentrons ici sur la dépollution des sols et des eaux (nappes phréatiques). Par ailleurs, les **mesures constructives** ne visent pas à supprimer la pollution, mais à la contrôler.

Nous admettons qu'il est possible de recourir à ces deux types de méthodes dans un même projet, en fonction des objectifs ciblés. ([SelecDEPOL](#))

Les principales sous-étapes que nous avons identifiées sont :

> Dépollution des nappes phréatiques

- Pompage et traitement (hydrocarbures lourds et légers, métaux)
- Sparging (hydrocarbures)

> Dépollution des sols :

- Excavation des sols pollués (hydrocarbures lourds et légers, métaux)
- Venting/bioventing (polluants volatils)
- Oxydation/réduction chimique in situ (hydrocarbures lourds et légers, métaux)
- Désorption thermique (hydrocarbures lourds et légers, métaux)
- Lavage (hydrocarbures lourds et légers, métaux)
- Biodégradation in situ (hydrocarbures)
- Biopile (hydrocarbures)
- Phytoextraction (métaux)
- Myco-phytodégradation (hydrocarbures)

> Mesures constructives :

- Phytostabilisation (métaux)
- Étanchéification - confinement (hydrocarbures lourds et légers, métaux)

Coût global de l'étape : _____

Les sous-étapes sont dissociées de la gestion des déchets qu'elles peuvent générer. Les activités de gestion des déchets sont regroupées dans les « opérations transversales ».

4.5. Réhabilitation des sols

On applique la structure décrite dans la section 3.

Réhabilitation des sols : Toute opération visant à améliorer l'état et les fonctions des sols après désimperméabilisation et éventuellement dépollution.

Les principales sous-étapes que nous avons identifiées sont :

- Griffage (décompaction en surface)
- Sous-solage (décompaction en profondeur)

- Construction de sol (apport de déchets ou sous-produits)
- Apport de compost
- Bioaugmentation/biostimulation

Coût global de l'étape : _____

Les sous-étapes sont dissociées de la gestion des déchets qu'elles peuvent générer. Les activités de gestion des déchets sont regroupées dans les « opérations transversales ».

4.6. Végétalisation ou aménagement paysager

On applique la structure décrite dans la section 3.

Nous distinguons deux manières de réinvestir des sols réhabilités. La **végétalisation** dans le cadre du génie écologique se définit comme « la conception d'aménagements durables, adaptatifs, multifonctionnels, inspirés de, ou basés sur, les mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques » (Abbadie et al, 2015). Nous ajoutons à la végétalisation **l'aménagement paysager**, qui peut accorder autant ou plus d'importance à l'esthétique qu'à la fonctionnalité écologique.

Les principales sous-étapes que nous avons identifiées sont :

- Enherbement
- Plantation de végétation herbacée
- Plantation de ligneux
- Paillage
- Suppression de ligneux
- Création de plan d'eau

Coût global de l'étape : _____

Les sous-étapes sont dissociées de la gestion des déchets qu'elles peuvent générer. Les activités de gestion des déchets sont regroupées dans les « opérations transversales ».

4.7. Gestion et suivi

On applique la structure décrite dans la section 3.

Par **gestion**, nous entendons l'ensemble des opérations qui peuvent être nécessaires pour assurer le bon fonctionnement écologique des milieux renaturés. Cela passe notamment par le maintien des habitats existants. ([Renaturer les villes](#), 2022, ARB ÎdF)

« Gestion » est ici utilisé comme synonyme de « maintenance ».

Les principales sous-étapes que nous avons identifiées sont :

- Suivi de la pollution
- Surveillance des accès et des usages (mise en défens par exemple)
- Gestion des espèces exotiques envahissantes (animales et végétales)
- Irrigation
- Entretien de la végétation ligneuse (taille, coupe, recépage)
- Entretien de la végétation herbacée (désherbage,...)
- Valorisation des déchets verts (broyage,...)
- Evacuation des déchets verts

- Entretien des cycles du sol
- Suivi écologique

Coût global de l'étape : _____

4.8. Opérations transversales

On applique la structure décrite dans la section 3.

Cette catégorie regroupe des opérations qui peuvent se retrouver à plusieurs étapes d'un projet de désartificialisation des sols. Elles ne constituent pas une étape à proprement parler, mais un ensemble de points de passage éventuels.

