



HAL
open science

Les coûts de la restauration des sols urbains

Mathilde Salin, Charles Claron, Elodie Nguyen-Rabot, Nicolas Mondolfo,
Harold Levrel

► To cite this version:

Mathilde Salin, Charles Claron, Elodie Nguyen-Rabot, Nicolas Mondolfo, Harold Levrel. Les coûts de la restauration des sols urbains. CIRED Working Paper n°2024-96-FR. 2025. hal-04904897

HAL Id: hal-04904897

<https://hal.science/hal-04904897v1>

Submitted on 21 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Les coûts de la restauration des sols urbains

Mathilde Salin, Charles Claron, Elodie Nguyen--Rabot,
Nicolas Mondolfo, Harold Levrel

CIREd corresponding author: mathilde.salin.pro@gmail.com

Preprint (do not quote without permission of the authors)



POUR QUE LA NATURE ET LES HUMAINS COMPTENT.



Centre international de recherche sur l'environnement et le développement
Unité mixte de recherche CNRS - Ecole nationale des ponts et chaussées - Cirad - EHESS - AgroParisTech
Site web: www.centre-cired.fr Twitter: @cired8568
Jardin Tropical de Paris – 45bis, avenue de la Belle Gabrielle 94736 Nogent-sur-Marne Cedex

Les coûts de la restauration des sols urbains

Mathilde Salin^{*1,2}, Charles Claron¹, Elodie Nguyen-Rabot¹, Nicolas Mondolfo¹, and Harold Levrel¹

¹UMR Cired, Université Paris-Saclay, AgroParisTech, Ecole des Ponts ParisTech, CNRS, CIRAD, EHESS, 94130, Nogent-sur-Marne, France

²Banque de France^{**}

^{**} Les vues exprimées dans cet article sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de la Banque de France.

January 21, 2025

Abstract

L'urbanisation entraîne de multiples formes de dégradations des sols - comme la compaction, la pollution et l'imperméabilisation -, ce qui compromet leur capacité à fournir des services écosystémiques essentiels aux milieux urbains, tels que la protection contre les inondations et les vagues de chaleur. La restauration écologique des sols urbains est donc essentielle pour des villes durables et adaptées au changement climatique. Cependant, les dimensions économiques de la restauration des sols urbains, en particulier ses coûts, restent largement inexplorées. A partir d'entretiens avec une cinquantaine d'acteurs du secteur, cette étude estime que les coûts médians de restauration des sols urbains varient de 50 à 320 €/m² pour les sols compactés, imperméabilisés ou construits, et atteignent plus de 800 €/m² pour les sols pollués. La restauration des sols urbains comprend une séquence impliquant jusqu'à dix étapes, combinant plusieurs techniques, avec une variation significative des coûts. Les études préalables sont l'étape la moins coûteuse, tandis que la démolition du bâti et l'assainissement du sol sont les plus onéreuses. Ces nouvelles estimations de coûts aideront notamment à estimer les investissements nécessaires à l'atteinte des objectifs de restauration, à sélectionner des zones de restauration et à développer des incitations économiques pour la restauration écologique dans les villes. Ces résultats soulignent également la nécessité de préserver les sols fonctionnels, parallèlement aux efforts de restauration.

*mathilde.salin.pro@gmail.com

Remerciements : Nous remercions chaleureusement Cedissia About, architecte-urbaniste, chercheure-associée au Lab'Urba; l'ADEME; Florence Baptist, Soltis Environnement; Marc Barra, Agence régionale de la Biodiversité en Île-de-France, Institut Paris Region; Guillaume Bourgault, EPFNA; le BRGM; Yann Calazel, Urbanwater; Hervé Canler, Agence de l'Eau Artois-Picardie; Chloé Charreton, Atelier Marco Rossi Paysagiste; F.Ficamos, AREP; Fieldwork architecture; Xavier Hédevin, Valterra Matières Organiques; Aurélien Huguet, Aurélien Huguet Ecologie; Guillaume Lemoine, ECT; Camille Livry, Bordeaux Métropole; Dr. Maxime Louzon, Pôle Ecosystèmes, ENVISOL; Microhumus; Sylvain Moulherat, TerrOiko; Julie Rochet, Cheffe de Secteur Demcy; Frédéric Ségur, Arbre, Ville et Paysage; Pr. Geoffroy Séré, Université de Lorraine; Souhir Soussou, Fertil'Innov Environnement; Patrice Valantin, Reizhan; Wagon Landscaping paysagistes ainsi que tous les autres experts et praticiens qui ont préféré rester anonymes et ont participé à cette recherche en acceptant d'être interviewés et/ou en partageant des documents pertinents. Nous remercions également les participants à la Journée d'étude de la Chaire de la Transition foncière, Champs-sur-Marne, mars 2024) pour leurs questions et leurs commentaires, ainsi que Cristina Peñasco et Valentina Bosetti pour leurs précieux conseils.

Financements : Elodie Nguyen-Rabot a reçu des financements de la Chaire Comptabilité Ecologique pour réaliser ce projet.

Travaux associés : Ce projet de recherche a donné lieu à une autre publication à paraître : Claron C., Salin M, Nguyen-Rabot E., Modolfo N. et H. Levrel (à paraître), « L'affleurement d'une filière de la restauration des sols urbanisés ; une perspective méso-économique sur l'évolution de la gouvernance des sols ».

Les sols urbains couvrent environ 3% de la surface terrestre mondiale (IPBES, 2019), contre 10% en France (Bocquet, 2023). La conversion des terres agricoles et naturelles en zones urbaines - un processus appelé « artificialisation des sols » - se poursuit : la surface des aires urbaines dans le monde a doublé sur la période 1992-2015 (IPBES, 2019), et en France, l'artificialisation s'élève actuellement à 21 000 ha/an (Bocquet, 2023). L'urbanisation dégrade les sols de plusieurs façons (Pavao-Zuckerman, 2008; Byrne, 2021) : ils sont compactés, pollués par les activités humaines, et imperméabilisés – la forme la plus prononcée de dégradation des sols (Tobias et al., 2018; O'Riordan et al., 2021). Ces processus affectent les fonctions des sols, entraînant un déclin des multiples services écosystémiques fournis par les sols aux habitants des villes, comme l'atténuation des inondations, la régulation du climat, le stockage du carbone ou l'approvisionnement en nourriture (Dominati et al., 2010; Adhikari and Hartemink, 2016; Greiner et al., 2017). Nombre de ces services écosystémiques sont essentiels au maintien de l'habitabilité des villes, dans un contexte d'augmentation des effets du changement climatique, notamment des vagues de chaleur et des fortes pluies.

La restauration des sols est une solution fondée sur la nature améliorant la fourniture de services écosystémiques (IPBES, 2018; Keesstra et al., 2018; Lal, 2015) et un élément crucial des plans de transition écologique. Elle est incluse dans la cible 2 du Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal et dans l'objectif de développement durable 15.3 des Nations Unies. En ce qui concerne plus spécifiquement les sols urbains, le récent Règlement européen sur la restauration de la nature¹ établit des cibles d'augmentation des espaces verts en ville. En France, l'objectif « zéro artificialisation nette » en 2050 adopté par la loi "Climat et Résilience"² prévoit la possibilité de compenser l'artificialisation par la restauration de sols artificialisés³.

Cependant, l'analyse scientifique sur la manière de restaurer les sols urbains dégradés reste embryonnaire (Byrne, 2021). Les écologues de la restauration n'ont que récemment pris en compte les sols et, *a fortiori*, les sols urbains, dans le cadre de leurs recherches (Heneghan et al., 2008; Harris, 2009; Kardol and Wardle, 2010; Farrell et al., 2020). L'impossibilité de définir un état de référence pour l'écosystème et l'importance des facteurs culturels dans la sélection des itinéraires de restauration constituent un défi particulier (Klaus and Kiehl, 2021; Pavao-Zuckerman, 2008). Par conséquent, s'écartant des définitions canoniques de la restauration écologique (Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group, 2004), Byrne (2021) propose de définir la restauration des sols urbains comme *la science et la pratique de la gestion des sols urbains pour atteindre des objectifs socio-écologiques intégrés afin d'améliorer la durabilité des paysages culturels urbains et le bien-être des citoyens ainsi que la biodiversité souhaitée* ⁴. Pour les sols urbains, la notion de « restauration » se rapproche de celle de « réhabilitation » ou de « refonctionnalisation » des écosystèmes. Contrairement aux formes classiques de restauration écologique (par exemple la « restauration des prairies »), la « restauration des sols urbains » se réfère à l'état initial plutôt qu'à l'état final de l'écosystème restauré, qui peut prendre diverses formes (forêt, parc urbain, etc.).

Parallèlement au développement des connaissances scientifiques sur la restauration des sols urbains, la compréhension de ses coûts et de leur structuration est cruciale pour évaluer les efforts nécessaires pour atteindre les objectifs politiques susmentionnés. Alors qu'il existe des études portant sur les coûts de restauration de plusieurs écosystèmes (De Groot et al., 2013), aucune analyse ne se concentre explicitement sur les sols urbains. Certains articles ont exploré les coûts associés à des aspects spécifiques de la restauration des sols urbains (par exemple Carrera and Robertiello (1993) pour la dépollution), sans donner une vue d'ensemble des processus de restauration. En France, Fosse et al.

¹Règlement (UE) 2024/1991 du Parlement européen et du Conseil du 24 juin 2024 relatif à la restauration de la nature et modifiant le règlement (UE) 2022/869.

²LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (1)

³Cette loi utilise les termes « renaturation » et « désartificialisation » plutôt que « restauration ». Cependant, comme il est impossible de définir et de rétablir un état « naturel », nous préférons le terme de « restauration », dont le sens est proche de ceux de « refonctionnalisation » et de « réhabilitation » ((Deboeuf de Los Ríos et al., 2022)).

⁴"The science and practice of managing urban soils to achieve integrated social-ecological goals for improving the sustainability of urban cultural landscapes and well-being of urban citizens and desired biodiversity." (Traduction vers le français par les auteurs).

(2019) est la principale référence pour les coûts de "renaturation" des sols dits "artificialisés". Elle distingue quatre étapes impliquées dans le processus (déconstruction, dépollution, désimperméabilisation et construction de technosol) et présente des fourchettes de coûts associées. Toutefois, cette étude présente plusieurs lacunes liées à l'absence ou à l'ancienneté des sources de données et à un manque de transparence méthodologique.

Le présent article ambitionne d'améliorer la connaissance scientifique relative aux coûts de la restauration des sols. En s'appuyant sur une campagne d'entretiens auprès d'acteurs de ce secteur ainsi que sur des analyses de documents techniques, il présente une base de données inédite qui fournit un aperçu complet et détaillé des coûts de restauration des sols urbains en France. Il s'agit d'une contribution fondamentale à l'estimation des besoins d'investissement totaux associés aux objectifs de neutralité en matière de dégradation des sols. Elle contribuera également à la conception de politiques économiques pour atteindre ces objectifs. En effet, les coûts que nous évaluons, s'apparentant à des sortes de "coûts d'abattement de la dégradation des sols", peuvent aider à hiérarchiser les zones urbaines à restaurer en priorité (?) et à calibrer les outils de politique publique fournissant des incitations économiques à la restauration (comme des subventions par exemple).

1 Résultats

1.1 Étapes et techniques de la restauration des sols urbains

D'après nos recherches, le processus de restauration des sols urbains peut être représenté comme une « chaîne opératoire »⁵ articulant potentiellement dix étapes principales, chacune impliquant différents domaines d'expertise (détaillés dans l'annexe 4.3). Tout d'abord, (-1) la Planification consiste à déterminer le site le plus approprié pour la restauration des sols, à l'aide d'outils tels que des cartes des sols ou de la biodiversité, à consulter les résidents locaux et co-construire le projet avec eux. Après la Maîtrise foncière (0), les Etudes préalables (1) évaluent la qualité biologique, chimique et physique du sol. Si le sol est le support d'un bâtiment, une Démolition du bâti (2) doit avoir lieu, tandis que la Modification du revêtement (3) est nécessaire si le sol est recouvert d'un revêtement imperméable empêchant sa colonisation par les plantes et les organismes et l'infiltration de l'eau. Les sols urbains étant souvent pollués (par exemple par des hydrocarbures ou des métaux lourds), un Assainissement du sol (4), comprenant le traitement ou le confinement de la pollution, sera nécessaire. Plus généralement, un Travail du sol (5) peut être envisagé : le sol peut être partiellement remplacé par une terre végétale plus fertile, simplement décompacté et amendé, ou ses horizons peuvent être entièrement reconstruits à l'aide de techniques d'ingénierie pédologique. La Gestion des déchets et terres excavées (6) peut accompagner les étapes (2) à (5), impliquant souvent un stockage en décharges. Enfin, la surface des sols peut être végétalisée - bien que la colonisation naturelle soit également possible - ce qui implique une étape de Végétalisation (7). Souvent, la restauration se termine par une étape de Gestion et suivi (8), qui peut s'étendre sur plusieurs années.

D'une part, chaque étape peut comporter plusieurs techniques, énumérées dans le tableau 1 (voir l'annexe 4.3 pour les définitions). D'autre part, les techniques peuvent être plus ou moins décomposées : par exemple, la technique de « construction du sol » est elle-même un assemblage de techniques de décompactage, d'ajout de matériaux divers (gravas, etc.), de compost et de biostimulation.

1.2 Coût des techniques

Nous analysons ensuite les coûts (en €/m²)⁶ associés à chaque étape et à chaque technique. Les étapes de planification et de maîtrise foncières sont exclues de cette analyse, parce que la planification a été ajoutée *a posteriori* suite aux suggestions des experts interrogés, et parce que les coûts de la

⁵En anthropologie des techniques, le concept de "chaîne opératoire" est un outil descriptif et analytique visant à représenter un processus technique comme une séquence d'opérations (cf. Lemonnier (1976), Coupaye (2022)).

⁶Les coûts présentés dans cet article sont tous hors taxes.

Table 1: Etapes et techniques impliquées dans la restauration des sols urbains

Etape	Technique
-1. Planification	Global - Planification
0. Maîtrise foncière	Global - Maîtrise foncière Autre - Maîtrise foncière
1. Études préalables	Global - Études préalables Autre - Études préalables Recherches historiques Études agro-pédologiques Inventaire faune, flore et habitat Test de perméabilité Étude de gestion des eaux pluviales Diagnostic amiante Diagnostic pollution des sols EQRS Diagnostic PEMD Plan Conception des Travaux Plan de gestion pollution Plan de gestion écologique
2. Démolition du bâti	Global - Démolition du bâti Autre - Démolition du bâti Démantèlement Désamiantage Déplombage Écrêtage Démolition
3. Modification du revêtement	Global - Modification du revêtement Autre - Modification du revêtement Descellement par découpage Descellement par décroustage Mise en place d'un revêtement perméable Apport de graves
4. Assainissement du sol	Global - Assainissement du sol Autre - Assainissement du sol Dépollution du sol : excavation des sols pollués Dépollution du sol : venting/bioventing Dépollution du sol : oxydation/reduction chimique <i>in situ</i> Dépollution du sol : désorption thermique Dépollution du sol : lavage Dépollution du sol : biodégradation <i>in situ</i> Dépollution du sol : bioterre Dépollution du sol : phytoextraction Dépollution du sol : myco-phytodégradation Mesures constructives : phytostabilisation Mesures constructives : étanchéification Nappe phréatique : pompage et traitement Nappe phréatique : sparging
5. Travail du sol	Global - Travail du sol Autre - Travail du sol Travail du sol en place Construction de sol Reconstitution de sol Terrassement Décompactage Apport de compost Apport de terre végétale Bioaugmentation/biostimulation Compactage
6. Gestion des déchets et terres excavées	Global - Gestion des déchets et terres excavées Autre - Gestion des déchets et terres excavées Évacuation des déchets inertes (ISDI) Évacuation des déchets non dangereux (ISDND) Évacuation des déchets dangereux (ISDD) Stockage de déchets inertes (ISDI) Stockage de déchets non dangereux (ISDND) Stockage de déchets dangereux (ISDD) Traitement des déchets en biocentre Concassage des déchets inertes
7. Végétalisation	Global - Végétalisation Autre - Végétalisation Enherbement Plantation de végétation herbacée Plantation de ligneux - plant Plantation de ligneux - arbre Paillage Suppression de ligneux Création de plan d'eau
8. Gestion et suivi	Global - Gestion et suivi Autre - Gestion et suivi Suivi de la pollution Surveillance des accès et des usages Gestion des espèces exotiques envahissantes Suivi écologique Entretien des cycles du sol Entretien de la végétation Entretien de la végétation ligneuse Entretien de la végétation herbacée Valorisation des déchets verts Evacuation des déchets verts Irrigation

maîtrise foncière sont déjà bien renseignés⁷. Ces derniers varient considérablement en fonction de la localisation (les prix des terrains sont par exemple d'environ 10 000 €/m² à Paris, contre 40 €/m² pour les friches urbaines dans le département du Nord). Les experts interrogés ont également souligné que l'état initial du sol pouvait jouer un rôle. En particulier, les sites pollués peuvent se vendre à un prix très bas.

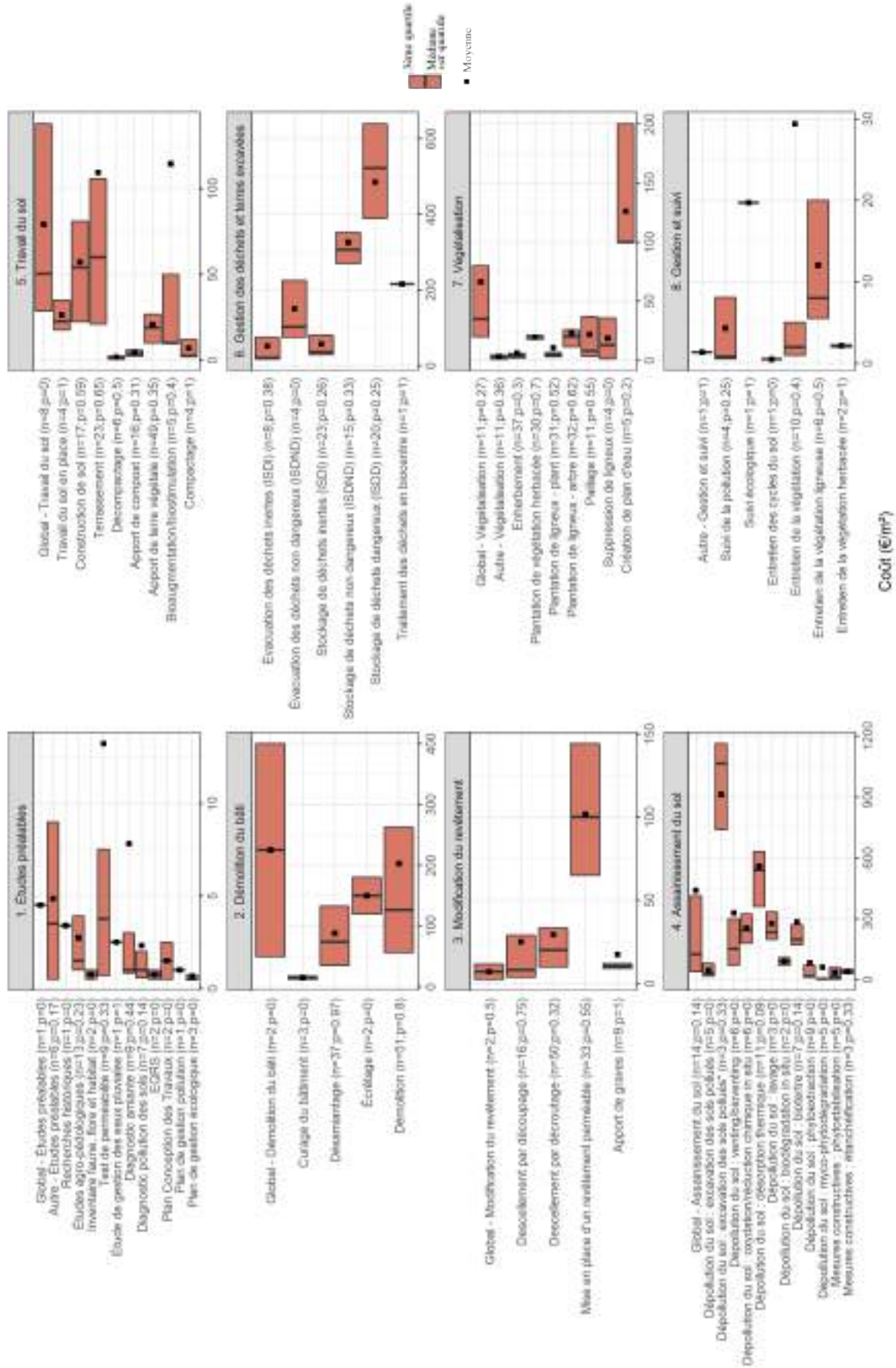
Nous constatons des variations significatives dans les ordres de grandeur des coûts en fonction de l'étape de restauration considérée (comme le montrent les axes de chaque quadrant dans les figures 2 et 1, ou la Figure A10). Les Etudes préalables apparaissent moins chères (les coûts moyens de chaque technique se situant entre 1 et 13 €/m²), suivies par la gestion et le suivi (1-29 €/m²), la modification du revêtement (7-101 €/m²), le Travail du sol (2-114 €/m²), la Démolition du bâti (15-225 €/m²), la Gestion des déchets et terres excavées (52-484 €/m²) et l'Assainissement des sols (35-559 €/m²).