Nous avons identifié les opérations suivantes :

- Évacuation des déchets (Pour des déchets inertes, non dangereux ou dangereux)
- Stockage de déchets inertes
- Stockage de déchets non-dangereux
- Stockage (confinement) de déchets dangereux
- Concassage des déchets inertes
- Élimination des déchets (dangereux)
- Apport de terre végétale
- Compactage

5. Conclusion

Le questionnaire touche à sa fin. Si vous avez connaissance de documents (études de cas, devis, factures, rapports, littérature grise, benchmark interne...) qui pourraient compléter notre étude, vous pouvez nous les transmettre.

- Acceptez-vous d'être recontacté(e) ?
 - Oui
 - Non
- Si oui, quelle est votre adresse mail ? _____
- Avez-vous des remarques ? _____

Nous vous remercions d'avoir contribué à notre projet de recherche !

Tableau des entretiens à partir du questionnaire réalisés en phase de collecte de données

 Prénom, Nom	 Fonction - Organisme	 Date	 Modalité	 Durée (min)
Frédéric Ségur	Directeur - Arbre, ville & Paysage	20 jui...	Visio ▾	63
Philippe Bataillard	Expert SSP et sédiments pollués - BRGM	26 jui...	Visio ▾	60
Yann Thomas	Président - Microhumus	26 jui...	Visio ▾	59
Olivier Taugourdeau	Ingénieur de recherche - Valhoriz	26 jui...	Visio ▾	55
François Vadepied	Co-fondateur - Wagon Landscaping	28 jui...	Visio ▾	58
Julie Rochet	Cheffe de secteur - Demcy Eiffage	30 jui...	Visio ▾	62
Laurent Chateau	Coordinateur friches - ADEME	30 jui...	Visio ▾	32
Guillaume Bourgault	Ex-Directeur Etudes, Travaux, Patrimoine et Dépollution - EPFNA	3 juil. ...	Visio ▾	65
Manon Poncato	Responsable projets urbains - Biomedes	3 juil. ...	Visio ▾	84
Christine Lafeuille	Directrice Adjointe Stratégie et Opérations Foncières - Métropole Européenne de Lille	5 juil. ...	Visio ▾	60
Aurélien Huguet	Consultant « conseil en écologie appliquée »- Aurélien Huguet Ecologie	5 juil. ...	Visio ▾	56
Geoffroy Séré	Enseignant- chercheur - Université de Lorraine ; Laboratoire Sols & Environnement	6 juil. ...	Visio ▾	63
Maxime Louzon	Responsable du Pôle Ecosystèmes - Envisol	7 juil. ...	Visio ▾	120
David Rybojad	Chargé de l'offre nature en ville - Eurovia Vinci	10 juil...	Visio ▾	25
Quentin Vincent	Directeur Scientifique et Technique - Sol & Co	10 juil...	Visio ▾	72

ID Prénom, Nom	Fonction - Organisme	Date	Modalité	Durée (min)
Marcos Da Silva	Fieldwork	10 juil...	Visio	73
Mathilde Grandjean	Chargée d'opération spécialiste SSP - EPF Grand Est	11 juil...	Visio	78
Daniel Monfort	Ingénieur environnemental - BRGM	11 juil...	Visio	52
Fabienne Ficamos	Cheffe de projet AMO Environnement - AREP	11 juil...	Visio	30
Mélanie Guyot	Cheffe de projets SSP - EPFIF	13 juil...	Visio	67
Anne Sainpol	Experte assainissement - Agence de l'Eau RMC	13 juil...	Visio	35
Clément Daignan	Chargé d'études et de formations - OIEAU	18 juil...	Visio	40
Yann Calazel	Chef de projets - Urbanwater	19 juil...	Visio	90
Stéphanie Le Bonniec	Ingénieure environnement - HPC International	19 juil...	Visio	20
Clara Dumestier	Cheffe de projets transition écologique - EPFIF	20 juil...	Visio	39
Florence Baptist	Dirigeante - Soltis Environnement	24 juil...	Visio	14
Bastien Fiori	Chef de Projet Urbanisme - Grand Besançon	24 juil...	Télép...	8
Julien Perrin & David Rybojad	Chef de secteur Génie Écologique - Equo Vivo (Vinci) & Chargé de l'offre nature en ville - Eurovia (Vinci)	26 juil...	Visio	64
Xavier Hédevin	Directeur Régional Grand Sud - Valterra	27 juil...	Visio	50