Il existe également d'importantes variations entre les coûts des techniques à l'intérieur de chaque étape. Cela s'explique par le fait que les techniques peuvent être complémentaires ou s'additionner les unes aux autres. Cependant, il arrive que des techniques qui sont des substituts aient des coûts très différents - par exemple, la décontamination par désorption thermique apparaît plus coûteuse que l'oxydation chimique. Un résultat intéressant est que les techniques de l'étape Etudes préalables coûtent moins de 10€/m², ce qui la place comme l'étape la moins chère au m². Il semble ainsi difficile de réduire les coûts de restauration totaux en rognant sur les études: à l'inverse, de nombreux experts interrogés expliquent que des diagnostics hatifs ou incomplets peuvent conduire à augmenter les coûts de restauration par la suite, en raison de la découverte, lors des travaux, de contaminants imprévus dans le sol, d'espèces protégées, etc.

Comme les distributions de coûts de la Figure 1 ont nécessité la formulation d'hypothèses spécifiques (voir section 3) pour agréger des données dont le statut statistique est hétérogène, la Figure 2 présente les différentes estimations de coûts de notre base de données, en fonction des différents types statistiques d'estimation. Les incohérences apparentes entre les déclarations des experts - par exemple, certaines estimations des coûts « minimaux » sont plus élevées que les estimations des coûts « médians » ou « maximaux » - reflètent le fait que les différents experts interrogés peuvent être confrontés à des situations locales très différentes - par exemple, les coûts dans la région parisienne sont souvent beaucoup plus élevés que dans d'autres régions.

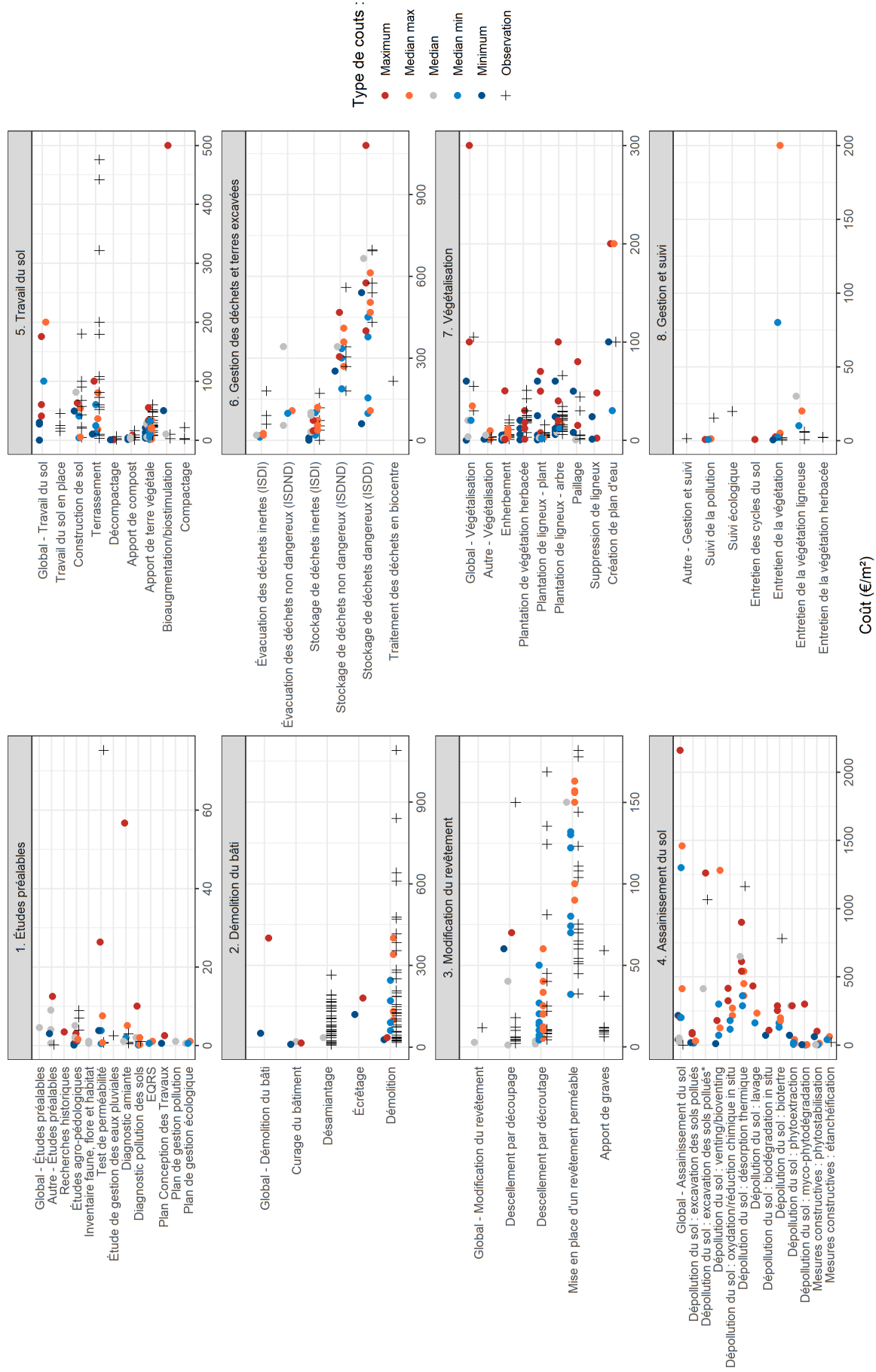
⁷Voir par exemple la base de données DVF (demande de valeur foncière) à l'échelle nationale (<https://datafoncier.cerema.fr/donnees/autres-donnees-foncieres/dvfplus-open-data>) qui permettent d'estimer le prix du foncier à partir des mutations foncières et immobilières enregistrées. Voir aussi les données et analyses produites par les Observatoires de l'habitat et du foncier (OHF), dans les territoires où ils existent - par exemple, L'observatoire régional du foncier en Île-de-France <https://www.orf.asso.fr/>.

Figure 1: Coûts des techniques (en €/m²) - Distribution



Note de lecture: n indique le nombre de coûts utilisés pour construire la distribution, p indique la part de ces coûts qui sont du type « observation » par opposition aux statistiques.
*Ici, les coûts d'excavation comprennent également les travaux de terrassement, le transport et le stockage.

Figure 2: Coûts des techniques (en €/m²) - Par type de coûts



*Ici, les coûts d'excavation comprennent également les travaux de terrassement, le transport et le stockage.

1.3 Facteurs de variabilité

Nous constatons que de nombreuses étapes peuvent bénéficier d'économies d'échelle, la croissance de la surface étant souvent déclarée comme un facteur de réduction des coûts (en €/m²) (Figure 3) - en particulier pour l'étape de Modification du revêtement et, dans une moindre mesure, pour la Démolition du bâti, le Travail du sol, la Végétalisation et les Etudes préalables. Inversement, d'après nos entretiens, des délais de réalisation restreints ont tendance à pousser les coûts des différentes étapes à la hausse.

Figure 3: Facteurs de variabilité des coûts de restauration des sols urbains



Note de lecture : la taille des mots indique la fréquence à laquelle ils ont été mentionnés par les experts interrogés et les documents examinés. Les facteurs énumérés dans ce graphique ont une incidence sur les coûts en €/m².

Les autres facteurs de variabilité identifiés sont plus spécifiques aux différentes étapes (Figure 3). Pour les Etudes préalables, l'hétérogénéité des sols – généralement élevée chez les sols urbains, en raison de la longue histoire de leurs utilisations (Morel et al., 2015) – fait augmenter les coûts, car les analyses nécessitent davantage d'échantillons de sol. L'augmentation des coûts peut également provenir de la présence d'espèces protégées ou invasives, de la difficulté d'accès au site ou des coûts de transport des techniciens et ingénieurs. Pour la Démolition du bâti, les coûts augmentent en particulier si le bâtiment est mitoyen ou s'il contient de l'amiante. L'amiante peut également augmenter le coût du descellement – qui est aussi fonction de l'épaisseur et de la dureté du revêtement à retirer. Les coûts d'Assainissement du sol augmentent avec la profondeur, la quantité et la diversité des polluants (ce qui rend le traitement plus complexe), et en fonction du lieu de traitement (la décontamination hors site, qui nécessite de transporter les terres excavées, est plus rapide mais plus coûteuse que la décontamination sur site). Dans le cas du Travail du sol, le coût de la terre végétale est un facteur important et peut être beaucoup plus élevé si le site est situé dans une région où le marché pour ce matériau est tendu (forte demande, faible offre), comme dans les zones métropolitaines, en particulier à proximité des villes qui ont des plans ambitieux en termes de solutions fondées sur la nature. De même, le réemploi des terres excavées (souvent moins coûteuses que la terre végétale) est difficile, voire impossible, dans les villes denses où il n'y a pas de sites disponibles pour les stocker. Le coût de la gestion des déchets et terres excavées dépend fortement de l'accessibilité à une décharge proche,

elle-même fonction de la région, de la présence d'une autoroute et des embouteillages. En outre, en raison d'exigences légales, des frais plus élevés doivent être payés pour l'élimination des déchets pollués, en particulier ceux contenant des métaux lourds ou de l'amiante. Enfin, les coûts de la phase de Végétalisation augmenteront si l'on utilise des semences d'espèces sauvages diversifiées, adaptées au contexte local, au lieu d'un gazon standard. Dans l'ensemble, de nombreux experts expliquent que la recherche d'esthétique (suivant des canons "standards") dans un court laps de temps augmente les coûts de l'étape de Gestion et suivi, car elle conduit à privilégier des arbres plus grands et matures, des plantations denses et une gestion intensive de la végétation (tonte fréquente des pelouses, taille des arbres). Cependant, il est aussi possible que des événements imprévus fassent augmenter les coûts de gestion, tels que la colonisation d'espèces invasives.

Inversement, plusieurs facteurs entraînent une diminution des coûts de restauration. La mutualisation des études préalables peut les rendre moins onéreuses. L'utilisation de matériaux trouvés sur place ou à proximité, le recours à des techniques de traitement de la pollution ou de travail du sol *in situ*, peuvent réduire les coûts des matériaux et du transport. La réutilisation de déchets verts et d'éléments provenant de bâtiments ou de chaussées déconstruits peut également réduire les coûts, même si cela n'est pas systématique car des coûts supplémentaires peuvent être associés aux contraintes imposées par la réutilisation des matériaux. Par exemple, la déconstruction de bâtiments en vue de la réutilisation d'éléments tels que les éviers, les radiateurs ou les carrelages demande plus de travail qu'un simple démolition. L'argent tiré de la vente de ces éléments peut ne pas suffire à compenser les coûts supplémentaires.

1.4 Itinéraires types de restauration et coûts associés

Afin d'estimer les coûts totaux des processus de restauration, nous construisons plusieurs "itinéraires de restauration types". Ces derniers correspondent à des combinaisons d'étapes et de techniques spécifiques, permettant de passer d'un sol dégradé à un sol "restauré".

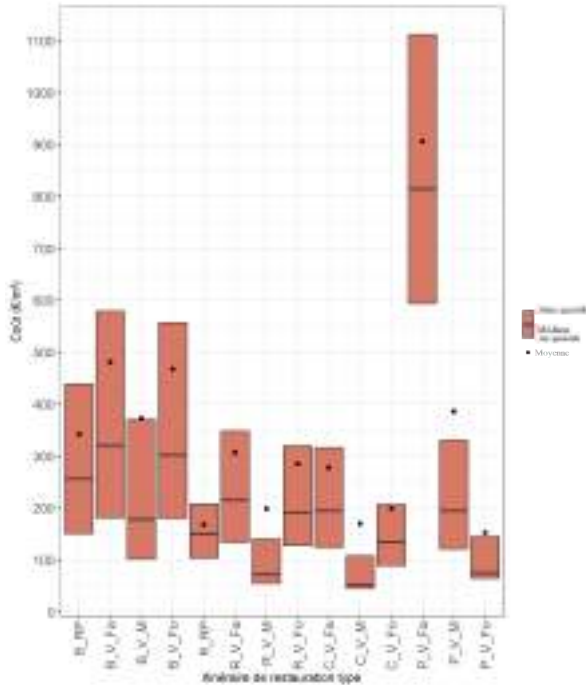
La plupart de nos scénarios (ou itinéraires) affichent des coûts médians compris entre 50 et 320 €/m², qui dépendent dans une large mesure de l'état initial de dégradation des sols (Figure 4b). La restauration des sols compactés (*C_...*) donne des coûts médians d'environ 50-200€/m² ; suivie par les itinéraires avec des sols initialement couverts d'un revêtement imperméable (*R_...*) avec des coûts médians d'environ 75-215€/m² ; et des sols initialement supports de bâti (*B_...*) avec des coûts médians plus élevés (environ 180-320€/m²), en particulier en raison du coût important de la démolition. En revanche, les coûts médians des itinéraires de restauration impliquant un sol initialement pollué (*P_...*) varient considérablement en fonction de la technique de restauration utilisée (d'environ 75€/m² pour la phytoremédiation à plus de 800€/m² pour l'excavation). Si des techniques moins coûteuses existent, notamment la phytodégradation, celle-ci est encore au stade de la R&D, ne peut pas être utilisée pour tous les contaminants, nécessite beaucoup plus de temps et doit souvent être associée à d'autres techniques, par exemple le confinement de la pollution. Dans une moindre mesure, l'état final de la restauration joue également un rôle pour expliquer les coûts. Il est intéressant de noter que l'installation d'un revêtement perméable – qui n'est pas une véritable « restauration » puisqu'il ne fait qu'améliorer la fonction de stockage de l'eau du sol – peut s'avérer plus coûteuse que la végétalisation du sol.

Toutefois, les coûts peuvent largement s'écarter de la médiane (Figure 4a). En examinant les fourchettes de coûts Q1-Q3 (1er et 3ème quartiles), nous constatons que la restauration d'un sol pollué en espace vert par excavation du sol et mise en décharge (*P_V_Fa*) peut atteindre des coûts particulièrement élevés (Q3 de 1110€/m²), notamment à cause du coût élevé de la gestion des terres excavées. Si l'on exclut cet itinéraire particulier, on trouve des coûts de restauration des parcelles allant de 25€/m² (coût Q1 d'un scénario avec un sol compacté restauré en un sol végétalisé impliquant un faible niveau d'ingénierie écologique) à 465€/m² (coût Q3 d'un scénario avec un sol recouvert d'un bâtiment, restauré en un sol végétalisé impliquant un faible niveau d'ingénierie écologique). La Figure A16a en Annexe teste la sensibilité de nos scénarios à des itinéraires techniques alternatifs, et montre par exemple que la dépollution à l'aide de biotertres peut être particulièrement coûteuse, et que

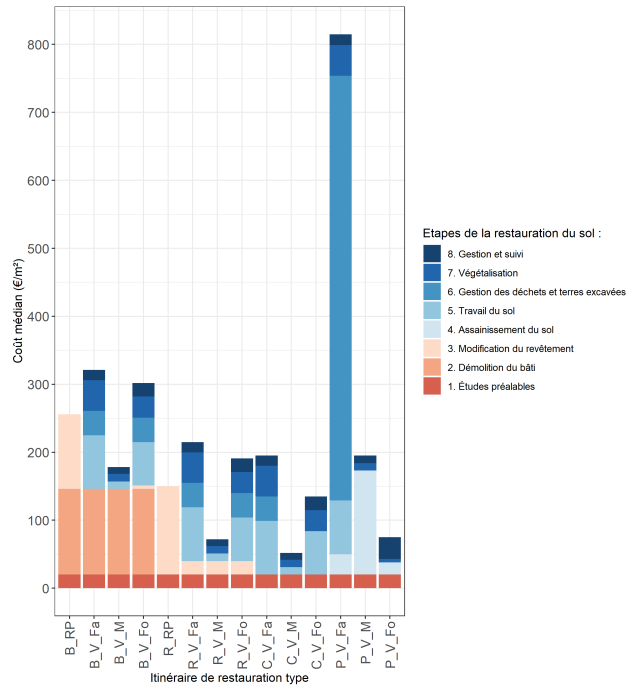
l'amiante peut augmenter de manière significative les coûts de restauration des sols imperméabilisés.

Figure 4: Coûts d'itinéraires de restauration types (en €/m²)

(a) Distribution



(b) Décomposition du coût médian



Note de lecture : Le nom de chaque itinéraire a la structure suivante: *EtatInitial_EtatFinal_IngénierieEcologique*, où l'*État initial* peut être bâti (B), couvert d'un revêtement imperméable (R), compacté (C) ou pollué (P); l'*État final* peut être un revêtement perméable (RP) ou de la végétation (V); et enfin de *recours à l'ingénierie écologique* peut être faible (Fa), modéré (M) ou fort (Fo). Les hypothèses associées à chaque itinéraire type sont en Annexe 4.1.6.

Enfin, les coûts n'augmentent pas linéairement avec le niveau d'ingénierie écologique impliqué : par exemple, la végétalisation pour objectifs esthétiques impliquant une gestion intensive et la plantation d'arbres matures, semblent plus coûteuses qu'une restauration avec une implication modérée de l'ingénierie écologique (par exemple, l'utilisation de mélanges de graines nécessitant un fauchage rare, et la plantation de jeunes arbustes). Cependant, un recours bien plus important à l'ingénierie écologique augmente, lui, les coûts, car il peut impliquer la création d'habitats (par exemple une mare) ainsi qu'un suivi et un entretien importants du sol et des milieux associés pour soutenir le processus de restauration (cf. Figure 4b où les coûts associés à la gestion et au suivi sont plus élevés pour les itinéraires ayant fortement recours à l'ingénierie écologique).

2 Discussion et conclusion

2.1 Ouvrir la boîte noire des coûts de restauration

Notre méthode de décomposition d'un processus de restauration en étapes est innovante, et sa transparence contraste avec d'autres évaluations des coûts totaux de restauration qui estiment les coûts de restauration écologique à un niveau agrégé et sans nécessairement détailler leurs facteurs de variabilité (De Groot et al., 2013). Notre approche est particulièrement adaptée à l'analyse des processus de restauration des sols urbains, qui peuvent inclure une grande diversité de situation (états de départ et d'arrivée), rendant les coûts globaux difficiles à comprendre.

Néanmoins, elle se heurte à certaines limites. Tout d’abord, les interprétations des experts sur ce à quoi une technique donnée fait référence peuvent parfois différer. Par exemple, le coût de l’ajout de terre végétale peut être limité au coût de la terre végétale pour certains, alors que d’autres peuvent également inclure les coûts du travail du sol et de la mise en œuvre⁸. La décomposition en étapes est également sujette à des chevauchements. Certains experts, par exemple, mentionnent la distance entre le site et une décharge comme source de variabilité des coûts pour l’étape de Modification du revêtement, alors qu’elle relève plutôt de l’étape Gestion des déchets et terres excavées dans notre typologie. Notre méthode ne tient pas non plus compte du fait que, dans la réalité, les techniques peuvent interagir ou être mises en œuvre simultanément, ce qui peut avoir un impact sur les coûts. Par exemple, les travaux d’assainissement peuvent nécessiter l’utilisation de machines lourdes, ce qui a pour conséquence involontaire de compacter le sol et d’entraîner des coûts de décompactage supplémentaires.

Malgré ces mises en garde, nos résultats confirment l’intérêt de cette approche « étape par étape ». Par exemple, les coûts d’une filière de restauration impliquant la technique agrégée de « construction de sol » (*B_V_Fo_construction du sol* dans la Figure A16a) sont similaires à ceux d’un processus de construction de sol recomposé en additionnant les techniques plus granulaires qu’il implique (terrassment, ajout de pierres et de compost) (*B_V_Fo*). Ces tests tendent à valider notre hypothèse selon laquelle nous pouvons additionner les coûts des techniques les plus simples pour obtenir les coûts des techniques plus complexes.