Tableau des fourchettes de coûts par sous-étape

Etape	Sous-étape	Structuration des coûts	Estimation coûts sous-étapes <i>* une fourchette est comptée comme 2 estimations</i>
Etudes préalables	Recherches historiques	Analyse documentaire	1200-5000€/unité <i>3 estimations</i>
	Études agro-pédologiques	Sondage ; analyse labo des échantillons (agronomiques, biologiques...) ; interprétation des résultats ; rédaction rapport Exhaustif.	5000-15000€/unité <i>8 estimations étude complète</i> <i>Plupart des estimations entre 5000 et 10000.</i> - Analyse d'échantillon : 60-200€/unité - Ingénieur pédologue : 700-800€/jour - Technicien pédologue : 550-600€/jour
	Inventaire faune, flore et habitats	Analyse bibliographique (systématique ?) ; intervention chargés d'étude jour et nuit ; bilan Exhaustif ?	5000-25000€/unité <i>3 estimations étude complète</i> - Chargé d'études jour : 550€/j (1 est.) - Chargé d'études nuit : 580€/j (1 est.)
	Diagnostic pollution des sols	Sondage ; analyse labo des échantillons ; interprétation des résultats ; rédaction rapport Exhaustif.	4000-20000€/unité <i>5 estimations étude complète</i> - Analyse d'échantillon : 80-200€/unité (4 est.) - Flash/levée de doute/diag rapide = 1000-4000€/unité.
	EQRS <i>Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires</i>	Purement ingénierie	4000-10000€/unité <i>4 estimations</i>
	Test de perméabilité	Test Porchet : carottage à la tarière, infiltration petite quantité d'eau, observation et bilan	Test Porchet : 400-500€/unité <i>3 estimations</i> Test Matsuo : 500-700€/unité <i>2 estimations</i>

Etape	Sous-étape	Structuration des coûts	Estimation coûts sous-étapes * une fourchette est comptée comme 2 estimations
		Test Matsuo : creuser fosse à la pelle, infiltration d'une grande quantité d'eau (citerne), observation, bilan, éventuellement remblai.	
	Etude de gestion des eaux pluviales	Visite du site d'une journée ; synthèse des autres études préalables	3000-20000€/unité <i>5 estimations</i>
	Diagnostic amiante		Diag amiante sols : 3000-50000€/unité <i>5 estimations</i> Diag amiante bâtiment : 2000-10000€/bâtiment <i>2 estimations</i>
	Diagnostic PEMD <i>Produit Équipement Matériaux Déchet</i>		5000-20000€/unité <i>2 estimations</i>
	Plan de gestion pollution	Sondages et analyses supplémentaires (éventuellement); Rédaction rapport (par technicien) et relecture (par ingénieur)	4000-10000€/unité <i>5 estimations</i>
	Plan de gestion écologique	Sondages et analyses supplémentaires (éventuellement); Rédaction rapport Intègre éventuellement un plan de gestion des espèces exotiques envahissantes (EEE). Exhaustif ?	1600-5600€/unité <i>3 estimations</i> - Plan de gestion spécifique EEE : 5000-10000€

Etape	Sous-étape	Structuration des coûts	Estimation coûts sous-étapes <i>* une fourchette est comptée comme 2 estimations</i>
	Plan conception des travaux		5000-25000€/unité <i>2 estimations</i>
Maîtrise foncière			
Déconstruc- -tion ou démolition	Curage du bâtiment		10-15€/m2 avec économies d'échelle <i>2 estimations</i>
	Déconstruction sélective		<i>0 estimation</i> <i>selon une professionnelle : pas d'estimation possible tant c'est contextuel</i>
	Désamiantage		150€/m2 en moyenne <i>1 estimation</i> <i>selon une professionnelle : pas d'estimation possible tant c'est contextuel</i>
	Déplombage		<i>0 estimation</i>
	Ecrêtage	Tri des déchets fait simultanément	120-180€/m2 avec économies d'échelle <i>2 estimations</i> <i>tri des déchets inclus</i>
	Démolition (abattage)	Tri des déchets fait simultanément	27-35€/m2 avec économies d'échelle <i>2 estimations</i> <i>tri des déchets inclus</i>
	Démantèlement (industriel)		<i>0 estimation</i> <i>selon une professionnelle : pas d'estimation possible tant c'est contextuel</i>
		Décroutage	Mini-pelle + BRH, mobilisation de

Etape	Sous-étape	Structuration des coûts	Estimation coûts sous-étapes <i>* une fourchette est comptée comme 2 estimations</i>
Désimper-méabilisation		pelleteur	2 estimations 20-100€/m2 (décroulage, évacuation, ISDI) <i>Sans amiante</i> 12 estimations
	Découpage	Scie diamant ou scie circulaire	4-10€/ml (découpage, évacuation, ISDI) <i>Sans amiante</i> 2 estimations
Dépollution et/ou mesures constructives	Nappes phréatiques : Pompage et traitement		0 estimation
	Nappes phréatiques : Sparging		0 estimation
	Sols : Excavation	Déblaiement ; évacuation ; acceptation ISDD	?-350€/t (Déblaiement, évacuation, ISDD) 1 estimation
	Sols : Venting/bioventing	Mise en place ;	Min : 100000€/projet 1 estimation
	Sols : Désorption thermique	Mise en place ;	180€/t 1 estimation
	Sols : Lavage	Mise en place ;	0 estimation
	Sols : Biodégradation in situ	Mise en place ;	20-30€/t 1 estimation
	Sols : Biopile	Mise en place ;	5€/m2 (mise en place) avec économies d'échelle 1 estimation
	Sols : Phytoextraction	Mise en défens ; défrichage ; semences ; amendement organique (si manque de MO)	5-10€/m2 (mise en place) avec économies d'échelle 1 estimation

Étape	Sous-étape	Structuration des coûts	Estimation coûts sous-étapes * une fourchette est comptée comme 2 estimations
	Sols : Myco-phytodé-gradation	Mise en défens ; défrichage ; semences ; amendement organique (si manque de MO)	2,5€/m2 (mise en place) avec économies d'échelle <i>1 estimation</i>
	Mesures constructives : Phytostabilisation	Mise en défens ; défrichage ; semences ; amendement organique (si manque de MO)	20-40k€/pilote 2€/m2 (mise en place) avec économies d'échelle <i>1 estimation</i>
	Mesures constructives : étanchéification		2€/m2 (bâche) avec économies d'échelle <i>1 estimation</i>
Réhabilitation des sols	Griffage	Peu coûteux Matériel agricole, TP ou jardinage	?- 1€/m2 avec économies d'échelle <i>1 estimation</i>
	Sous-solage	Peu coûteux Matériel agricole, TP ou jardinage	0,8- 1€/m2 avec économies d'échelle <i>2 estimations</i>
	Apport de terre végétale <i>(est une "opération transversale" mais la pratique la plus courante de réhabilitation)</i>	<i>cf. "Opérations transversales"</i>	
	Construction de sol	Fourniture (sauf déjà sur site), transport (sauf déjà sur site) mise en place Fourniture : - matière minérale (en particulier : argile, sable, limon)	<i>à construire à partir des éléments unitaires</i>

Etape	Sous-étape	Structuration des coûts	Estimation coûts sous-étapes <i>* une fourchette est comptée comme 2 estimations</i>
		<ul style="list-style-type: none"> - matière organique (terre de mauvaise qualité, compost pour enrichir) <p>Mise en place : par ouvriers TP ou agricoles, supervision par ingé/technicien.</p> <p>Principe : il faudrait faire des cas avec déchets présents sur site VS dons hors site VS achat de matériaux ; partiel ou total à chaque fois.</p>	
	Apport de compost	<p>Fourniture, transport, mise en place</p> <p>Transport : jusqu'à plateforme</p>	<p>6-30€/t (fourniture)</p> <p><i>4 estimations</i></p> <p><i>On a aussi des estimations au m2 (de sol enrichi) et au m3</i></p>
	Bioaugmentation/bio stimulation	<p>Fourniture, transport (quel poids ?), mise en place</p>	<p>16€/m2 sans économies d'échelle</p> <p><i>1 estimation</i></p> <p>?-10€/m2 avec économies d'échelle</p> <p><i>1 estimation</i></p>
Végétalisation ou aménagement paysager	Enherbement	<p>Fourniture, mise en place</p> <p>Acheminement = minime pour des semis.</p>	<p>4-10€/m2 (fourniture, mise en place)</p> <p><i>3 estimations</i></p>
	Plantation de végétation herbacée	<p>Fourniture, transport, mise en place</p> <p>1kg semences /50m2 (pour phytoremédiation)</p>	<p><i>Distinguer selon type de végétation</i></p>