2.2 Itinéraires types de restauration des sols urbains

Nos itinéraires (ou « scénarios ») de restauration des sols urbains sont des archétypes et négligent plusieurs aspects. Tout d’abord, par souci de simplicité, ils excluent la maîtrise foncière et la planification - mais comme les coûts de cette dernière étape semblent négligeables par rapport à ceux des travaux et n’augmenteraient que légèrement les coûts totaux. Des coûts supplémentaires pour la maîtrise d’oeuvre (8 % du coût des travaux, selon les experts) et les taxes (TVA d’environ 20 %) devraient également être intégrés pour aboutir à une estimation complète des coûts totaux.

Deuxièmement, nous ne nous sommes concentrés que sur trois paramètres : l’état initial du sol, son état final et le niveau d’ingénierie écologique impliqué pour sa restauration. L’état initial et l’état final du sol pourraient être rendus plus précis : en particulier, la localisation, la surface et le type d’impermeabilisation et de polluants sont des facteurs importants qui pourraient faire augmenter les coûts (par exemple, dans les centres-villes) ou les faire diminuer (par exemple, via des économies d’échelle). En réalité, les itinéraires techniques (notamment l’état final qu’il est possible d’atteindre et le niveau d’implication de l’ingénierie écologique) sont contraints par ces caractéristiques initiales, et les coûts peuvent en fait déterminer l’itinéraire choisi plutôt qu’en résulter. Par exemple, la rémédiation de sites hautement pollués peut être extrêmement coûteuse, de sorte que l’état final du sol et son utilisation future seront choisis de manière à éviter une dépollution complète – on pourra planter une forêt dont l’usage sera restreint, plutôt que de recréer un sol sur lequel on produira des denrées alimentaires. L’itinéraire de restauration choisi peut également être contraint par les délais de réalisation exigés par le commanditaire et l’acceptabilité politique. Par exemple, un maire peut préférer la plantation de gazon et d’arbres adultes à une utilisation ambitieuse de l’ingénierie écologique parce que la première option, dont le résultat est rapidement visible et correspond potentiellement mieux aux normes esthétiques des électeurs, peut être plus valorisable politiquement.

Enfin, la manière dont nous avons défini les niveaux d’« ingénierie écologique » dans nos itinéraires types, sur la base d’un ensemble de littérature grise et académique, peut également être discutée. En particulier, il peut y avoir des arbitrages entre les différents impacts environnementaux des techniques. La rémédiation des sols *in situ* peut par exemple avoir un impact négatif sur leurs fonctions écologiques (par exemple la désorption thermique *in situ* peut réduire l’activité biologique ([ADEME et al., 2018](#))), mais a de faibles émissions de CO₂ car elle n’implique pas le transport de terre excavée. Certaines

⁸Lorsque les experts rendent cette décomposition explicite, nous ajoutons cette information dans notre base de données.

techniques de restauration spécifiques font également l'objet de débats - la construction de sols est par exemple critiquée parce qu'elle met l'accent sur les propriétés productives du sol au détriment de ses valeurs intrinsèques ou culturelles (Meulemans, 2020). Certains experts interrogés ont également critiqué la construction de sols avec des déchets de construction, qu'ils jugent pouvoir être réutilisés à d'autres fins (par exemple pour recréer un revêtement de chaussée) et lui préfèrent la « reconstitution » de sols avec des terres excavées. Enfin, l'« ingénierie écologique » dans nos itinéraires de restauration types néglige la connectivité écologique du site – recréer des « trames vertes » et « brunes » – alors qu'il s'agit d'un élément important des restaurations ambitieuses des sols (Deboeuf de Los Ríos et al., 2022).

Malgré ces limites, les itinéraires que nous proposons peuvent être considérés comme représentatifs de projets réels de restauration de sols urbains. Par exemple, la végétalisation d'un sol préalablement imperméabilisé (itinéraires $R_V_...$, avec des coûts moyens entre 199 et 307€/m²) est un archétype des projets de restauration de cours d'école ("cours Oasis"), ou de "désimperméabilisation" de parkings ou de cimetières. Les coûts de restauration de cours d'école réels fournis par certains experts (environ 200-300€/m² à Paris – hors mobilier urbain – et 200€/m² dans les villes du Sud-Est) sont cohérents avec nos résultats⁹. Cependant, des parcours avec des états initiaux plus complexes - par exemple, simultanément pollués, imperméabilisés et construits - pourraient permettre de mieux représenter certaines situations réelles - par exemple, le cas des friches industrielles. Enfin, nos itinéraires types ne tiennent pas compte de certaines « surprises » (Brunet, 2020) et incertitudes liées à l'assainissement et à la restauration écologique, qui peuvent entraîner des coûts supplémentaires inattendus.

2.3 Perspectives sur les coûts de restauration

Nous trouvons des coûts médians de restauration urbaine entre 50 et 320€/m² (jusqu'à 800€/m² pour les sols pollués). Cet ordre de grandeur est globalement cohérent – bien que légèrement plus élevé – avec les estimations de Fosse et al. (2019) qui trouve des coûts allant de 33€/m², pour une construction de sol à faible coût, à 455€/m², pour une restauration impliquant démolition du bâti, désimperméabilisation, dépollution et construction de sol. Les coûts que nous documentons sont également beaucoup plus élevés que pour la plupart des restaurations écologiques d'écosystèmes « standards » (le coût de la restauration des forêts ou des prairies étant inférieur à 1 \$₂₀₀₇/m²), et sont comparables aux coûts de restauration des récifs coralliens (De Groot et al., 2013) (voir l'annexe 4.7). Les coûts de restauration des sols urbains apparaissent également particulièrement importants lorsqu'ils sont comparés au prix d'achat d'un terrain à bâtir (92€/m² en moyenne en France en 2022)¹⁰.

Ces coûts élevés soulignent l'importance d'*éviter* la dégradation des sols. Au cours des entretiens, de nombreux experts ont été déconcertés par notre focalisation sur les coûts, plutôt que sur les bénéfices, de la restauration et ont craint que cela ne fournisse des arguments contre la restauration des sols urbains. Nous reconnaissons que la restauration des sols urbains présente de nombreux *bénéfices*¹¹, mais paradoxalement, l'évaluation des *coûts* de restauration peut elle aussi *encourager* la restauration des sols, car elle permet de les valoriser¹², conformément à une approche dite en "durabilité forte" (Levrel et al., 2014). Cette approche est cohérente avec le concept de « dette écologique » (Feger et al., 2023; Kervinio et al., 2023) : si elles n'atteignent pas les objectifs écologiques définis par les normes légales,

⁹Les coûts parisiens sont souvent dans le haut de la distribution des coûts (Section 1.3).

¹⁰<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/6902/download?inline>

¹¹Joint Research Centre and European Environment Agency (2012) estime le coût total de la dégradation des sols sous forme d'érosion, de diminution de la matière organique, de salinisation, de glissements de terrain et de pollution à 38 milliards d'euros par an pour l'UE-25 (voir également Graves et al. (2015), par exemple). Cela met en évidence les « bénéfices » de la restauration des sols, contrairement aux coûts de restauration estimés dans le présent document.

¹²Dans le cadre d'une approche "fondée sur les coûts" pour valoriser les écosystèmes (Garrod and Willis, 1999). Cette méthode contraste avec les approches d'évaluation des services écosystémiques fondées sur la propension à payer des individus pour la restauration ou la préservation de l'écosystème, qui peuvent aboutir à l'évaluation d'une faible valeur des écosystèmes si les individus ne perçoivent pas tous les avantages qu'ils procurent. C'est particulièrement le cas pour les écosystèmes "invisibles" (Dasgupta, 2021) comme les sols, qui risquent de rester sous-évalués avec ce deuxième type de méthode.

les organisations (par exemple, les entreprises, les États) contractent une dette écologique et doivent mettre de l'argent de côté pour la rembourser grâce à de la restauration écologique – la valorisation monétaire de leur dette est donc effectuée grâce aux coûts de restauration. En utilisant les coûts de restauration estimés par [Fosse et al. \(2019\)](#), [Gonon et al. \(2021\)](#) applique ce cadre conceptuel à l'objectif français de « zéro artificialisation nette » (ZAN), et estime qu'un scénario de statu quo (c'est-à-dire d'inaction) conduirait à l'accumulation d'une dette écologique de 154-632 milliards d'euros sur la période 2020-2030.

Les coûts de restauration peuvent également aider à planifier les investissements visant à améliorer les écosystèmes urbains. Comme ils dépendent largement d'aspects techniques, les coûts de restauration ont l'avantage d'être plutôt stables dans le temps et dans l'espace - du moins par rapport aux estimations des bénéfices rendus par les écosystèmes, qui varient en fonction des préférences des individus (par exemple entre les habitants des villes et des campagnes, les niveaux de revenus, etc.). L'établissement de projections de coûts futurs pourrait être fait en caractérisant l'évolution de trois facteurs importants de variation des coûts : la disponibilité de la terre végétale, la disponibilité de sites pour stocker la terre excavée et les coûts futurs de l'énergie. De même, nos estimations peuvent être utilisées dans d'autres contextes géographiques que la France métropolitaine, mais avec prudence et en tenant compte des sources de variabilité que nous documentons.

Enfin, l'accent mis sur la *restauration*, plutôt que sur l'*évitement* de la dégradation, peut donner l'impression que la perte de l'écosystème sol est réversible, ce qui n'est pas le cas. La restauration prend du temps, son succès est incertain ([Maron et al., 2012](#)), et le sol obtenu peut ne pas remplacer complètement les services fournis par les écosystèmes naturels. Les valeurs d'existence, patrimoniales et culturelles attachées aux sols sont affectées de manière permanente par leur dégradation. Les recherches futures devraient donc également explorer les coûts associés aux investissements visant à éviter et à réduire la dégradation des sols naturels par l'urbanisation.

3 Méthode

3.1 Construction d'une typologie d'étapes et techniques de restauration des sols urbains

Nous prolongeons l'approche proposée par [Fosse et al. \(2019\)](#) consistant à évaluer les coûts des différentes étapes d'un processus de restauration. Plusieurs raisons justifient l'adoption d'une telle approche modulaire. Tout d'abord, la restauration des sols urbains fait intervenir de multiples experts qui peuvent ne pas tous suivre le processus de restauration du début à la fin - un expert en paysagisme peut, par exemple, intervenir dans la phase de végétalisation sans avoir été préalablement impliqué dans la démolition du bâti ou la dépollution des sols. De plus, même s'ils n'ont pas d'expérience dans la restauration des sols urbains en tant que telle, certaines personnes peuvent avoir une bonne connaissance des coûts associés aux techniques susceptibles d'intervenir dans un processus de restauration. Par exemple, une entreprise qui décontamine des friches industrielles afin de pouvoir y reconstruire des bâtiments possède des connaissances précieuses sur les coûts de dépollution, même si elle n'opère pas avec l'objectif final de restaurer les sols. Nous nous attendions également à ce que les experts trouvent plus facile de donner des coûts explicites pour des étapes et des techniques spécifiques que d'estimer le coût global d'un processus de restauration complet, étant donné que ce dernier peut faire référence à des situations très différentes et dépendre de multiples paramètres.

Nous construisons notre typologie des étapes et des techniques de restauration à partir de deux types de matériaux : des entretiens et une revue de la littérature grise. Nous avons réalisé dix entretiens exploratoires avec des responsables de réseaux scientifiques, techniques ou professionnels liés à l'ingénierie écologique, des responsables de programmes de financement de la restauration (Fonds friches et Nature 2050) et des personnalités scientifiques ayant une expertise dans la restauration des sols. L'objectif de cette première série d'entretiens était de comprendre le contexte scientifique et institutionnel de la restauration des sols urbains et de discuter de la méthodologie appropriée pour évaluer les coûts qui lui sont associés. La plupart des experts interrogés lors de ces entretiens exploratoires décomposition et nous ont aidés à définir les opérations impliquées. Outre des conseils sur la manière de structurer notre phase de collecte de données, ils nous ont également aidés à identifier les catégories d'acteurs susceptibles de disposer d'informations sur les coûts recherchés. En parallèle, nous avons examiné plusieurs rapports et documents décrivant des processus détaillés de restauration des sols urbains ([Deboeuf de Los Ríos et al., 2022](#); [Castaing et al., 2022](#); [Neaud, 2021](#); [Limasset et al., 2021](#); [Taugourdeau et al., 2020](#); [Poudevigne et al., 2017](#); [ADEME et al., 2018](#)). Cette première phase nous a permis de définir une liste d'opérations (ou « étapes ») pouvant intervenir dans la chaîne opératoire de la restauration des sols urbains, que nous décomposons en une gamme de sous-étapes (ou « techniques ») plus spécifiques.

3.2 Collecte et traitement des données

3.2.1 Collecte des données

Les coûts sont collectés à partir d'une enquête menée auprès d'experts. Nous avons sélectionné les experts participant à l'enquête sur la base des recommandations formulées lors de la première série d'entretiens, de nos propres investigations, puis d'une méthode d'échantillonnage par « boule de neige » (en demandant aux experts s'ils connaissaient d'autres personnes susceptibles de fournir des réponses pertinentes à notre questionnaire). Finalement, sur 169 experts contactés par courriel, 53 ont activement contribué à notre recherche en acceptant un entretien ou en nous fournissant des informations utiles (par courriel ou appels non structurés) ou des documents. Nous avons mené des entretiens structurés autour d'un questionnaire avec 46 experts. 61% d'entre eux venaient d'entreprises privées, 22% d'administrations publiques, 13% de collectivités locales, 2% de la recherche et 2% d'associations à but non lucratif. De plus amples informations sur les experts interrogés sont disponibles en annexe. Les entretiens se sont principalement déroulés par vidéoconférence - à l'exception de deux d'entre eux - et ont duré 66 minutes en moyenne.

Chaque entretien s'est déroulé en trois étapes principales. (i) Nous passons en revue notre liste d'étapes, définissons chacune d'entre elles et demandons à l'expert d'indiquer celles qu'il connaît le mieux. Nous lui demandons également s'il fournira des coûts hors taxe ou TTC. (ii) Pour l'étape de restauration choisie par l'expert, nous présentons les différentes techniques qu'elle implique. Pour l'étape globale (par exemple, « Végétalisation »), puis pour chaque technique éventuellement impliquée dans l'opération (par exemple, « plantation de végétation herbacée », « paillage », etc.), nous demandons à l'expert s'il peut donner des coûts indicatifs, sans contrainte d'unité (€/tonne, €/m³, €/étude, etc.) ni de type (médiane, observation ou fourchette min-max)¹³. Nous demandons également quels sont les paramètres qui sont les plus susceptibles de faire varier ces coûts et, si possible, le sens dans lequel ces facteurs joueraient (à la hausse ou à la baisse). (iii) Nous concluons l'exploration de l'étape de restauration en demandant à l'expert s'il manque des techniques essentielles et, le cas échéant, d'indiquer les coûts associés.

Enfin, après avoir passé en revue toutes les étapes sélectionnées par l'expert, nous concluons l'entretien en lui demandant si il ou elle peut nous envoyer tout document susceptible d'apporter des informations supplémentaires sur les coûts des étapes et des techniques passées en revue ensemble.

3.2.2 Traitement des données

Compilation d'une base de données de coûts Nous extrayons les coûts des transcriptions des entretiens et les rentrons dans une base de données structurée (les noms des variables figurent à l'annexe 4.1.4). La spécification du statut statistique des coûts donnés oralement peut être compliquée. En effet, lorsque les coûts ont été explicitement mentionnés par les experts comme étant un minimum, un maximum ou une observation unique (c'est-à-dire provenant d'une expérience ou d'un devis spécifique), leur statut statistique est simple. Cependant, une certaine ambiguïté apparaît lorsque les experts formulent leurs estimations comme (i) « cela coûte généralement autour de 3€/m² », (ii) « cela peut aller de 10€/m² à 300€/m² » ou (iii) « c'est environ 45-50€/t ». Lorsque, comme dans l'exemple (i), les experts ont donné une estimation ponctuelle unique provenant d'un large éventail d'expériences (par opposition à une observation reflétant un cas particulier), nous classons le coût comme étant une « médiane ». Pour les fourchettes, comme dans les exemples (ii) et (iii), nous distinguons les cas où les coûts indiqués sont susceptibles d'être un minimum et un maximum, comme dans l'exemple (ii), et les cas où il s'agit probablement d'un intervalle plus étroit autour de la médiane (comme un intervalle Q1-Q3), comme dans l'exemple (iii). Les coûts du type (ii) sont donc étiquetés comme « minimum » et « maximum », tandis que les coûts similaires au cas (iii) sont classés comme « médiane min » et « médiane max ».

De même, nous ajoutons à la base de données les coûts provenant du large éventail de documents fournis par les experts, qui peuvent être des rapports publics, des présentations et des bases de données, ainsi que des devis confidentiels ou privés, des dossiers de demande de subvention et des études techniques (tableau A4).

Compilation d'une base de données de facteurs de variabilité des coûts. Nous construisons une deuxième base de données qui se concentre sur les facteurs de variabilité des coûts indiqués par les experts et les documents. Nous normalisons les facteurs en des catégories (par exemple, si un expert dit : « il est plus coûteux d'utiliser une grande variété de semences que d'utiliser de l'herbe standard », le facteur de variabilité est étiqueté comme « diversité des semences », avec un impact positif sur les coûts), tout en essayant de maintenir la spécificité de chaque facteur autant que possible (par exemple, l'utilisation de « semences locales » n'est pas la même chose que l'utilisation de « semences diversifiées »). Nous précisons également la direction dans laquelle le facteur influence les coûts, sur la base des entretiens et des documents. Lorsqu'un expert n'a pas donné de détails sur le sens de variation, nous le déduisons sur la base des informations provenant d'autres entretiens – si cela est possible, sinon

¹³Cela contraste avec les méthodes d'élicitation d'experts (*expert elicitation methods*) plus structurées, où l'on demande des estimations précises des quantiles et des distributions (Verdolini et al., 2018). En effet, les experts que nous avons interrogés ne sont pas nécessairement habitués à fournir des coûts standards, notamment en raison de la grande diversité des contextes dans lesquels ils interviennent. De ce fait, ils auraient pu avoir beaucoup de mal à proposer des distributions de coûts détaillées pour chaque technique.

nous qualifions le sens de variation d'« indéfini ». Enfin, lorsque nous utilisons cette base de données pour construire la Figure 3, nous appliquons un traitement spécifique au déterminant « surface » et ne conservons que ceux qui ont été indiqués comme ayant un impact *néгатif* sur les coûts. En effet, ce graphique se concentre sur les facteurs faisant varier les coûts en €/m², et il y a de bonnes raisons de penser que les personnes mentionnant la surface comme ayant un impact positif sur les coûts pensaient au coût *total* de l'opération (par exemple, d'une analyse préalable) plutôt qu'au coût en €/m².

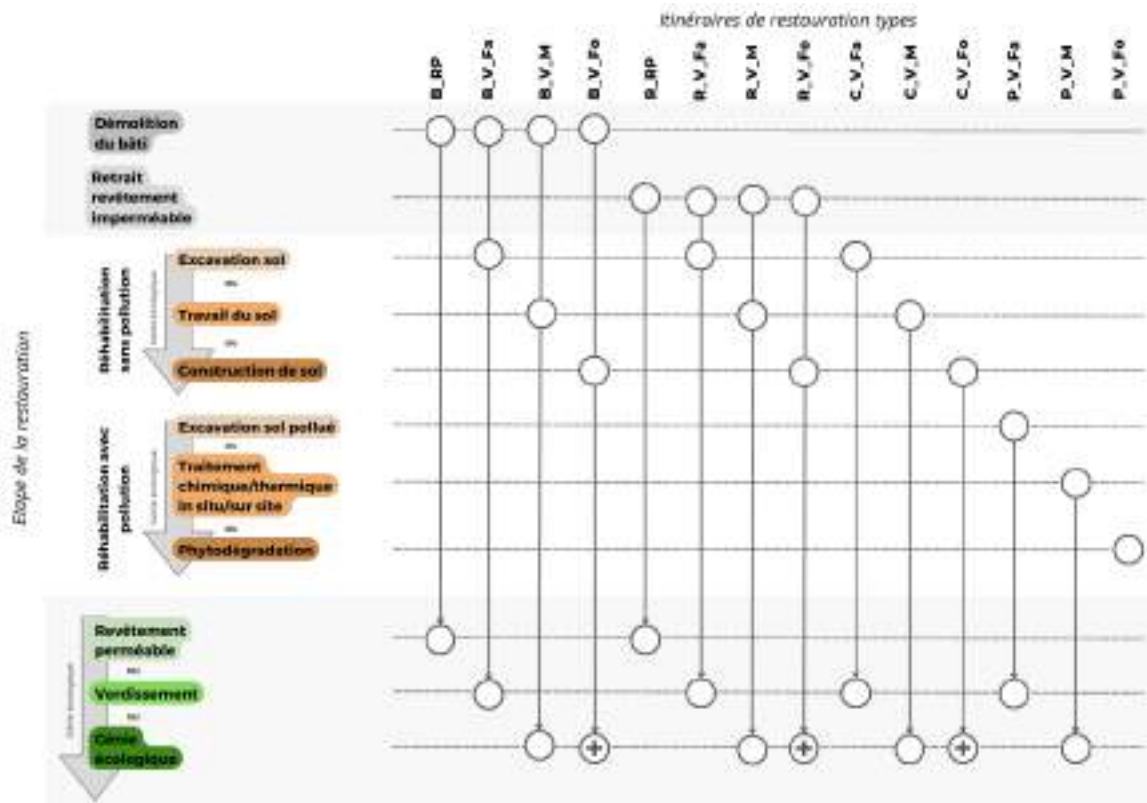
Traitements supplémentaires pour obtenir des distributions de coûts en €/m². Pour que nos résultats soient comparables à ceux d'autres études, nous avons choisi de présenter l'ensemble de nos coûts en €/m². Les coûts ayant été collectés dans différentes unités, leur conversion en €/m² nécessite un ensemble d'hypothèses que nous formulons sur la base des informations recueillies lors des entretiens. Nous les présentons dans le tableau A5, ainsi qu'une analyse de sensibilité (Figure A15). Néanmoins, certains coûts ne peuvent être convertis en €/m² – par exemple, lorsque les experts ont donné le coût total d'une étude préalable sans mentionner la surface du site concerné. Ainsi, alors que notre base de données initiale (toutes unités confondues) contenait 807 estimations de coûts, la base de données utilisée dans cet article – où les coûts ont été convertis en €/m² – contient 748 estimations. La Figure A13 fournit également des résultats où nous avons converti les coûts dans l'unité la plus utilisée pour chaque technique, plutôt qu'en m² (base de données alternative, avec 793 estimations).

Un autre défi concerne la construction de distributions de coûts et de statistiques (par exemple, médianes ou moyennes) basées sur des données initiales ayant un statut statistique hétérogène (médianes, minima, maxima, observations, etc.). Par conséquent, nous fournissons des graphiques qui représentent les différents types de points donnés par les experts, sans aucune forme d'agrégation. Ensuite, pour construire des distributions et statistiques, nous choisissons de considérer chaque point comme une observation, quel que soit son statut statistique initial. En particulier, cela conduit à pondérer les statistiques issues de l'expérience de longue durée des experts de la même manière que les observations de situations particulières (e.g. devis). Nous proposons donc une analyse de sensibilité où nous donnons un poids de 50 aux coûts qui ont un statut de « statistiques », contre un poids de 1 pour les observations simples (Figure A14). Nous trouvons que cela n'affecte que marginalement les résultats.

3.3 Construction de scénarios d'itinéraires de restauration "types"

Pour fournir des ordres de grandeur des coûts associés à un processus de restauration complet au niveau d'une parcelle, nous combinons les coûts de ces différentes étapes dans des « itinéraires » types. Dans la lignée de Phillips-Mao et al. (2015), ces itinéraires dépendent de trois aspects principaux, qui sont susceptibles de conditionner les étapes adoptées au cours du processus de restauration : (i) l'état initial du sol, (ii) l'état final que l'on souhaite atteindre via le processus de restauration, et (iii) le niveau d'ingénierie écologique impliqué dans la restauration. Nous nous concentrons sur une parcelle théorique de 1m² et supposons que les coûts des étapes peuvent être additionnés pour obtenir le coût final de l'itinéraire de restauration.

Figure 5: Etapes impliquées dans chaque scenario



Note de lecture : Le nom de chaque itinéraire a la structure suivante: EtatInitial_EtatFinal_IngénierieEcologique, où l'État initial peut être bâti (B), couvert d'un revêtement imperméable (R), compacté (C) ou pollué (P); l'État final peut être un revêtement perméable (RP) ou de la végétation (V); et enfin de recours à l'ingénierie écologique peut être faible (Fa), modéré (M) ou fort (Fo). Les cercles avec un signe « + » indiquent une ambition plus élevée en terme d'ingénierie écologique.

Nous distinguons quatre états initiaux différents du sol urbain ou très dégradé de la parcelle. Il peut être soit construit (B), soit revêtu (c'est-à-dire imperméabilisé) (R), soit compacté (C), soit pollué (P). Par souci de simplicité, nous excluons de nos scénarios les sols présentant plusieurs de ces caractéristiques initiales (par exemple, à la fois imperméabilisés et pollués).

Figure 6: Itinéraires types – Etat initial

(a) Bâti (B)



(b) Revêtu (R)



(c) Compacté (C)



(d) Pollué (P)



Source : Auteurs.

Ensuite, nous supposons que deux états finaux principaux peuvent être atteints : le sol est soit recouvert d'un revêtement perméable (RP), soit de végétation (V). Cependant, nous nous concentrons sur les voies où la situation entre l'état initial et l'état final s'améliore : par conséquent, seuls les sols qui ont été initialement construits ou imperméabilisés peuvent atteindre un état final "revêtement

impermeable".

Figure 7: Itinéraires types – Etat final

(a) Végétation (V) (b) Rvmtmt perméable (RP)



Source : Auteurs.

Figure 8: Itinéraires types – Niveau d'ingénierie écologique

(a) Faible (Fa) (b) Moyen (M) (c) Fort (Fo)



Source : Auteurs.

Enfin, pour passer de l'état initial à l'état final, nous distinguons différents degrés d'ingénierie écologique : faible (Fa), modéré (M) ou fort (Fo), tels que caractérisés sur la base de la littérature grise (voir Figure A3). Dans nos parcours types, un niveau faible d'ingénierie écologique se traduit par une excavation à nu du sol dégradé ou pollué, et son remplacement par de la terre végétale provenant de zones agricoles gagnées par l'urbanisation ([Programme SITERRE, 2015](#)). La surface du sol n'est alors « végétalisée » que par du gazon et quelques arbres matures, et fait l'objet d'une gestion intense (tonte, taille, etc.), à l'image d'un parc urbain traditionnel ([Deboeuf de Los Ríos et al., 2022](#)). Un niveau modéré d'ingénierie écologique consiste à essayer d'améliorer le sol (non pollué) en l'état, en le décompactant et en l'agradant avec du compost ([Taugourdeau et al., 2020](#)). Si le sol est pollué, nous considérons que l'élimination des contaminants sur place ou *in situ* par des techniques chimiques, physiques ou thermiques relève également d'une ingénierie écologique modéré ([ADEME et al., 2018](#)). Dans la phase de végétation suivante, il s'agit de planter des graminées multi-espèces avec des arbres plus jeunes (jeunes plants) et de limiter l'intensité de la gestion pour permettre aux plantes de se développer plus librement ([Deboeuf de Los Ríos et al., 2022](#)). Enfin, nous définissons un haut niveau d'ingénierie écologique comme la reconstruction complète du sol (non pollué) : les déchets de construction ou les terres excavées sont combinés avec du compost pour recréer les horizons du sol, selon une approche d'ingénierie pédologique ([Taugourdeau et al., 2020](#)). Elle est suivie d'une phase de végétalisation ambitieuse (plantation de graines multi-espèces et locales, de petits arbres, création d'habitats comme une mare) sans aucun suivi (évolution libre). Si le sol était initialement pollué, nous considérons que l'ingénierie écologique ambitieuse consiste à utiliser la phytodégradation pour éliminer les polluants, ce qui implique qu'il n'y a pas de reconstruction du sol ni de phase de « plantation » supplémentaire mais que la gestion de la végétation est plutôt intensive (pour récolter la plante qui extrait les polluants). Toutefois, il convient de considérer ces scénarios comme des « types idéaux »

utilisés pour évaluer l'effet de l'ingénierie écologique sur les coûts, tout en gardant à l'esprit que, dans la réalité, ce qu'il est possible de mettre en œuvre dépend fortement du site.

Pour chaque itinéraire, nous additionnons ensuite les coûts des étapes spécifiques de notre typologie, présentées dans la Figure 5 et détaillées dans le tableau A2. Le coût *distribution* de chaque scénario est obtenu de la manière suivante : pour calculer le coût médian (respectivement Q1 et Q3), nous additionnons le coût médian (respectivement Q1 et Q3) de chaque technique impliquée dans le scénario. Dans certains scénarios, certaines techniques ont plus de poids que d'autres, afin de refléter le fait qu'elles ne sont que partiellement impliquées, ou bien impliquées plusieurs fois (tableau A2). Par exemple, pour les scénarios où un plan d'eau est créé, nous supposons qu'il ne représente que 1/5 de la surface de sol restaurée. Les pondérations peuvent également refléter le fait que, dans certains scénarios, on peut s'attendre à ce que les coûts soient inférieurs ou supérieurs à leur distribution habituelle - par exemple, dans un cas où la végétation est peu gérée, on s'attend à ce que les coûts de gestion soient inférieurs.

References

- ADEME, MODAAL, and TESORA (2018). La reconversion des friches polluées au service du renouvellement urbain : enseignements technico-économiques - Bilan des opérations aidées dans le cadre du dispositif ADEME d'aide aux travaux de dépollution pour la reconversion des friches polluées (période 2010-2016). Technical report.
- Adhikari, K. and A. E. Hartemink (2016, January). Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma* 262, 101–111.
- Bocquet, M. (2023). Analyse de la consommation d'espaces - Période du 1er janvier 2009 au 1er janvier 2022. Technical report, Cerema Hauts-de-France.
- Brunet, L. (2020). Un transfert de sol incertain: Les surprises de la restauration et de la compensation écologique. *Revue d'anthropologie des connaissances* 14(4).
- Byrne, L. B. (2021). Socioecological soil restoration in urban cultural landscapes. In *Soils and Landscape Restoration*, pp. 373–410. Elsevier.
- Carrera, P. and A. Robertiello (1993). Soil Clean up in Europe - Feasibility and Costs. In H. J. P. Eijsackers and T. Hamers (Eds.), *Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection*, Volume 1, pp. 733–753. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Castaing, J., K. Monod, and V. Norève (2022). Renaturer les sols, des solutions pour les territoire. Technical report, CDC Biodiversité and Office Français de la Biodiversité.
- Coupage, L. (2022). Making 'Technology' Visible: Technical Activities and the Chaîne Opératoire: Technique. In M. H. Bruun, A. Wahlberg, R. Douglas-Jones, C. Hasse, K. Hoeyer, D. B. Kristensen, and B. R. Winthereik (Eds.), *The Palgrave Handbook of the Anthropology of Technology*, pp. 37–60. Singapore: Springer Nature Singapore.
- Dasgupta, P. (2021). *The economics of biodiversity: the Dasgupta review: full report* (Updated: 18 February 2021 ed.). London: HM Treasury.
- De Groot, R. S., J. Blignaut, S. Van Der Ploeg, J. Aronson, T. Elmqvist, and J. Farley (2013, December). Benefits of Investing in Ecosystem Restoration. *Conservation Biology* 27(6), 1286–1293.
- Deboeuf de Los Ríos, G., M. Barra, G. Grandin, and N. Bauquet (2022). *Renaturer les villes: méthode, exemples et préconisations*. Paris: Regreen nature-based solutions l'Institut Paris région-ARB, Agence régionale de la biodiversité.
- Dominati, E., M. Patterson, and A. Mackay (2010, July). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics* 69(9), 1858–1868.
- Farrell, H. L., A. Léger, M. F. Breed, and E. S. Gornish (2020, September). Restoration, soil organisms, and soil processes: emerging approaches. *Restoration Ecology* 28(S4).
- Feger, C., H. Levrel, and A. Rambaud (2023, January). Trois méthodes comptables complémentaires pour mettre les problèmes écologiques au cœur de la chose publique: *Revue française d'administration publique* N° 183(3), 815–829.
- Fosse, J., J. Belaunde, M. Dégremont, and A. Grémillet (2019). Objectif « zéro artificialisation nette » : quels leviers pour protéger les sols ? Technical report, France Stratégie.
- Garrod, G. and K. G. Willis (1999). *Economic valuation of the environment: methods and case studies*. Cheltenham, UK ; Northampton, MA, USA: Edward Elgar.

- Gonon, M., C. Surun, and H. Levrel (2021, October). Limiter l’artificialisation des sols pour éviter une dette écologique se chiffrant en dizaines de milliards d’euros.
- Graves, A., J. Morris, L. Deeks, R. Rickson, M. Kibblewhite, J. Harris, T. Farewell, and I. Truckle (2015, November). The total costs of soil degradation in England and Wales. *Ecological Economics* 119, 399–413.
- Greiner, L., A. Keller, A. Grêt-Regamey, and A. Papritz (2017, December). Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Policy* 69, 224–237.
- Harris, J. (2009, July). Soil Microbial Communities and Restoration Ecology: Facilitators or Followers? *Science* 325(5940), 573–574.
- Heneghan, L., S. P. Miller, S. Baer, M. A. Callahan, J. Montgomery, M. Pavao-Zuckerman, C. C. Rhoades, and S. Richardson (2008, December). Integrating Soil Ecological Knowledge into Restoration Management. *Restoration Ecology* 16(4), 608–617.
- IPBES (2018). The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Technical report, Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany.
- IPBES (2019, May). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Technical report, [object Object].
- Joint Research Centre and European Environment Agency (2012). *The state of soil in Europe: a contribution of the JRC to the European Environment Agency’s environment state and outlook report — SOER 2010*. LU: Publications Office.
- Kardol, P. and D. A. Wardle (2010, November). How understanding aboveground–belowground linkages can assist restoration ecology. *Trends in Ecology & Evolution* 25(11), 670–679.
- Keesstra, S., J. Nunes, A. Novara, D. Finger, D. Avelar, Z. Kalantari, and A. Cerdà (2018, January). The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of The Total Environment* 610-611, 997–1009.
- Kervinio, Y., C. Surun, A. Comte, and H. Levrel (2023, May). Defining ecological liabilities and structuring ecosystem accounts to support the transition to sustainable societies. *One Ecosystem* 8, e98100.
- Klaus, V. H. and K. Kiehl (2021, May). A conceptual framework for urban ecological restoration and rehabilitation. *Basic and Applied Ecology* 52, 82–94.
- Lal, R. (2015, May). Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability* 7(5), 5875–5895.
- Lemonnier, P. (1976, October). La description des chaînes opératoires : contribution à l’analyse des systèmes techniques. *Techniques & culture* (Bulletin 1), 100–151.
- Levrel, H., C. Jacob, D. Bailly, M. Charles, O. Guyader, S. Aoubid, A. Bas, A. Cujus, M. Frésard, S. Girard, J. Hay, Y. Laurans, J. Paillet, J. A. Pérez Agúndez, and R. Mongruel (2014, November). The maintenance costs of marine natural capital: A case study from the initial assessment of the Marine Strategy Framework Directive in France. *Marine Policy* 49(C), 37–47.

- Limasset, E., C. Merly, P. Bâlon, M. Desrousseaux, F. Quadu, A. Hucq, C.-H. Born, A. Malherbe, and F. Baptist (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 œuvre des objectifs européens de zéro artificialisation nette - Analyses et recommandations (WP4). Technical report.
- Maron, M., R. J. Hobbs, A. Moilanen, J. W. Matthews, K. Christie, T. A. Gardner, D. A. Keith, D. B. Lindenmayer, and C. A. McAlpine (2012, October). Faustian bargains? Restoration realities in the context of biodiversity offset policies. *Biological Conservation* 155, 141–148.
- Meulemans, G. (2020, May). Urban Pedogeneses: The Making of City Soils from Hard Surfacing to the Urban Soil Sciences. *Environmental Humanities* 12(1), 250–266.
- Morel, J. L., C. Chenu, and K. Lorenz (2015, August). Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *Journal of Soils and Sediments* 15(8), 1659–1666.
- Neaud, C. (2021). Retours d’expérience et outils mobilisables pour la renaturation des espaces – TOME 3. Technical report, CEREMA.
- O’Riordan, R., J. Davies, C. Stevens, and J. N. Quinton (2021, October). The effects of sealing on urban soil carbon and nutrients. *SOIL* 7(2), 661–675.
- Pavao-Zuckerman, M. A. (2008, December). The Nature of Urban Soils and Their Role in Ecological Restoration in Cities. *Restoration Ecology* 16(4), 642–649.
- Phillips-Mao, L., J. M. Refsland, and S. M. Galatowitsch (2015, June). Cost-Estimation for Landscape-Scale Restoration Planning in the Upper Midwest, U.S. *Ecological Restoration* 33(2), 135–146.
- Poudevigne, M., V. Billon, G. Charrier, and K. Pojer (2017). Vers la ville perméable. Comment désimpermeabiliser les sols ? Technical report, Agence de l’eau Rhône Méditerranée Corse.
- Programme SITERRE (2015). Procédé de construction de Sols à partir de matériaux innovants en substitution à la terre végétale et aux granulats de carrière - Rapport final. Technical report, ADEME.
- Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group (2004). The SER International Primer on ecological Restoration. Technical report, www.ser.org & Tucson: Society for Ecological Restoration International.
- Taugourdeau, O., J. Hellal, D. Montfort, E. Limasset, and C. Chauvin (2020). Enjeux de la reconversion d’une friche et comment évaluer la réhabilitation écologique d’un sol dégradé, Synthèse projet Bio-TUBES. Technical report, ADEME, 39.
- Tobias, S., F. Conen, A. Duss, L. M. Wenzel, C. Buser, and C. Alewell (2018, June). Soil sealing and unsealing: State of the art and examples. *Land Degradation & Development* 29(6), 2015–2024.
- Verdolini, E., L. D. Anadón, E. Baker, V. Bosetti, and L. Aleluia Reis (2018, January). Future Prospects for Energy Technologies: Insights from Expert Elicitations. *Review of Environmental Economics and Policy* 12(1), 133–153.