Etape	Sous-étape	Structuration des coûts	Estimation coûts sous-étapes <i>* une fourchette est comptée comme 2 estimations</i>
		1kg semences /60m2 Acheminement = minime pour des semis	
	Plantation de ligneux	Fourniture, transport, mise en place	<i>Distinguer selon type d'arbre et maturité</i>
	Paillage	Fourniture, transport, mise en place	<i>Gros écart entre deux estimations données : 0,5€/m2 sur 1ha et 50-80€/m2 : voir laquelle est fiable. 50-80€/m2 = plus justifiée.</i>
	Suppression de ligneux	Abattage de l'arbre, dessouchage, évacuation, mise en décharge	600-1200€/unité <i>Pour un arbre adulte 3 estimations</i>
	Création de plan d'eau	Terrassement ; étanchéification du fond et des bords ; apport de terre végétale ou mélange terre-pierre	10000-20000€/unité <i>1 estimation peu fiable</i>
	Suivi de la pollution		5000€/an (1ha) <i>1 estimation peu fiable</i>
	Suivi écologique		<i>0 estimation</i>
	Surveillance des accès et des usages		- Signalétique pour mise en défens : 4€/m2. <i>1 estimation</i>
	Gestion des espèces exotiques envahissantes		<i>0 estimation</i>
	Irrigation		- Citerne : 300€/unité (dont acheminement) <i>1 estimation</i>
	Entretien de la végétation ligneuse (taille, coupe, recépage)		<i>0 estimation</i>

Etape	Sous-étape	Structuration des coûts	Estimation coûts sous-étapes <i>* une fourchette est comptée comme 2 estimations</i>
	Entretien de la végétation herbacée (désherbage, fauche)	Opérations possibles : fauche, défrichage, débroussaillage...	<ul style="list-style-type: none"> - Défrichage : 4€/m² (petit site) <i>1 estimation</i> - Fauche : 2-3€/m² (petit site) <i>1 estimation</i>
	Valorisation des déchets verts (broyage,...)		<i>0 estimation</i>
	Evacuation des déchets verts		<i>0 estimation</i>
	Entretien des cycles du sol		5000€/an (1ha) <i>1 estimation peu fiable</i>
Opérations transversales	Évacuation des déchets inertes	Décapage, transport Coût d'évacuation et de stockage sont souvent agrégés.	3-5€/t (transport) <i>2 estimations</i> <i>Pour distance = 50km</i>
	Evacuation des déchets non dangereux	Décapage, transport Coût d'évacuation et de stockage sont souvent agrégés.	15-30€/t (transport) <i>3 estimations</i> <i>(distance = 50km), max : contexte IdF</i>
	Evacuation des déchets dangereux (recoupe en partie "excavation des sols pollués")	Décapage, transport Coût d'évacuation et de stockage sont souvent agrégés.	<i>0 estimation</i>
	ISDI Stockage de déchets inertes	= Acceptation en décharge Coût d'évacuation et de stockage sont souvent agrégés.	8€/t (acceptation) <i>1 estimation</i> 50-60€/m³ (évacuation, acceptation) <i>2 estimations</i>
	ISDND Stockage de déchets non dangereux	= Acceptation en décharge Coût d'évacuation et de stockage sont souvent agrégés.	95€/t (acceptation) <i>1 estimation</i> 172-196€/t (évacuation, acceptation dont TGAP) <i>2 estimations</i> 150-180€/m³ (évacuation, acceptation)