4 Annexes

4.1 Méthode

4.1.1 Liste des entretiens

Entretiens exploratoires

Table A1: Liste des entretiens exploratoires

Identifiant de l'entretien	Fonction	Organisation	Date	Durée (min)
Itw_E1	Président	Union professionnelle spécialisée sur le génie écologique	07/04/2023	70
Itw_E2	Responsable du développement foncier et référent biodiversité	Entreprise privée spécialisée dans la réhabilitation de friches industrielles, l'aménagement paysager, la réutilisation des terres excavées	18/04/2023	105
Itw_E3	Directeur & Gérant ; Administrateur	Bureau d'études pédologiques et paysagères ; Association pour la promotion et le développement de la recherche et de l'expérimentation sur la nature en ville	26/04/2023	70
Itw_E4	Itw _{E4} Chargédémission	Réseau régional permettant d'accélérer l'innovation dans les travaux publics et le génie civil pour accompagner la transition énergétique, écologique et numérique des infrastructures	02/05/2023	63
Itw_E5	Directeur général ; Administrateur	Bureau d'études en ingénierie écologique ; Union professionnelle d'écologue	03/05/2023	30
Itw_E6	Maître de conférences en écologie ; Membre ; Président	Université ; Réseau d'écologues de la restauration ; Association d'acteurs de l'ingénierie écologique	05/05/2023	30
Itw_E7	Doctorant, membre d'un projet de recherche sur les impacts écologiques de la désimperméabilisation des sols	Établissement public national pour la transition écologique ; Association pour la promotion et le développement de la recherche et de l'expérimentation sur la nature en ville	09/05/2023	88
Itw_E8	Chef de projet sites pollués	Établissement public national pour la transition écologique	10/05/2023	115
Itw_E9	Écologue	Agence régionale de la biodiversité	16/05/2023	52
Itw_E10	Ingénieur proto aménagement	Organisme public local chargé de constituer des réserves foncières avant la phase de mise en œuvre des projets d'aménagement public	23/05/2023	30

Entretiens avec questionnaire :

Table A2: Liste des entretiens (avec questionnaire)

Identifiant entretien	Fonction	Description de l'organisation	Type d'organisation	Date	Durée (min)
Itw_01	Directeur	Bureau d'études et de conseil spécialisé dans les stratégies et techniques de régénération urbaine	Entreprise privée	20/06/2023	63
Itw_02	Responsable scientifique d'un programme de réhabilitation des sites et sols pollués	Organisme public national spécialisé dans l'application des sciences de la terre à la gestion des ressources et des risques du sol et du sous-sol	Institution publique	26/06/2023	60
Itw_03	Président	Bureau d'études en phytomanagement et restauration des sols dégradés	Entreprise privée	26/06/2023	59
Itw_04	Ingénieur de recherche	Bureau d'étude des sols spécialisé dans le diagnostic, la reconstitution ou la construction de sols, et la création de substrats fertiles	Entreprise privée	26/06/2023	55
Itw_05	Co-fondateur	Agence de paysagisme	Entreprise privée	28/06/2023	58
Itw_06	Chef de secteur	Entreprise de travaux publics spécialisée dans la déconstruction de bâtiments	Entreprise privée	30/06/2023	62
Itw_07	Coordinateur d'un programme sur les friches industrielles	établissement public national pour la transition écologique	Institution publique	30/06/2023	32
Itw_08	Ex-Directeur études, travaux, patrimoine et dépollution	Organisme public local chargé de constituer des réserves foncières avant la phase de mise en œuvre des projets d'aménagement public	Institution publique	03/07/2023	65
Itw_09	Responsable projets urbains	Bureau d'études et d'ingénierie pour la dépollution des sols agricoles par phytoremédiation	Entreprise privée	03/07/2023	84
Itw_10	Directeur adjoint de la stratégie et opérations foncières	Grande métropole (>1 million d'habitants)	Collectivité locale	05/07/2023	60
Itw_11	Consultant en écologie appliquée	Bureau d'études et de conseil en écologie et biodiversité urbaine	Entreprise privée	05/07/2023	56
Itw_12	Enseignant-Chercheur	Université, Unité de recherche sur les sols et l'environnement	Organisme de recherche	06/07/2023	63
Itw_13	Responsable du Pôle Ecosystèmes	Bureau d'études et d'ingénierie spécialisé dans les sites et sols pollués	Entreprise privée	07/07/2023	120
Itw_14	Chargé de mission « Nature en ville »	Entreprise de travaux publics spécialisée dans la construction et l'entretien de routes, d'infrastructures de transport et d'espaces publics	Entreprise privée	10/07/2023	25
Itw_15	Directeur scientifique et technique	Entreprise spécialisée dans le conseil en sciences du sol (agronomie, pédologie, écologie, écotoxicologie) et l'aménagement du territoire	Entreprise privée	10/07/2023	72
Itw_16	Architecte programmate	Agence d'architecture et d'urbanisme	Entreprise privée	10/07/2023	73
Itw_17	Chargé d'opération spécialiste sites et sols pollués	Organisme public local chargé de constituer des réserves foncières en amont de la phase de réalisation des projets d'aménagement public	Institution publique	11/07/2023	78
Itw_18	Ingénieur environnemental	Organisme public national spécialisé dans l'application des sciences de la terre à la gestion des ressources et des risques du sol et du sous-sol	Institution publique	11/07/2023	52
Itw_19	Chef de projet assistance à maîtrise d'ouvrage	Entreprise spécialisée dans l'architecture, l'urbanisme, la conception, l'ingénierie, la programmation, le conseil et la gestion de projet, liés à la transition écologique.	Entreprise privée	11/07/2023	30
Itw_20	Chef de projets sites et sols pollués	Organisme public local chargé d'établir des réserves foncières avant la phase de mise en œuvre des projets de développement public	Institution publique	13/07/2023	67
Itw_21	Expert assainissement et eaux pluviales	Établissement public régional chargé de la lutte contre les pollutions et de la protection des milieux aquatiques	Institution publique	13/07/2023	35
Itw_22	Chargé d'études et de formation	Association oeuvrant pour la promotion et le développement des compétences en matière de gestion intégrée de l'eau	Association	18/07/2023	40
Itw_23	Chef de projet	Bureau d'étude en hydrologie urbaine	Entreprise privée	19/07/2023	90
Itw_24	Ingénieur environnement	Bureau d'études en environnement (gestion des sites et sols pollués, réaménagement de friches industrielles, études d'impact sur la biodiversité)	Entreprise privée	19/07/2023	20
Itw_25	Chef de projets transition écologique	Organisme public local chargé de constituer des réserves foncières en amont de la phase de mise en œuvre des projets d'aménagement public	Institution publique	20/07/2023	39
Itw_26	Dirigeant	Bureau d'études et d'ingénierie sur les sols	Entreprise privée	24/07/2023	14
Itw_27	Chef de secteur ingénierie écologique et chargé de l'offre « nature en ville »	Filiale d'une société de génie civil spécialisée dans l'ingénierie écologique	Entreprise privée	26/07/2023	64
Itw_28	Directeur régional	entreprise spécialisée dans le traitement et la valorisation des déchets organiques, la lutte contre la pollution et l'assainissement des sols	Entreprise privée	27/07/2023	50

Table A3: Liste des entretiens (avec questionnaire) - Suite

Identifiant entretien	Fonction	Description de l'organisation	Type d'organisation	Date	Durée (min)
Itw_29	Chef de projet paysagiste urbaniste	Agence d'aménagement paysager et urbain	Entreprise privée	03/08/2023	64
Itw_30	Responsable mission R&D Bâtiment Durable	Grande métropole (>1M d'habitants), Département des bâtiments publics et de l'architecture	Collectivité locale	03/08/2023	42
Itw_31	Ingénieur travaux	Conseil en ingénierie environnementale et écologique	Entreprise privée	07/08/2023	46
Itw_32	Directeur et gérant	Bureau d'études et d'ingénierie des sols et du paysage	Entreprise privée	09/08/2023	165
Itw_33	Directeur laboratoire R&D	Bureau d'études et de conseil en gestion territoriale de l'eau	Entreprise privée	10/08/2023	34
Itw_34	Directeur général délégué	Bureau d'étude et d'ingénierie en matière d'aménagement du territoire, de construction et d'environnement	Entreprise privée	21/08/2023	48
Itw_35	Ingénieur sites et sols pollués	Entreprise de production et de fourniture d'électricité	Company	21/08/2023	101
Itw_36	Chargé d'intervention eau et pollutions	Organisme public régional chargé de la lutte contre la pollution et de la protection des milieux aquatiques	Institution publique	21/08/2023	69
Itw_37	Dirigeant	Entreprise de travaux publics spécialisée dans le terrassement, la démolition et les routes et réseaux divers	Entreprise privée	05/09/2023	55
Itw_38	Chef de projet gestion intégrée des eaux pluviales	Établissement public régional chargé de la lutte contre les pollutions et de la protection des milieux aquatiques	Institution publique	06/09/2023	50
Itw_39	Directeur	Société d'ingénierie écologique spécialisée dans la microbiologie des sols et les espaces verts	Entreprise privée	08/09/2023	54
Itw_40	Directeur développement	entreprise spécialisée dans la réutilisation et la valorisation agronomique des terres inertes issues des chantiers de terrassement	Entreprise privée	11/09/2023	58
Itw_41	Service de l'urbanisme et des espaces verts	Collectivité locale (>100 000 habitants)	Collectivité locale	15/09/2023	155
Itw_42	Chef de projet Assistance à maîtrise d'ouvrage	Bureau d'étude en agriculture urbaine	Entreprise privée	06/10/2023	68
Itw_43	Chef de projet gestion intégrée et durable des eaux pluviales	Collectivité locale (>100000 habitants), services publics d'eau et d'assainissement	Collectivité locale	12/10/2023	45
Itw_44	Responsable gestion opérationnelle des infrastructures	Collectivité locale (>50 000 habitants)	Collectivité locale	23/10/2023	63
Itw_45	Cadre travaux principal	Entreprise de travaux publics spécialisée dans la construction et l'entretien de routes, d'infrastructures de transport et d'espaces publics	Entreprise privée	08/11/2023	55
Itw_46	Chef de projets espace public	Grande métropole (>1 million d'habitants), Département des affaires territoriales	Collectivité locale	07/11/2023	80

4.1.2 Liste des documents de coûts

Table A4: Liste des documents collectés dont ont été extraits des coûts

Type de document	Type de projet	Date	ID dans la base de données	
Doc_1	Bordereau de prix plafond	Désimpermeabilisation et végétalisation d'une cour d'école	2019	Feuil20
Doc_2	Analyse interne d'un devis	Désimpermeabilisation et végétalisation d'une cour d'école	2019	Feuil22
Doc_3	Bordereau de prix plafond	Désimpermeabilisation et végétalisation d'une cour d'école	2019	Feuil21
Doc_4	Graph and Quote	Excavation and disposal of polluted soil	<i>Non dit</i> Doc_5	Tableau de données
<i>Non dit</i>	Feuil18			
Doc_6	Tableau de données	Non dit	<i>Non dit</i>	Feuil17
Doc_7	Tableau avec coûts de référence	Démolition de maisons individuelles	2017 - 2019	Feuil17
Doc_8	Tableau avec coûts de référence	Démolition de maisons mitoyennes	2018 - 2019	Feuil17
Doc_9	Tableau avec coûts de référence	Démolition de bâtiments tertiaires	2019 - 2020	Feuil17
Doc_10	Tableau avec coûts de référence	Démolition de hangars agricoles	2019	Feuil17
Doc_11	Tableau avec statistiques de coûts	Démolitions	2017-2020	Feuil17
Doc_12	Tableau de prix unitaires indicatifs	Désimpermeabilisation et gestion des eaux pluviales	2024	Feuil15
Doc_13	Tableau avec statistiques de coûts	Etapes multiples dans un processus de restauration des sols	Après 2010	Feuil14
Doc_14	Présentation publique (diaporama) et tableau de coûts (email)	Installation de technosols construits sur une friche non polluée	Around 2019	Feuil10
Doc_15	Demande de subvention à l'Agences de l'eau	Désimpermeabilisation et végétalisation d'une cour d'école	2020	Feuil8
Doc_16	Etude technico-économique avec budget provisionnel	Désimpermeabilisation de quatre cours d'école, plantation, étang, création d'habitats pour la biodiversité	2022	Feuil9
Doc_17	Demande de subvention à l'Agences de l'eau	Désimpermeabilisation et gestion des eaux pluviales dans un espace public	2022	Feuil7
Doc_18	Demande de subvention à l'Agences de l'eau	Réaménagement d'un lotissement, désimpermeabilisation et gestion des eaux pluviales	2022	Feuil6
Doc_19	Fiche projet	Micro-forêt urbaine	2021	Feuil11
Doc_20	Fiche projet	Jardin de pluie - désimpermeabilisation et gestion des eaux pluviales	2023	Feuil11
Doc_21	Fiche projet	Oasis urbaine	2023	Feuil11
Doc_22	Fiche projet	Oasis urbaine	2023	Feuil11
Doc_23	Diaporama, présentation en Webconférence	32 Micro-forêt urbaine	2023	Feuil11
Doc_24	DPGF, Décomposition du prix global et forfaitaire - lot VRD	Désimpermeabilisation et végétalisation d'une cour d'école	2021-2022	Feuil2
Doc_25	DPGF, Décomposition du prix global et forfaitaire - lot Espaces verts	Désimpermeabilisation et végétalisation d'une cour d'école	2021-2022	Feuil3
Doc_26	Description des coûts de travaux	Transformation d'un parking en forêt urbaine	2021	Feuil4
Doc_27	Rapport	Réhabilitation d'une friche industrielle	2010	Feuil12
Doc_28	Plan de gestion	Réhabilitation d'une friche industrielle polluée	2019	Feuil13
Doc_29	Rapport	Aménagement paysager intégrant une gestion alternative des eaux pluviales	2022	Feuil16
Doc_30	Rapport	Programme SITERRE (2015) , rapport sur les procédés de construction de Sols à partir de matériaux innovants en substitution à la terre végétale et aux granulats de carrière	2015	Feuil23
Doc_31	Rapport	ADEME et al. (2018) , rapport sur la reconversion des friches polluées	2018 (expérience feedback from 2010-2016)	Feuil24
Doc_32	Rapport	Taugourdeau et al. (2020) , rapport sur la réhabilitation des sols de friches non pollués	2020	Feuil25
Doc_33	Rapport	Deboeuf de Los Ríos et al. (2022) Rapport sur la renaturation des villes	2022	Feuil26
Doc_34	Site web	Assainissement des sols et des nappes	Last update on 2019	Feuil27

4.1.3 Questionnaire

Procédure d'entretien : Nous commençons par présenter l'objectif de notre étude et l'expert se présente ainsi que son domaine d'expertise. Nous lui montrons ensuite notre questionnaire écrit. Lorsque les entretiens sont menés par vidéoconférence, comme c'est le cas pour la majorité d'entre eux, nous utilisons simplement l'outil de partage d'écran. Lorsque l'entretien est réalisé en personne (un seul entretien), nous montrons une version imprimée du questionnaire. Pour les entretiens réalisés par téléphone (sans vidéo), nous avons envoyé le questionnaire à l'expert par courrier électronique.

Figure A1: Extrait du questionnaire

3. Structure du questionnaire pour chaque étape

- Définition de l'étape
- Description des sous-étapes
- Comment pensez-vous connaître cette étape ?
 - Très bien : c'est votre cœur de métier
 - Bien : vous côtoyez régulièrement des acteurs travaillant sur cette étape
- Vous allez donner des coûts :
 - HT
 - TTC

Coût des sous-étapes
Pour chaque sous-étape

- Êtes-vous en mesure de donner une estimation des coûts de cette sous-étape ?
 - Oui
 - Non
- Pourriez-vous estimer un coût minimum pour cette sous-étape ? (merci de mentionner que des nombres) _____
- Pourriez-vous estimer un coût maximum pour cette sous-étape ? (merci de mentionner que des nombres) _____
- Quelle est l'unité de coût ?
 - €/m²
 - €/m³
 - €/t
 - Autre : _____
- Quels seraient les facteurs susceptibles de faire varier ces coûts ?

4.1.4 Variables de la base de données

Structure et variables de la base de données de coûts :

- **Source:** (*chaîne de caractères*) Source des données, prend la valeur 'Entretien' si les données proviennent directement d'un entretien avec un expert, et 'Document' si les données ont été obtenues à partir d'un document transmis par un expert interrogé.
- **id_itw:** (*numérique*) numéro d'entretien ou de document.
- **Etape:** (*chaîne de caractères*) Nom de l'étape.
- **Sous_etape:** Nom de la technique.
- **Point_min:** (*numérique*) Estimation de coût, lorsqu'elle est donnée comme un minimum Estimation de coût, lorsqu'elle est donnée comme une médiane.
- **Point_max:** (*numérique*) Estimation de coût, lorsqu'elle est donnée comme un maximum.
- **Plage_mediane_min:** (*numérique*) Estimation de coût, lorsqu'elle est donnée comme un intervalle médian (par exemple, « il est d'environ 4-6€/m² »). Cette colonne prend le minimum de l'intervalle donné (par exemple, 4).
- **Plage_mediane_max:** (*numérique*) Estimation de coût, lorsqu'elle est donnée comme un intervalle médian (par exemple, « il est d'environ 4-6€/m² »). Cette colonne prend le maximum de l'intervalle donné (par exemple, 6).
- **Observation:** (*numérique*) Estimation de coût, lorsqu'elle est donnée comme une observation (tirée d'une expérience spécifique, d'un devis, etc.).
- **facteur_conversion:** (*chaîne de caractères*) Information donnée par l'expert ou le document aidant à la conversion en €/m² ou en €/unité majoritaire.
- **commentaire:** (*chaîne de caractères*) Commentaire sur l'estimation des coûts (par exemple, en détaillant ce qu'elle comprend).
- **Unite_cout:** (*chaîne de caractères*) Unité du coût (€/...).
- **unit_majoritaire_se:** (*chaîne de caractères*) Unité majoritaire au niveau de la technique (par exemple, le coût de la plantation d'arbres est généralement indiqué en €/arbre).

- **vers_unite_majoritaire:** (*numérique*) Coefficient utilisé pour convertir le coût donné en €/unité majoritaire de la technique à laquelle il appartient (sur la base des hypothèses formulées dans la feuille 2 de l'Excel) (voir ci-dessous).
- **vers_m2:** (*numérique*) Coefficient utilisé pour convertir le coût donné en €/m² (sur la base des hypothèses formulées dans la feuille 2 de l'Excel) (voir ci-dessous).
- **commentaire_vers_unite_majoritaire:** (*chaîne de caractères*) Justification du coefficient utilisé pour convertir le coût donné en €/unité majoritaire de la technique à laquelle il appartient.
- **commentaire_vers_m2:** (*chaîne de caractères*) Justification du coefficient utilisé pour convertir le coût donné en €/m².

4.1.5 Hypothèses pour la conversion des coûts en €/m²

Table A5: Hypothèses pour la conversion des coûts en €/m²

Hypotheses	Référence	Borne inf	Borne sup
Modification du revêtement			
Epaisseur revêtement	0.3333 metre	0.15 metre	0.5 metre
Largeur d'un mètre linéaire	1 metre	1.5 metre	0.5 metre
Epaisseur revêtement perméable	0.15 metre	0.08 metre	0.25 metre
Epaisseur graves	0.15 metre	0.08 metre	0.25 metre
Assainissement du sol			
Profondeur dépollution	2 metre	1 metre	3 metre
Un mètre cube de terre excavée fait :	1.8 tonnes	1.5 tonnes	2 tonnes
Travail du sol			
Profondeur réhabilitation	1.5 metre	0.5 metre	2.5 metre
Epaisseur de terre végétale	0.33 metre	0.15 metre	0.5 metre
Epaisseur de compost	0. 1 metre	0.05 metre	0.15 metre
Un mètre cube de terre végétale ou de terre fait :	1.8 tonnes	1.5 tonnes	2 tonnes
Un mètre cube de compost fait :	1.333 tonnes	1.1 tonnes	1.5 tonnes
Végétalisation			
Nombre de m2 par arbre	25 m2	30 m2	20 m2
Nombre de m2 par arbuste	2 m2	4 m2	1m2
Nombre de m2 par plant de vivace	0.166 m2	0.25 m2	0.125 m2
Nombre de m2 par massif arbustif	0.5 m2	1m2	0.25 m2
Epaisseur de paillage	0.05 m	0.03 m	0.08 m
Surface mare	100 m2	150 m2	50 m2
Volume d'une fosse d'arbre	8 m3	6 m3	10 m3
Gestion et suivi			
Coût de gestion est donné pour :	1 year	1 year	1 year
Surface du site	5000 m2	7000 m2	3000 m2
Nombre de visites par an	4 visits	2 visits	6 visits
On suppose un arbre/arbuste tous les :	5 m2	8 m2	3 m2
Gestion des déchets et terres excavées			
1m3 de déchets inertes correspond à	1.8 t	1.5 t	2 t
1m3 de déchets non dangereux correspond à	1.8 t	1.5 t	2 t
1m3 de déchets dangereux correspond à	1.8 t	1.5 t	2 t
1m3 de terre correspond à	1.8 t	1.5 t	2 t
1m3 de déchets inertes correspond à	0.5 m2	1 m2	0.333 m2
1m3 de déchets non dangereux correspond à	0.5 m2	1 m2	0.333 m2
1m3 de déchets dangereux correspond à	0.5 m2	1 m2	0.333 m2
1m3 de terre correspond à	0.5 m2	1 m2	0.333 m2

4.1.6 Hypothèses pour la construction d'itinéraires de restauration types

NB:

- Les analyses préalables sont incluses en supposant le même nombre d'analyses (5), avec un coût de 4€/m² par analyse, dans tous les itinéraires techniques.
- Le tableau A2 ci-dessous détaille les scénarios présentés dans la section Méthode ainsi que quelques variantes pour tester la robustesse des résultats aux hypothèses des itinéraires. Les résultats des scénarios avec les variantes se trouvent en Annexe 4.6.2.

Figure A3: Justifications des scénarios et de leur niveau associé d'ingénierie écologique

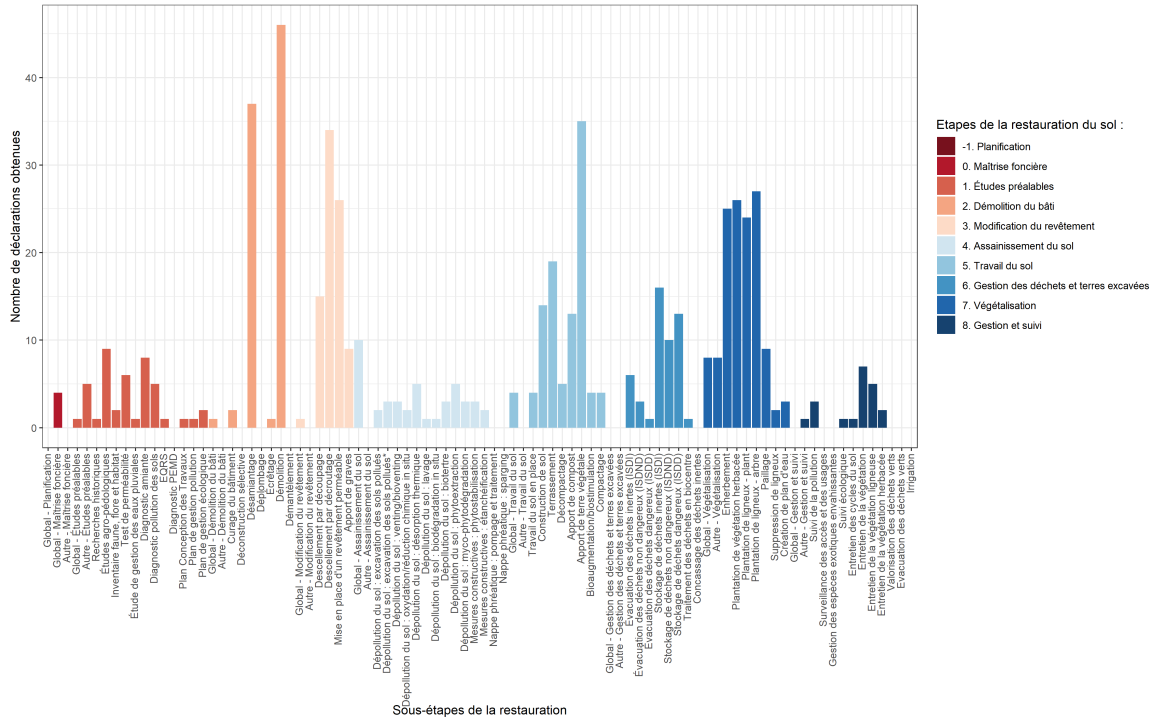
Restoration phase		Level of ecological engineering	Justification for the level of ecological engineering involved by each stage
Phase #1: Surface cleaning	Demolition of buildings Decreasing (Removal of impervious surfaces)	/	
Phase #2: Soil rehabilitation	(i) Soil excavation and replacement with topsoil Rehabilitation of non-polluted soil	Low	"Green space professionals currently use topsoil obtained from the stripping of agricultural lands (land reclaimed by urbanisation). ¹ The use of topsoil (see topsoil) poses problems on three levels: (i) non-renewable materials; (ii) ever greater distances to ensure supply (increasing economic and environmental costs); (iii) annually available resources are likely to become scarcer in the future given current urban planning policies aimed at limiting urban sprawl." (Programme JIRRENE, 2025)
	(ii) Soil decompaction and improvement (e.g. with compost)	Medium	According to Teague et al. (2020), the "Ecological rehabilitation" of a soil is based on ecological engineering (that not pedological engineering) and implies the following activities: weeding the soil (decompaction, plowing pits); Addition of micro-organisms (fungi, bacteria); followed by sowing and young trees (saplings). The authors find that 30 months after the ecological rehabilitation of the soil ("M2" soil in their paper), the soil's carbon content is lower than that of grassland soils, the "nutrient reservoir and supply" function is moderately impaired. As the soil was severely disturbed during the implementation of ecological engineering techniques (in particular, decompaction), it has not yet regained a level of biodiversity equivalent to that of a constructed technical "M3" soil in their paper, see below.
	(iii) Soil excavation and construction (construction of technical)	High	According to Teague et al. (2020), another way to improve the soil is to use "pedological engineering" techniques, and in particular to construct a soil, i.e. with the addition of large quantities of external materials. Soil construction implies excavation, addition and reuse of materials (e.g. from demolished buildings); a creation of soil horizons; followed by sowing and young trees (saplings). The authors find that 30 months after the soil construction ("M3" soil in their paper), the soil's carbon content is similar to that of grassland soils, the "nutrient reservoir and supply" function is assessed and it appears to be the soil with the greatest biodiversity (as compared to M2, see above).
Phase #3: Surface rehabilitation and management	(i) Soil excavation and replacement with topsoil Rehabilitation of polluted soil	Low	ADAME et al. (2026) states that "the majority of cases of management of brownfields and polluted sites (80% to 80%) in detail with using "off-site management" (i.e. implying excavation). In particular, excavation and disposal in landfills "is mainly carried out on sites with small areas of pollution (...) and short deadlines (...) due to the remediation method itself", which has the advantage of being rapid." However, "on-site and in-site soil decontamination techniques offer a better environmental balance (in terms, due to transport) than the disposal of polluted soil". (ADAME et al. (2026))
	(ii) Thermal or chemical in situ or on site depollution	Medium	ADAME et al. (2026) states that "in situ techniques (...) still appear to be poorly represented, such as venting/venting used in only 2% of operations or phytoremediation (3%)" in particular, "on-site or in situ techniques are preferred on sites with large volumes of impacted soil". However, "on-site and in-situ soil decontamination techniques offer a better environmental balance (in terms, due to transport) than the disposal of polluted soil" (ADAME et al. (2026)). See also SelectDegr. (2024) for more info on the use of such technique.
	(iii) Phytoremediation	High	According to Deboey De Los Rios et al. (2022) "in situ civil engineering techniques (replacement, physical/chemical processes, etc.), ecological engineering techniques akin to this (excavation, transport and left) with imported soil, raised spring for on-site restoration. To do this, the properties of certain micro-organisms such as bacteria and fungi (bioremediation) or of plant species (phytoremediation) can be used to decontaminate soil". However, Adams et al. (2018) indicates "in situ techniques (...) are still poorly represented, such as (...) phytoremediation (used in only 2% of operations)". A view shared in SelectDegr. (2024).
Phase #4: Surface rehabilitation and management	(i) Permeous paving	/	According to Deboey De Los Rios et al. (2022), "Permeous paving is a way to restore some functions of the soil but is not urban soil restoration per se. Indeed, according to Deboey De Los Rios et al. (2022), "Permeous paving is often confused with degrading, which involves restoring the permeability of topsoil, often using porous drainage pavements. Though an essential factor, degrading alone is not sufficient to restore the soil's ecological functions, Adams et al."
	(ii) Greening	Low	We follow Deboey De Los Rios et al. (2022), which states that "Unlike ecological engineering, greening often takes place with no connection to the climatic or geographical context, uses ill-adapted horticultural species and requires numerous inputs (topsoil, fertilizer, energy, irrigation, etc.), which means that these areas are not self-sufficient and are reliant on intensive management. (...) The objectives of greening are, for example, the French-style formal garden, lawns, monoculture planting, seasonal living walls, raised planters, flower meadows (even with non-local species, etc.) or food and purpose: "Using plants to make the urban environment more attractive, ornamentation"
	(iii) Ecological engineering	Medium or High	According to Deboey De Los Rios et al. (2022), "In urban soil restoration, ecological engineering (what they call "restructuring") is the choice of plants is no longer only determined by aesthetic criteria, instead focusing on local species and taking interactions with wildlife, soil and local conditions into account". It aims to "Restoring ecological functionalities, creating viable habitats in relation to the green and blue grid, water management, adapting to climate change."

¹ La « construction » du sol implique l'apport de matériaux extérieurs au site, tandis que la « reconstitution » du sol (non incluse dans nos itinéraires types) limite autant que possible cet apport.

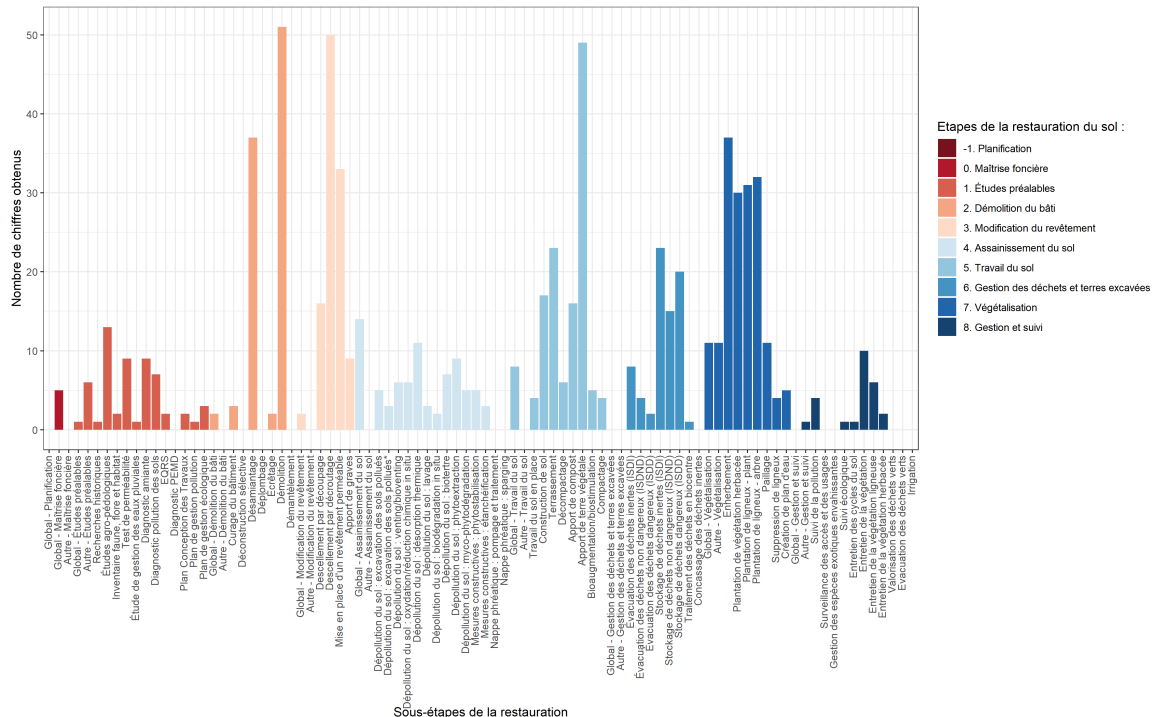
4.2 Statistiques descriptives - Base de données de coûts en €/m²

Figure A4: Nombre de lignes et d'estimations de coûts par technique (Base de données en €/m²)

(a) Nombre de lignes dans la base de données



(b) Nombre d'estimations de coûts dans la base de données



NB : une ligne dans la base de données représente une information provenant d'un expert ou d'un document sur une technique donnée. Une ligne peut contenir plusieurs estimations de coût, par exemple un minimum, un maximum et une médiane.

Table A6: Statistiques descriptives sur les estimations de coûts de la base de données

Etape	Nombre d'estimations de coûts	Observation	Médiane ou intervalle min-max
1. Études préalables	57	23 %	77 %
2. Démolition du bâti	95	81%	19 %
3. Modification du revêtement	110	51%	49 %
4. Assainissement du sol	79	8 %	92 %
5. Travail du sol	132	45 %	55 %
6. Gestion des déchets et terres excavées	71	28 %	72 %
7. Végétalisation	172	48 %	52 %
8. Gestion et suivi	25	48 %	52 %

Etape	Donné en m ²	Converti	Converti d'ha à m2	Document	Entretien
1. Études préalables	11%	46 %	44 %	12 %	88 %
2. Démolition du bâti	100 %	0 %	0 %	81%	19 %
3. Modification du revêtement	56 %	44 %	0 %	69 %	3 1%
4. Assainissement du sol	30 %	66 %	4 %	58 %	42 %
5. Travail du sol	33 %	61%	5 %	46 %	54 %
6. Gestion des déchets et terres excavées	0 %	100 %	0 %	38 %	62 %
7. Végétalisation	39 %	58 %	3 %	51%	49 %
8. Gestion et suivi	16 %	76 %	8 %	52 %	48 %

4.3 Définition des étapes et techniques

4.3.1 Planification

La planification englobe l'élaboration de stratégies territoriales et la création de documents cartographiques visant à intégrer des enjeux de la restauration des sols urbanisés dans les documents de planification régionale ou urbaine. Lors de notre enquête, nous avons identifié des actions de planification relatives à l'élimination des déchets¹⁴, la désimperméabilisation et la végétalisation. Il est également à noter que l'adoption de la loi « Climat et résilience » semble stimuler le développement de prestations de planification de la restauration des sols ou de cartographie des fonctions écologiques des sols. Les organismes publics de l'ingénierie territoriale, tels que les Cerema, l'Ademe ou encore les agences d'urbanisme publiques, contribuent de manière significative à ces opérations en élaborant des jeux de données, des cartes ou des méthodologies.

4.3.2 Maîtrise foncière

Dans le lexique de la stratégie foncière, la maîtrise foncière désigne l'opération par laquelle une organisation acquiert tout ou partie du faisceau de droits de propriété d'un bien foncier, en vue d'y mener une action déterminée. Elle ne se limite pas à l'acquisition, puisque de nombreux instruments et montages juridiques permettent d'obtenir ou contrôler des droits réels attachés à un terrain (Kamal et al., 2014).

Dans le cadre de la restauration des sols urbanisés, la maîtrise foncière vise à obtenir le pouvoir de conduire les activités projetées sur le site, mais aussi à contrôler l'accès et les usages du site dans la durée, ce qui revêt une importance singulière pour les opérations de restauration « passives », qui reposent sur des méthodes d'ingénierie écologique ou pédologique de longue durée, telle que les techniques de phytoremédiation des sols pollués. La maîtrise foncière est généralement assumée par la maîtrise d'ouvrage (collectivité locale, promoteur immobilier, État) ou l'aménageur d'un projet (société privée, mixte, société publique locale). En outre, les établissements publics fonciers jouent un rôle croissant en mettant leurs moyens d'action au service de la maîtrise foncière et de la maîtrise d'ouvrage pour faciliter la restauration des friches et délaissés urbains.

4.3.3 Études préalables

Les études préalables recouvrent l'ensemble des diagnostics effectués en amont de la conception des opérations pour orienter les procédés techniques. Ces études visent à caractériser certaines propriétés des sols, du bâti ou des milieux écologiques concernés, mais aussi à définir et planifier les modalités de gestion du site post-restauration. Elles comprennent notamment des analyses de pollution (généralement physiques ou chimiques), des études agropédologiques, des diagnostics hydrologiques et études d'infiltration ou encore des inventaires faune, flore, habitats. Ces tâches sont réalisées par des bureaux d'études avec des compétences spécifiques. Lorsque ces études impliquent la réalisation de carte, les acteurs peuvent s'appuyer sur les recommandations de la norme NF X31-560¹⁵ qui préconise les règles d'acquisition et de gestion des données pédologiques et indique la densité de sondage requise en fonction des échelles cartographiques.

¹⁴Entre autres, le Plan national de prévention des déchets et les Plans régionaux de prévention et de gestion des déchets (PRPGD).

¹⁵AFNOR, 2007. « Qualité des sols - Cartographie des sols appliquée à toutes les échelles - Acquisition et gestion informatique de données pédologiques en vue de leur utilisation en cartographie des sols ».

Table A7: Définitions des techniques de l'étape « Études préalables »

Technique	Définition
Recherches historiques	Collecte d'informations sur les usages passés des sols, les activités exercées, les produits utilisés et stockés, les pratiques de gestion, les accidents répertoriés pour établir un prédiagnostic des sols. [1]
Études agropédologiques	Caractérisation du potentiel agronomique des sols et de leur capacité à accueillir de la végétation. Ce type de diagnostic est généralement réalisé par des prélèvements de profils de sol (à la tarière) pour analyser des paramètres pédologiques (texture, profondeur, compacité) et agronomiques (pH, taux de matière organique, concentration en nutriment et autres espèces chimiques).
Inventaire faune, flore et habitat	Étude visant à caractériser l'état initial d'un site, du point de vue de ses enjeux écologiques notamment par la détermination des espèces ou habitats naturels protégés. Pour les projets soumis à étude d'impact au titre de la « Directive habitats » ^a , sa réalisation est obligatoire et permet d'évaluer l'impact écologique et de dimensionner les mesures d'atténuation. [2]
Test de perméabilité	Mesure de la capacité d'infiltration du sol. Essentielle pour la planification de la gestion des eaux pluviales et l'évaluation des impacts des constructions ou restaurations sur les fonctions hydrogéomorphologique des sols. Les méthodes les plus fréquentes sont les essais dits « Porchet », « Matsuo » et « Lefranc ».
Étude de gestion des eaux pluviales	Analyse visant à évaluer et dimensionner les infrastructures nécessaires pour la collecte et la gestion des eaux pluviales sur un site, en fonction de la perméabilité du sol et d'autres facteurs environnementaux.
Diagnostic amiante	Le Diagnostic amiante avant démolition (DAAD) consiste en l'évaluation des risques d'exposition à l'amiante de la population et des travailleurs lors de la démolition totale ou partielle d'un bâtiment.
Diagnostic pollution des sols	Ces diagnostics ont pour but d'identifier la présence de polluants, de caractériser les sources de pollution, de quantifier les pollutions et caractériser leurs mobilités, d'identifier les voies de transfert et les milieux exposés et de comprendre les mécanismes de propagation éventuels. [1]
EQRS	L'évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) vise à quantifier les risques pour la santé des populations engendrés par les pollutions présentes en fonction de l'usage actuel ou futur du site. Elle est généralement couplée à des études d'interprétation de l'état des milieux (IEM), qui estiment les risques de contamination des milieux avoisinant la source de pollution.
Diagnostic PEMD	Diagnostic relatif aux produits, équipements, matériaux et déchets (PEMD) attendus d'une opération de démolition ou de rénovation significative en vue, en priorité, de leur réemploi ou de leur valorisation. [3]
Plan Conception des Travaux	Document requis par la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, sa fonction est de faire la jonction entre les études et les travaux. Sur la base des différents scénarios de gestion étudiés, il doit permettre la vérification de leur faisabilité avant de s'engager dans la mise en oeuvre de l'un d'eux. Le plan de conception des travaux préfigure ainsi la rédaction du cahier des charges et/ou le dimensionnement des travaux qui seront réalisés. [5]
Plan de gestion pollution	Document d'orientation visant à synthétiser les études de caractérisation de la pollution d'un site et de son environnement pour étudier différents scénarios de gestion d'une pollution et définir la stratégie de gestion à appliquer en vue de la réalisation des travaux. [4]
Plan de gestion écologique	Document stratégique visant à préserver et améliorer la biodiversité et les fonctions écologiques d'un site, souvent inclus dans les projets de restauration nécessitant une autorisation environnementale.

Sources : Sauf mention explicite les définitions sont élaborées à partir de notre enquête. [1] Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2023). Guide – diagnostic des sites et sols pollués. [2] Ministère de la transition écologique (2020). Note technique du 5 novembre 2020 relative au cadrage de la réalisation et de la mise à jour des inventaires faune-flore dans le cadre des projets soumis à autorisation environnementale. [3] Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2024). Le diagnostic « produits, équipements, matériaux et déchets » (PEMD). [4] Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (2017). Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. [5] Ministère en charge de l'environnement (2019). Guide méthodologique relatif au Plan de Conception des Travaux (PCT).

4.3.4 Démolition du bâti

La démolition est un préalable indispensable pour les projets de restauration qui portent sur des sites bâtis. Cette étape implique les acteurs traditionnels du secteur des travaux publics (TP), ainsi que des organismes spécialisés pour les opérations de déconstruction ou démantèlement de sites industriels plus complexes. Elle peut également exiger la participation de professionnels certifiés pour la conduite de travaux de traitement de l'amiante et du plomb, qui font l'objet d'une réglementation stricte¹⁶.

¹⁶Pour pouvoir réaliser des opérations de diagnostic d'amiante et de travaux de désamiantage, une entreprise doit obtenir une certification qui sanctionne le respect des critères établis par la norme NF X46-010. Le régime juridique, les enjeux et les étapes pratiques des opérations de désamiantage sont décrits plus en détail dans le Doc_019

Table A8: Définitions des techniques de l'étape « Démolition du bâti »

Technique	Définition
Démantèlement (<i>Curage du bâtiment, démantèlement, déconstruction sélective</i>)	L'enlèvement des éléments non constructifs et non structurels d'un bâtiment (menuiseries, cloisons, bardages, etc.). Si le nettoyage a pour but de laisser le bâtiment « à nu » (murs et sols), dans le cas de la démolition, il sert principalement à récupérer et à réutiliser les éléments annexes du bâtiment. On parle de « démantèlement sélectif » lorsqu'il s'agit d'un diagnostic précis des ressources, matériaux et équipements qui peuvent être récupérés du bâtiment et des formes de démantèlement qui favorisent leur réutilisation.
Désamiantage	Le désamiantage vise à retirer et traiter les matériaux et équipements contenant de l'amiante dans un bâtiment. Lorsque la présence d'amiante est avérée, le désamiantage doit obligatoirement être effectué préalablement à la démolition, afin d'éviter la dissémination de l'amiante.
Déplombage	Le déplombage consiste à identifier, retirer et traiter les matériaux et équipements contenant du plomb. Il est doit obligatoirement être effectué préalablement à la démolition.
Ecrêtage	Utilisé pour les édifices de grande hauteur, l'écrtage consiste à démolir les bâtiments niveau par niveau. Une plateforme de travail installée au sommet de l'ouvrage et à l'intérieur permet aux engins de « grignoter » l'édifice de haut en bas.
Démolition	La démolition classique est réalisée par des procédés mécaniques à l'aide d'engins de travaux publics (pelle mécanique à bras) ou par des méthodes de démolition par explosif. equipment (mechanical shovel) or using explosive demolition methods.

Source : enquête.