Etape	Sous-étape	Structuration des coûts	Estimation coûts sous-étapes <i>* une fourchette est comptée comme 2 estimations</i>
			<i>2 estimations</i> <i>2t/m3 d'après un professionnel</i>
	ISDD Stockage de déchets dangereux	= Acceptation en décharge Coût d'évacuation et de stockage sont souvent agrégés.	185€/t (acceptation) <i>1 estimation</i> 170-200€/t (évacuation, acceptation) <i>2 estimations</i>
	Valorisation des déchets : concassage		4-8€/t <i>2 estimations</i>
	Elimination des déchets		<i>0 estimation</i>
	Apport de terre végétale	Fourniture, transport, mise en place Acheminement via semi-benne (28t) Terre volume-poids : 1m3 ~ 1,5t (Hédevin) 1m3 ~ 2t (Calazel)	15-80€/m3 (fourniture, transport, mise en place) <i>4 estimations</i> <i>min : Orléans, max : Paris, terre amendée</i> <i>On a aussi des estimations au m2 (conversion facile) et à la tonne</i>
	Compactage		2€/m3 (avec économies d'échelle) <i>1 estimation</i>

Pour plus de précisions quant aux facteurs de variabilité, à l'imbrication des étapes et à la présence ou non d'économies d'échelles, voir [ce tableau récapitulatif](#).

Abréviations

A-IGÉco : Association fédérative des acteurs de l'ingénierie et du génie écologiques
ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ARB : Agence régionale de la biodiversité
BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières
CARE : Comprehensive accounting in respect of ecology
CEREMA : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
EPF : Établissement public foncier
EQRS : Évaluation quantitative des risques sanitaires
ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement
ISDD : Installation de stockage de déchets dangereux
ISDI : Installation de stockage de déchets inertes
ISDND : Installation de stockage de déchets non dangereux
OFB : Office français de la biodiversité
PCT : Plan de conception des travaux
PEMD : Diagnostic produits équipements matériaux et déchets
PLU(i) : Plan local d'urbanisme (intercommunal)
TVB : Trame verte et bleue
UPDS : Union professionnelle de la dépollution de sites
UPGE : Union professionnelle du génie écologique
ZAN : Zéro artificialisation nette

Glossaire

Biodégradation *in situ* : « Ajout de composés spécifiques dans les sols ou les eaux souterraines afin de créer les conditions favorables à l'activité des microorganismes responsables de la biodégradation des contaminants. » ([SelecDEPOL](#))

Curage : « “déshabiller” tout ou partie d'un local ou d'un bâtiment, afin de livrer nue sa structure porteuse pour être rénové, réhabilité [ou démoli.] » ([Wikipédia](#))

Déchets dangereux : « Les déchets dits « dangereux » contiennent, en quantité variable, des éléments toxiques ou dangereux présentant des risques pour la santé humaine et l'environnement (article R. 541-8 du code de l'environnement : les déchets dangereux y sont indiqués avec un astérisque). » ([ADEME](#))

Déchets inertes : « Déchets minéraux produits par l'activité de construction (BTP, industrie de fabrication de produits de construction) : béton ; tuiles et briques ; agrégats d'enrobés ; déblais ; vitrage ; etc. » ([ADEME](#))

Déchets non dangereux : « Les déchets non dangereux non inertes sont variés. Généralement, on les définit par défaut comme étant ceux qui ne présentent aucune des caractéristiques spécifiques aux déchets dangereux et qu'on désigne parfois comme “déchets banals”. » ([ADEME](#))

Décroustage : Retrait de la couche superficielle

Écrêtage : « Suppression d'un ou de plusieurs étages en haut d'un immeuble (dans le cadre d'une opération de réhabilitation lourde par ex.) » ([Le dictionnaire professionnel du BTP](#))

Ingénierie écologique : « Ensemble des connaissances scientifiques, des techniques et des pratiques qui prend en compte les mécanismes écologiques, appliqué à la gestion de ressources, à la conception et à la réalisation d'aménagements ou d'équipements, et qui est propre à assurer la protection de l'environnement. » ([Centre de ressources Génie Écologique](#))

Venting : Méthode consistant à « extraire des polluants volatils par mise en dépression de la zone non saturée. » ([SelecDEPOL](#))