4.3.5 Modification du revêtement

La modification du revêtement consiste à réaménager la couverture des sols urbanisés, généralement dans le but d'améliorer leur perméabilité. Généralement cette opération implique le descellement, c'est-à-dire le retrait des revêtements imperméables du sol tels que le goudron, le béton, les pavés ou autres enrobés. Ces matériaux peuvent éventuellement être remplacés par des revêtements perméables, tels que des bétons drainants, on parle alors de reperméabilisation. Les acteurs compétents pour réaliser cette opération sont les entreprises de TP et particulièrement celles spécialisées dans les travaux de voirie et réseau divers (VRD). La structure des chaussées perméables implique des aménagements qui sont généralement plus profonds qu'une chaussée classique [Itw_45]. Par conséquent le remplacement d'une chaussée classique par une chaussée perméable suppose généralement de recourir à du terrassement.

Table A9: Définitions des techniques de l'étape « modification du revêtement »

Technique	Définition
Descellement par découpage	Découpage du revêtement ou de la chaussée, généralement réalisé à l'aide de scie à disque (ou « scie à sol »).
Descellement par décroûtage	Retrait du revêtement du sol à l'aide de pelles mécaniques équipées de brise roche ou autres outils.
Mise en place d'un revêtement perméable	Aménagement d'une chaussée utilisant des matériaux perméables (dalles, pavés drainants, béton drainant). Selon les matériaux les coefficients d'infiltrations et la place de la végétation sont plus ou moins importants.
Apport de graves	Apports de gravier et autres granulats utiles à l'aménagement de chaussée ou au comblement de volumes excavés.

Source: enquête.

En matière de descellement, l'usage d'une méthode plutôt qu'une autre dépend en partie de l'échelle de la surface à traiter. Le découpage est plutôt employé sur des petites surfaces, il est plus ponctuel [Itw_16]. Les différentes techniques de descellement peuvent aussi être combinées. Ainsi, il est possible de délimiter la zone à desceller avec la scie (découpage) puis décroûter la surface [Itw_36]. Compte tenu du peu d'information chiffrée recueillie, nous avons exclu les techniques de fraisage / rabotage de chaussée, qui utilisent des machines du même nom (fraiseuse ou raboteuse) pour supprimer la couche supérieure d'une chaussée.

Pour être complet sur le déroulement de cette étape, il convient enfin de prendre en compte le traitement des déchets issus du descellement. Traditionnellement ceux-ci sont emmenés en décharge (voir ci-dessous), mais les procédés de recyclage se développent de plus en plus. Ainsi, le matériau composant la structure peut être fondu et réemployé, de même que le remblai formant les sous-couches de la chaussée [itw_45].

4.3.6 Assainissement du sol

Table A10: Définitions des techniques de l'étape "Assainissement du sol"

Technique	Définition
Dépollution du sol : excavation des sols pollués	L'excavation est la méthode la plus simple, radicale et rapide pour supprimer une source de pollution. Elle est réalisée une fois la source de pollution délimitée par les diagnostics. Elle doit nécessairement être accompagnée de méthodes de traitement et/ou stockage des terres excavées. <i>Nature du procédé : physique, ex situ (hors site ou sur site). NB : Les coûts signalés par un « * » comprennent l'excavation, les travaux de terrassement, le transport et le stockage. Les coûts sans « * » ne concernent que la seule excavation.</i>
Dépollution du sol : venting/bioventing	Le Venting consiste à extraire des polluants volatils par mise en dépression de la zone non saturée. Le Bioventing est un traitement biologique aérobie qui consiste à stimuler la biodégradation dans la zone non saturée par apport d'oxygène. <i>Nature du procédé : physico-biologiques, in situ</i>
Dépollution du sol : oxydation/réduction chimique in situ	L'Oxydation chimique in situ consiste à injecter un oxydant dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation. Cet oxydant va détruire totalement ou partiellement les polluants. Ce procédé permet donc d'aboutir à la destruction des polluants (aboutissant à la transformation en eau, gaz carbonique et sels) ou à la formation de sous-produits de dégradation généralement plus biodégradables. <i>Nature du procédé : chimique, in situ</i>
Dépollution du sol : désorption thermique	La Désorption thermique consiste à apporter une source de chaleur dans le sol en place ou excavé pour extraire certains polluants dits volatils et semi-volatils. <i>Nature du procédé : thermique, in situ ou ex situ (hors site ou sur site)</i>
Dépollution du sol : lavage	Ce procédé consiste à lessiver les sols par injection d'eau (et d'agents mobilisateurs en solution) en amont ou au droit de la source de pollution. Par la suite, les eaux polluées sont récupérées (ou pompées), traitées en surface puis rejetées dans les réseaux d'eaux usées/eaux pluviales ou dans certains cas réinjectées dans la nappe. <i>Nature du procédé : physico-chimique, in situ</i>
Dépollution du sol : biodégradation in situ	La Biodégradation nécessite l'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. Pour ce faire, les microorganismes sont maintenus dans les conditions optimales (oxygène, pH, température, potentiel d'oxydoréduction). <i>Nature du procédé : biologique, in situ</i>
Dépollution du sol : biotertre	Le Biotertre consiste à mettre des sols pollués en tas en vue d'un traitement biologique. Pour ce faire, les sols pollués font généralement l'objet d'un amendement et les conditions dans le Biotertre sont contrôlées (aération, ajouts de nutriments ...). <i>Nature du procédé : biologique, ex situ (sur site ou hors site)</i>
Dépollution du sol : phytoextraction	La Phytoextraction consiste à extraire des polluants présents dans le sol à l'aide d'espèces végétales, avec ou sans ajout d'amendements. Les plantes absorbent les polluants du sol via leurs racines, transfèrent et accumulent les polluants dans leurs parties aériennes récoltables (tiges, feuilles), ce qui permet de réduire les concentrations de polluant dans les sols. Il s'agit d'une dépollution partielle car la plante n'a accès qu'à la fraction biodisponible des polluants. <i>Nature du procédé : biologique, in situ</i>
Dépollution du sol : myco-phytodégradation	La Phytodégradation est une technique de dépollution qui consiste à dégrader des polluants organiques en composés plus simples et moins toxiques à l'aide d'espèces végétales et de microorganismes, avec ou sans ajout d'amendements. Il s'agit d'une technique de dépollution partielle car seule la fraction dite « biodisponible » des polluants leur est accessible. <i>Nature du procédé : biologique, in situ</i>
Mesures constructives : phytostabilisation	La Phytostabilisation consiste à immobiliser des polluants inorganiques à l'aide d'espèces végétales, avec ou sans ajout d'amendements. Les plantes réduisent les transferts horizontaux et verticaux de polluants en diminuant leur mobilité dans le sol, les eaux et l'air. Ce n'est pas une technique de dépollution (les polluants restent en place). <i>Nature du procédé : biologique, in situ</i>
Mesures constructives : étanchéification	L'étanchéification est ici employée pour désigner l'ensemble des techniques de confinement physique par couverture (terreuse, semi-perméable ou imperméable). Ces méthodes visent à isoler les contaminants pour prévenir leur propagation. <i>Nature du procédé : confinement, in situ</i>
Nappe phréatique : pompage et traitement	Le Pompage et traitement consiste à extraire les eaux souterraines polluées et à les traiter sur site avant rejet (ou à les éliminer en centres agréés). Le type de traitement varie en fonction des polluants, des débits et des pourcentages épuratoires à atteindre. <i>Nature du procédé : physique, in situ</i>
Nappe phréatique : sparging	Le Barbotage in situ, communément rencontré sous la dénomination anglosaxonne "sparging", repose sur le même principe que le Venting, mais s'applique à la zone saturée et dans la frange capillaire. Aussi, l'air injecté dans la nappe (et non dans la zone non saturée comme pour le venting) va favoriser la volatilisation des polluants qui seront extraits au niveau de la zone vadose et traités sur site. <i>Nature du procédé : physique, in situ</i>

Source : toutes les définitions exposées dans ce tableau sont issues du centre de ressource <https://selecdepol.fr/> (consulté le 27/06/2024).

Dans la proposition de directive de la Commission européenne relative à la surveillance et la résilience des sols, l'assainissement du sol désigne les actions visant à « réduire, isoler ou immobiliser des concentrations de contaminants dans le sol » (COM/2023/416 final, Article 3). Cette étape correspond donc à la gestion de la pollution du sol. Elle inclut diverses techniques de dépollution, mais aussi des

mesures constructives permettant de contenir ou confiner les éléments contaminants. Le centre de ressource « SelecDépol », administré par l’Ademe et le BRGM, recense 38 techniques de dépollution et 26 de mesures constructives, plus ou moins utilisées, classées en quatre catégories de procédés : physico-chimiques, thermiques, biologique et confinement. Elles se distinguent aussi par leurs modes de mise en oeuvre : les techniques in situ sont appliquées directement sur le sol en place, sans excavation, alors que les techniques ex situ sont appliquées après excavation, soit sur site soit hors site dans des centres de traitement adaptés.

En France, l’assainissement des sols fait l’objet d’un encadrement juridique strict et précis visant la réduction des risques sanitaires et environnementaux liés à la pollution des sols. Les opérations d’assainissement menées ne visent donc pas tant l’amélioration de la santé des sols que leur mise en conformité sanitaire. Pour faciliter l’opérationnalisation de ce régime juridique, le ministère en charge de l’Environnement a produit une « méthodologie nationale pour la gestion des sites et sols pollués » qui détaille les différentes étapes et procédures que doit respecter une opération de mise en conformité sanitaire. Cette méthodologie est traduite par une série de norme NF X31-620¹⁷ d’application obligatoire qui structure l’action des organisations du secteur.

4.3.7 Travail du sol

Table A11: Définitions des techniques de l’étape « Démolition du bâti »

Technique	Définition
Travail du sol en place	Dénomination générique pour l’ensemble des techniques d’amélioration des processus du sol (par exemple : décompactage ou apport de compost) n’impliquant ni l’excavation ni le remplacement du sol par des matériaux importés.
Construction de sol	Création d’un anthrosol assurant un niveau de fonctionnalité élevé, mais différant en termes de structure et de fonction de l’original. Cette méthode de génie pédologique met en place un sol structuré en couches ou horizons fonctionnels construits majoritairement à partir de matériaux techniques (minéraux, organiques ou organo-minéraux), et créés en fonction des services écosystémiques recherchés. Elle se distingue de la reconstitution de sol par les quantités de matériaux exogènes mobilisées beaucoup plus importantes et par le caractère multifonctionnel plus réfléchi du sol à construire qui peut répondre à un cahier des charges précis. [1]
Reconstitution de sol	La reconstitution de sol intervient lorsque les sols en place ne possèdent pas des propriétés agronomiques favorables à la croissance et au développement des végétaux. Elle vise à associer les matériaux pédologiques du site avec des matériaux transportés, remaniés et installés sur place visant à améliorer la fertilité des sols affectés à des usages de jardins, parcs et espaces verts. [1]
Terrassement	Ensemble des travaux de fouille, de transport, d’entassement de terre, pratiqués pour modifier le relief d’un terrain, permettre de réaliser ou renforcer certains ouvrages. [2]
Décompactage	Technique visant à aérer le sol pour améliorer ses fonctions biologiques et hydrologiques. Elle est généralement réalisée par des procédés mécaniques (mobilisant des outils agricoles), mais peut aussi s’appuyer sur des méthodes biologiques.
Apport de compost	Ajout d’amendements organiques pour stimuler la fertilité du sol en place ou dans le cadre d’opérations de reconstitution de sol.
Apport de « terre végétale »	Ajout de substrats fertiles répondant à la norme du produit « support de culture » ^a . Traditionnellement, ceux-ci sont prélevés dans des terrains agricoles, mais des filières se structurent pour produire des « supports de culture » à partir de recyclage de terres excavées et autres déchets urbains.
Bioaugmentation/biostim	Apport de consortium fongique ou bactérien sur site ou hors site pour stimuler les processus biologiques du sol ou de support de culture.
Compactage	Technique de génie civil visant à réduire les espaces poreux d’air et d’eau dans le sol. Dans le cadre des opérations de restauration des sols, elle peut être utilisée à la marge pour créer des voies de circulation avec une portance suffisante pour les engins de chantier, ou encore pour la création de chaussées perméables.

Sources : Sauf mention explicite les définitions présentées sont issues de notre enquête. [1] Quadru F, Bâlon P., Limasset E., Malherbe A. (2021). Le génie pédologique pour recréer des sols fertiles ... Projet SOILval. [2] Trésor de la langue française informatisé (dictionnaire).

Étape clé du processus de restauration, le travail du sol recouvre un ensemble d’interventions visant à agir sur la composition, la structure ou la géomorphologie des sols, dans le but d’améliorer leurs fonctions biologiques, géochimiques et hydrogéomorphologiques¹⁵. On peut distinguer schématiquement

¹⁷AFNOR (2021). NF X31-620 “Prestations de services relatives aux sites et sols pollués”

deux situations. Dans les cas où il s'agit d'intervenir sur les sols en place, la refunctionalisation implique généralement des opérations de décompactations physique ou biologique, ou des modifications du relief, poursuivant des objectifs paysagers ou d'amélioration de l'infiltration. Ces pratiques sont typiquement menées par des entreprises de terrassement ou de paysagisme.

Lorsque le sol initial a été excavé, par exemple dans le cadre d'opérations d'assainissement, il est généralement comblé avec des remblais et des produits divers d'excavation, parfois complété par des apports de terres végétales. Ces cas peuvent aussi être traités par des procédés, encore expérimentaux, de génie pédologique, visant à reconstituer ou créer de toutes pièces des « sols » fonctionnels, désignés comme « anthroposols reconstitués » et « anthroposols construits » dans le Référentiel pédologique de l'Association française d'étude du sol (Baize Girard, 2009, p. 92-94; Séré et al., 2008; Vidal-Beaudet, 2018). Outre les bureaux d'étude et d'ingénierie pédologique, ces opérations impliquent aussi les producteurs et distributeurs de différents matériaux qui sont employés : déchets de chantier, terres végétales, amendements fertiles et composts. Enfin, l'ensemble de techniques relevant du travail du sol peut être associé à des opérations de fertilisation chimique ou biologique et de végétalisation des sols.

4.3.8 Gestion des déchets et terres excavées

La gestion des déchets et terres excavées recouvre les opérations d'évacuation, de traitement, de stockage et de recyclage des terres issues de l'excavation ainsi que des déchets techniques provenant de la démolition du bâti ou du descellement des revêtements. Ces matériaux sont généralement transportés par les entreprises de TP, vers des centres spécialisés qui se chargent du tri, de l'élimination et du stockage des déchets. La Directive européenne relative aux déchets¹⁸, transcrite dans le code de l'environnement¹⁹, distingue trois catégories de déchets : déchets non dangereux inertes (appelés déchets inertes), déchets non dangereux et déchets dangereux²⁰.

Table A12: Définitions des techniques de l'étape « Gestion des déchets et terres excavées »

Technique	Définition
Évacuation des déchets inertes	Transport de déchets inertes vers les centres de traitement appropriés
Évacuation des déchets non dangereux	Transport de déchets non dangereux vers les centres de traitement appropriés
Évacuation des déchets dangereux	Transport de déchets dangereux vers les centres de traitement appropriés
Stockage de déchets inertes en ISDI	Prise en charge des déchets inertes par une installation de traitement et stockage appropriée.
Stockage de déchets non dangereux en ISDND	Prise en charge des déchets non dangereux par une installation de traitement et stockage appropriée.
Stockage de déchets dangereux en ISDD	Prise en charge des déchets dangereux par une installation de traitement et stockage appropriée.
Traitement des déchets en biocentre	Les biocentres permettent de traiter certains de type de pollution de terres excavées par voie biologique.
Concassage des déchets inertes	Le concassage est une méthode de destruction qui permet de réduire des matériaux souvent lourds et encombrants comme la roche ou le béton en petites particules appelées granulats.

Source: enquête.

À ces trois catégories de déchets correspondent trois types de centres de traitement et stockage : les installations de stockage de déchets inertes (ISDI), de déchets non dangereux (ISDND) et de déchets dangereux (ISDD). Ces installations sont soumises au régime juridique des Installations classées pour

¹⁸Directive (UE) 2018/851 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 modifiant la directive 2008/98/CE relative aux déchets (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE).

¹⁹Voir la section « Installations de traitement des déchets » (Code de l'environnement, articles L541-22 à L541-30-3).

²⁰Voir Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires (2024). Différentes catégories de déchets. Consulté le 8 juillet 2024 à l'adresse : <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/differentes-categorie-dechets>.

la protection de l'environnement (ICPE), avec des niveaux de prescription techniques et réglementaires croissant avec la catégorie de déchets.

4.3.9 Végétalisation

La végétalisation recouvre toutes les actions de plantations intentionnelles et d'entretien de végétaux dans les sols (végétation herbacée, arbres matures ou plants). Ces opérations peuvent viser la refunctionalisation des sols. Au croisement entre génie écologique et génie pédologique, le génie végétal, en particulier, s'appuie sur les propriétés mécaniques et biologiques des végétaux pour assainir (phytoremédiation, voir ci-dessus), stabiliser ou encore décompacter les sols urbanisés (Rey et al., 2015). Toutefois, la majorité des actions de végétalisation ne visent pas explicitement la restauration du sol, mais plutôt l'aménagement d'espaces urbains végétalisés pour des motifs paysagers, agronomiques ou écologiques (Aragau, 2022; Baysse-Lainé et al., 2022; Clergeau et Blanco, 2022). Elle mobilise les métiers de l'horticulture, du paysagisme, de l'agronomie urbaine ainsi que de l'écologie urbaine et du génie écologique.

Table A13: Définitions des techniques de l'étape « Végétalisation »

Technique	Définition
Enherbement	L'enherbement consiste à ensemercer les sols. Cela peut viser à les stabiliser, prévenir l'érosion, stimuler les processus biologiques ou poursuivre des objectifs ornementaux et paysagers.
Plantation de végétation herbacée	Implantation de plantes herbacées, souvent fournies en godets.
Plantation de ligneux - plant	Implantation de végétation ligneuse sous forme de plant.
Plantation de ligneux - arbre	Implantation de végétation ligneuse sous forme d'arbres matures, aussi appelés « tiges ».
Paillage	Le paillage consiste à couvrir le sol de matériaux organiques, minéraux ou artificiels pour le nourrir et/ou le protéger.
Suppression de ligneux	Retrait de plantes ligneuses indésirables pour restaurer ou entretenir les habitats et paysages.
Création de plans d'eau	Aménagement d'une zone pour former un étang, une mare ou un bassin, dans le but de gérer les eaux de ruissellement, favoriser la biodiversité aquatique et créer des habitats humides.

Source: enquête.

4.3.10 Gestion et suivi

Cette étape recouvre l'ensemble des opérations nécessaires pour assurer le bon fonctionnement écologique et l'entretien des sols et milieux restaurés. Cela inclut des opérations de maintenance et d'entretien des habitats, du sol ou des végétaux ou encore des dispositifs de surveillance du site. Selon les modalités de restauration des sols retenues lors de la conception, ces coûts peuvent représenter une part significative du coût total de l'opération.

Ces opérations de gestion peuvent notamment découler de la mise en oeuvre d'obligations légales et réglementaires. Dans le cadre des opérations d'assainissement, la méthodologie nationale SSP peut requérir la réalisation d'opérations de suivi (« surveillance environnementale ») pour vérifier l'efficacité des mesures de mise en conformité sanitaire dans la durée. Dans le cas où l'opération de restauration a nécessité une autorisation environnementale, au titre des « espèces protégées » ou de la protection des zones humides, la gestion peut consister à s'assurer de la mise en oeuvre effective dans la durée des mesures de réduction, de compensation et d'accompagnement prescrites.

La prise en charge des opérations de gestion dépend généralement du régime de propriété des espaces visés : acteurs privés ou collectivités sur les espaces publics urbains, parfois des établissements publics.

Table A14: Définitions de techniques for the ‘Management and monitoring’ step

Technique	Définition
Suivi de la pollution	La méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués prévoit des actions de suivi et d'évaluation ex post de l'efficacité des méthodes de mise en conformité sanitaire des sites traités.
Surveillance des accès et des usages	Lorsque les méthodes de restauration retenues nécessitent un déploiement dans la durée (comme la phytoremédiation), le site traité doit être mis en défens. Il faut alors prévoir des dispositifs de surveillance du site.
Gestion des espèces exotiques envahissantes	Toute action létale ou non létale, visant à l'éradication, au contrôle d'une population ou au confinement d'une population d'une espèce exotique envahissante, tout en réduisant autant que possible les incidences sur les espèces non visées et leurs habitats. [1]
Suivi écologique	Suivi de valeurs écologiques du site dans la durée. Il est notamment obligatoire dans les cas de figure où l'opération requiert une autorisation environnementale – au titre de la loi sur l'eau ou des espèces protégées – afin de vérifier l'efficacité des mesures de réduction et de compensation dans la durée.
Entretien des cycles du sol	L'entretien du sol consiste à maintenir et stimuler le développement de ses propriétés en fonction des services écosystémiques recherchés par l'opération de restauration. Elles peuvent notamment avoir pour but d'entretenir la fertilité ou la perméabilité des sols, en recourant à des techniques mécaniques, chimiques ou biologiques.
Entretien de la végétation	Travaux d'entretien, de maintenance et de gardiennage des espaces verts et végétaux implantés par l'opération de restauration. Cela inclut l'irrigation, l'entretien de la végétation (tonte, taille, coupe, élagage) et la valorisation et l'élimination des déchets verts.

Source : Sauf mention explicite les définitions présentées sont issues de notre enquête. [1] Article 3 du Règlement UE n° 1143/2014 du Parlement européen et du Conseil relatif à la prévention et à la gestion de l'introduction et de la propagation des espèces exotiques envahissantes. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/1143/oj>

4.3.11 Références

- Aragau, C. (2022). La relocalisation des terres agricoles en ville : Des sols et des paysages à (re)connaître. *Projets de paysage. Revue scientifique sur la conception et l'aménagement de l'espace*, 27, Article 27. <https://doi.org/10.4000/paysage.31430>.
- Baize, D., and Girard, M.-C. (2009). *Référentiel pédologique 2008 (édition 2008)*. Quae.
- Baysse-Lainé, A., Cormier, L., and Gaulier, K. (2022). Gestion des sols et des substrats pour la nature et l'agriculture urbaines à Strasbourg : Vers un renouvellement des représentations et des pratiques des circulations de matière ? *Projets de paysage. Revue scientifique sur la conception et l'aménagement de l'espace*, 27, Article 27. <https://doi.org/10.4000/paysage.31236>.
- Kamal, S., Grodzińska-Jurczak, M., and Brown, G. (2014). Conservation on private land: a review of global strategies with a proposed classification system. *Journal of Environmental Planning and Management*, 58(4), 576–597. <https://doi.org/10.1080/09640568.2013.875463>
- Clergeau, P., and Blanco, E. (2022). Projets urbains régénératifs : De l'idée à la méthode. *Métropolitiques*. <https://metropolitiques.eu/Projets-urbains-regeneratifs-de-l-idee-a-la-methode.html>.
- Rey, F., Crosaz, Y., Cassotti, F., and de Matos, M. (2015). Génie végétal, génie biologique et génie écologique : Concepts d'hier et d'aujourd'hui. *Sciences Eau & Territoires*, Numéro 16(1), 4-9. <https://doi.org/10.3917/set.016.0004>.
- Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Sauvage, C., Renat, J.-C., and Morel, J. L. (2008). Soil construction : A step for ecological reclamation of derelict lands. *Journal of Soils and Sediments*, 8(2), 130-136. <https://doi.org/10.1065/jss2008.03.277>.
- Vidal-Beaudet, L. (2018). Du déchet au Technosol fertile : L'approche circulaire du programme français de recherche SITERRE. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-série 31. <https://doi.org/10.4000/vertigo.21887>.

4.4 Illustration : projets de restauration de sols urbains réels

Figure A5: Jardins joyeux - Aubervilliers

(a) Avant



(b) Après



Crédits photos: Wagon Landscaping (Gauche) et Auteurs (Droite).

Note sur le projet : Le projet consistait à convertir un sol imperméabilisé (parking) en un sol couvert d'une végétation soigneusement sélectionnée (jeunes arbres, diversité de plantes locales adaptées aux sols pauvres). Le pavage n'a été que cassé mais pas enlevé pour limiter les coûts de transport, et la gestion de la végétation est très limitée (proche de la libre évolution).

Figure A6: Cour Oasis - Paris

(a) Avant



(b) Après



Crédits photos: CAUE de Paris

Figure A7: Rue de la Providence - Paris

(a) Avant



(b) Après



Crédits photos: LPLT — Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=104745596> (Gauche) et Auteurs (Droite)

Figure A8: Le 8ème Cèdre - Lyon

(a) Avant



(b) Après



Crédits photos: Google Earth Pro (Gauche) et Place au Terreau / Le Grand Romanesco (Droite)
Note sur le projet : Le projet consistait à convertir un sol imperméabilisé (parking) en un potager urbain.

Figure A9: Lisière d'une Tierce Forêt - Aubervilliers

(a) Avant



(b) Après



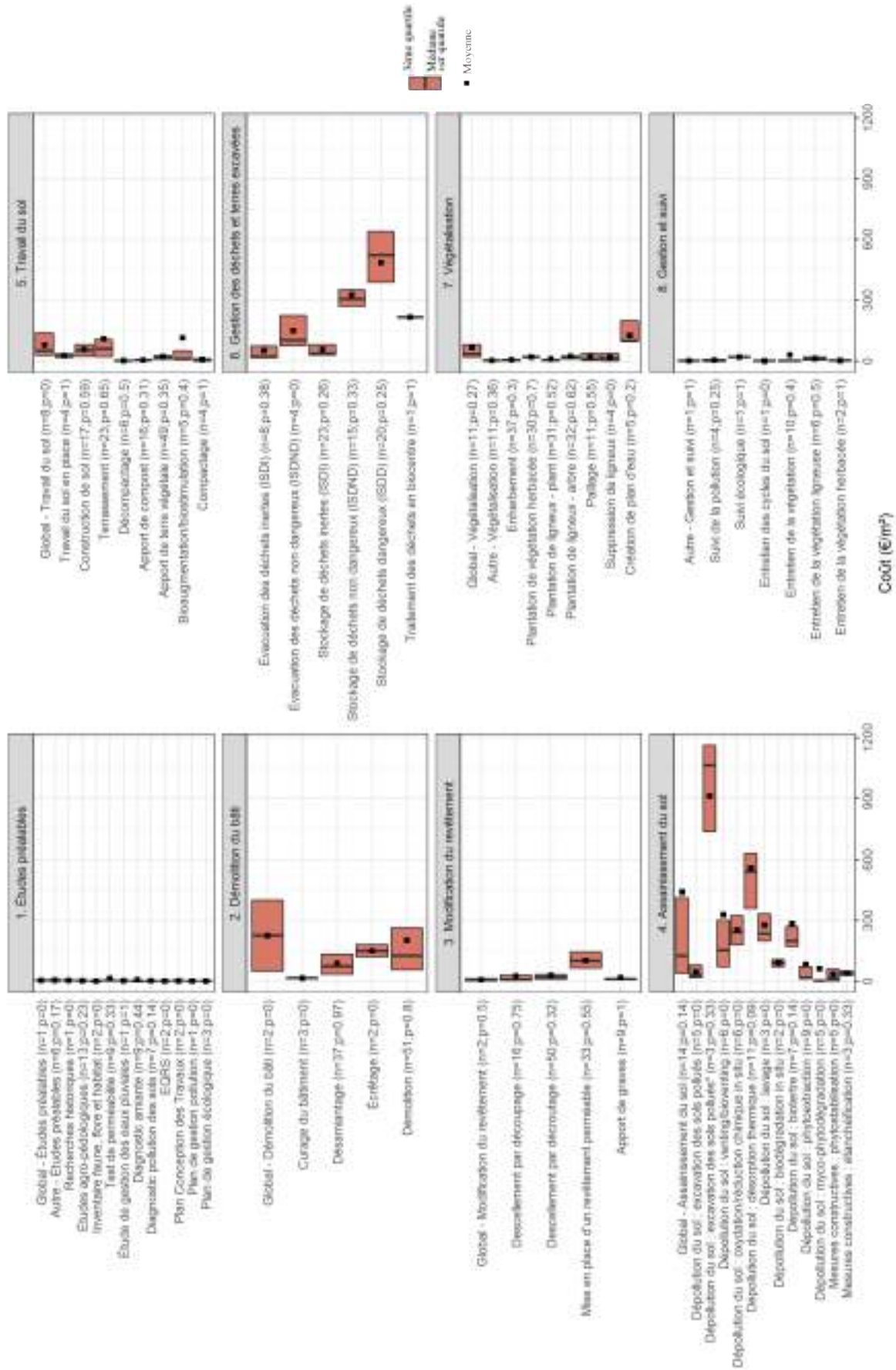
Crédits photos: Fieldwork Architecture (Gauche) et Auteurs (Droite)

Note sur le projet : Le projet consistait à convertir un sol imperméabilisé (parking) en une forêt urbaine grâce à un revêtement poreux. Dans cet article, nous soutenons cependant que, bien que le pavage poreux ait amélioré certaines fonctions du sol, il ne peut pas être considéré comme une « restauration du sol » à proprement parler.

4.5 Résultats additionnels

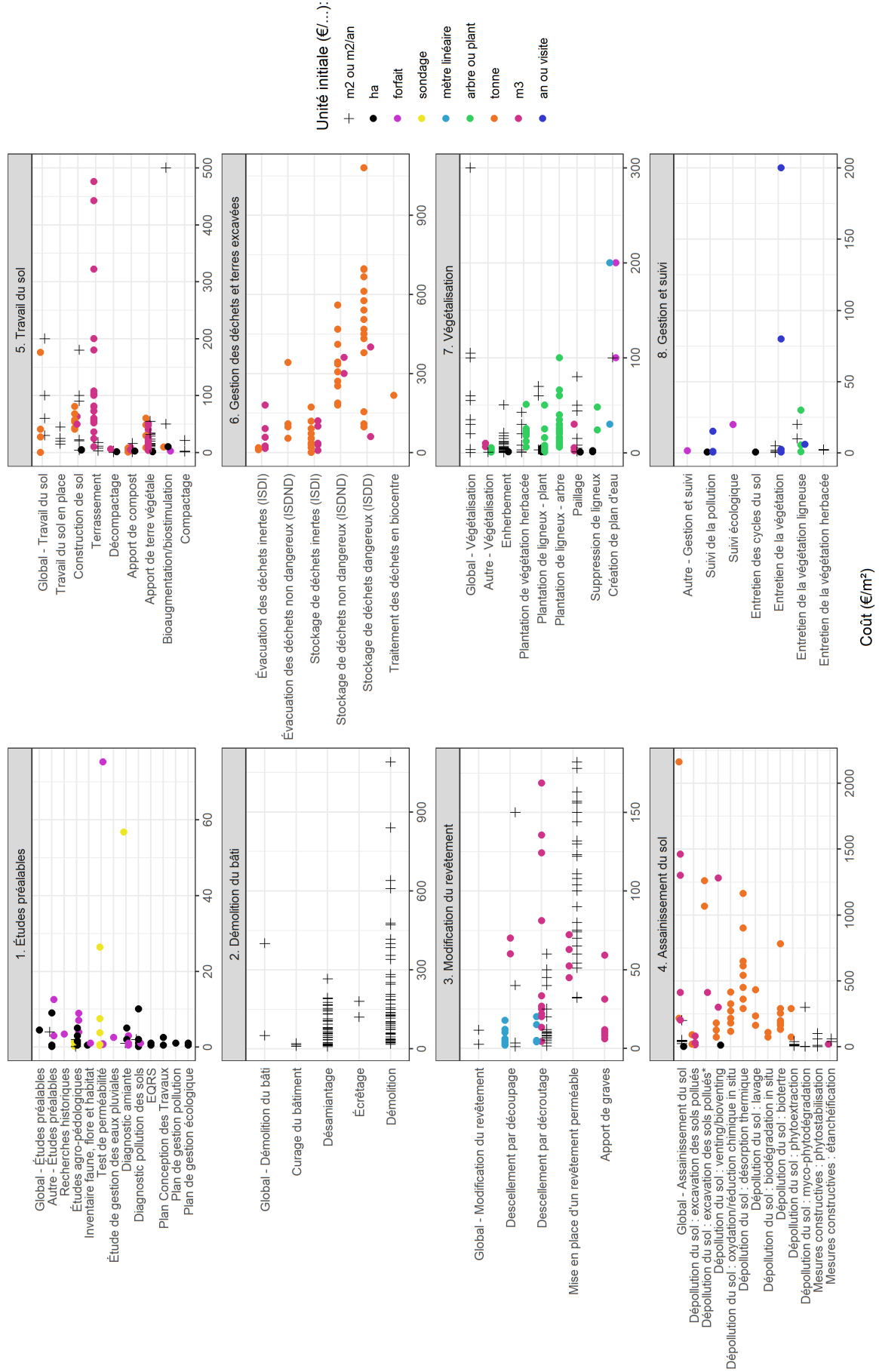
4.5.1 Coûts en €/m²

Figure A10: Coûts des techniques (en €/m²) - Distribution avec axe des abscisses commun



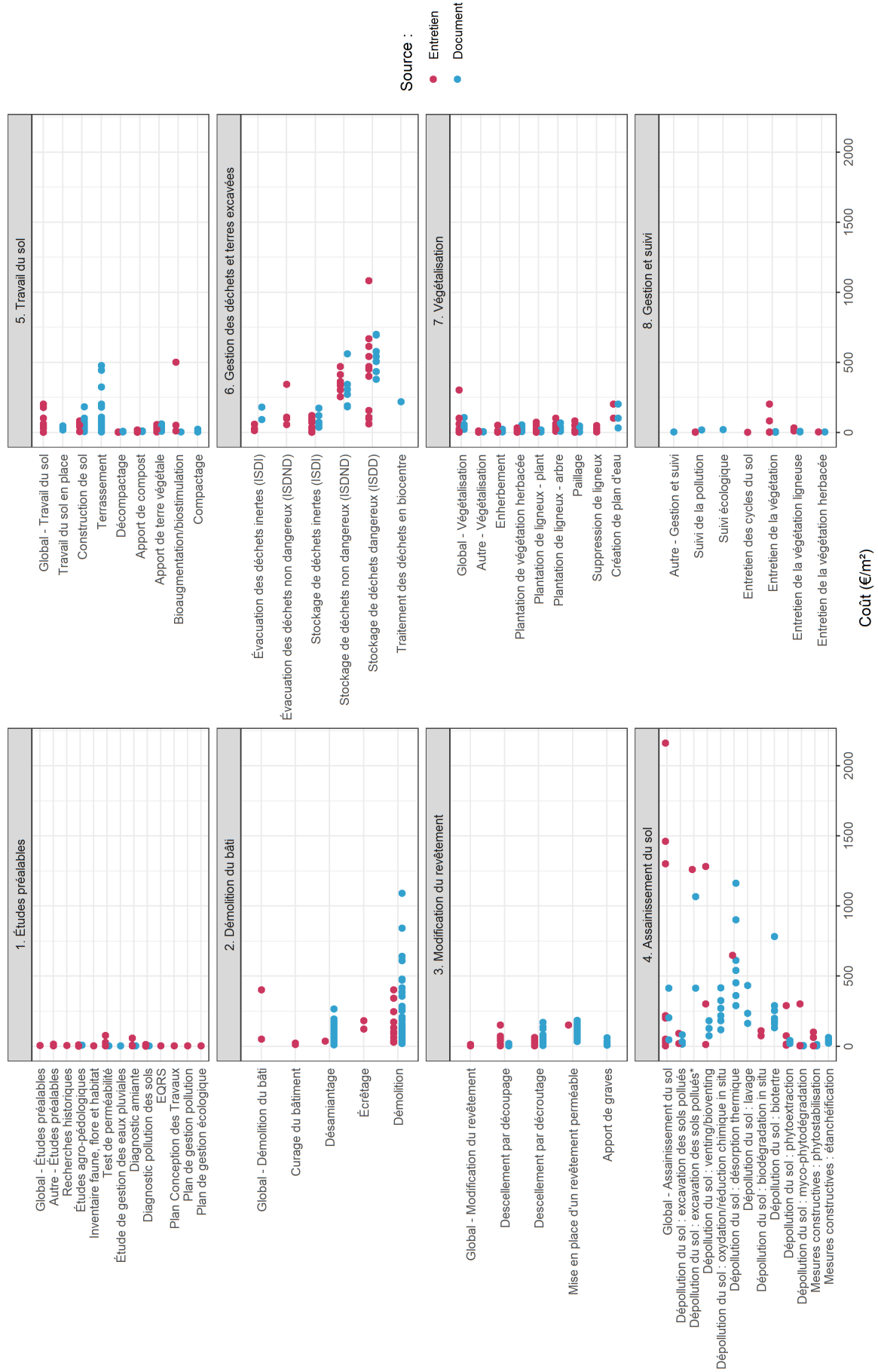
Note: n indique le nombre de coûts utilisés pour construire la distribution, p indique la part de ces coûts qui sont du type « observation » par opposition aux statistiques.
 *Ici, les coûts d'excavation comprennent également les travaux de terrassement, le transport et le stockage.

Figure A11: Coûts des techniques (en €/m²) - Par unité de coûts initiale



*Ici, les coûts d'excavation comprennent également les travaux de terrassement, le transport et le stockage.

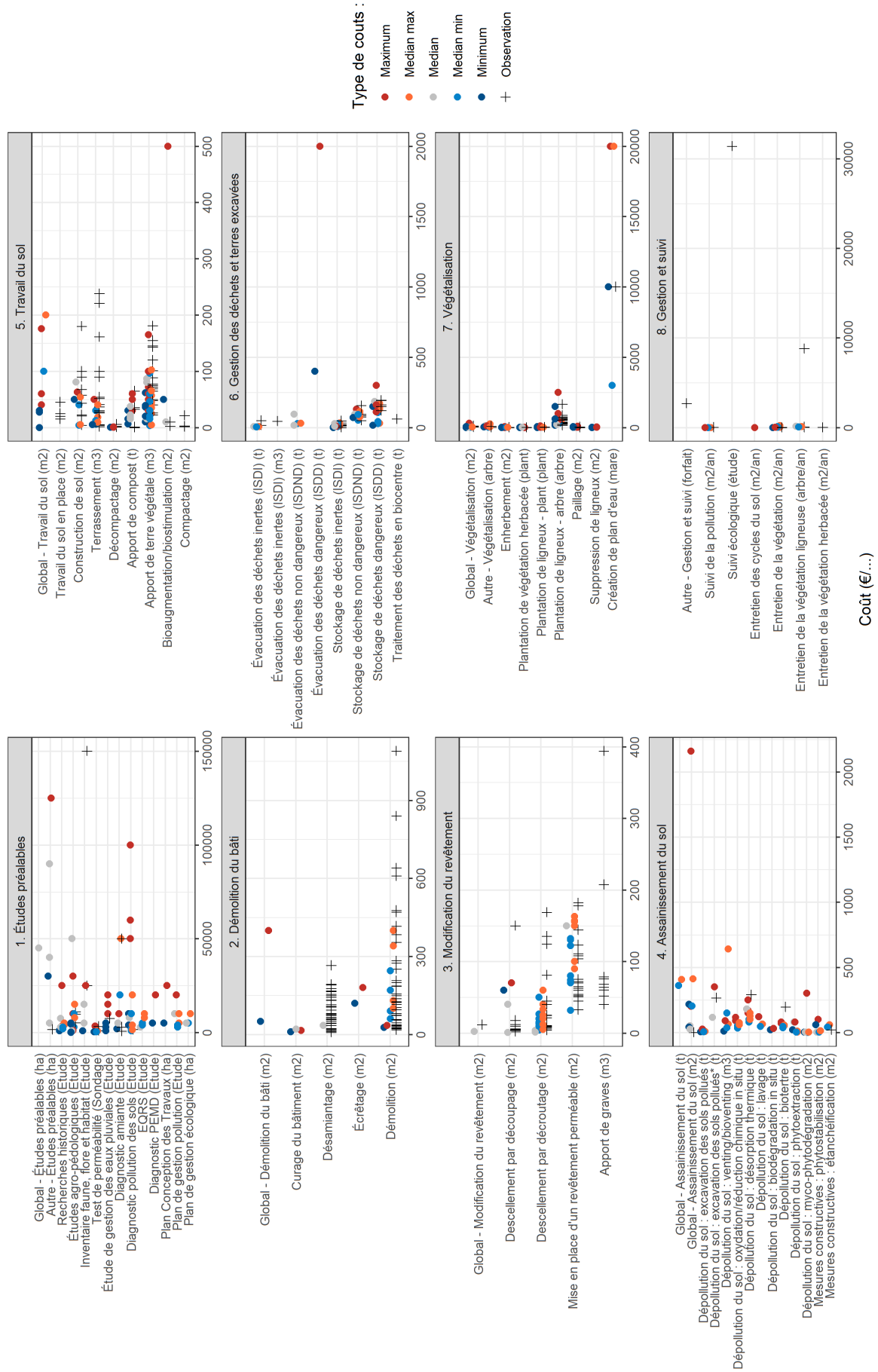
Figure A12: Coûts des techniques (en €/m²) - Par source



*Ici, les coûts d'excavation comprennent également les travaux de terrassement, le transport et le stockage.

4.5.2 Coûts en autres unités

Figure A13: Coûts des techniques (dans l'unité majoritaire donnée pour la technique)

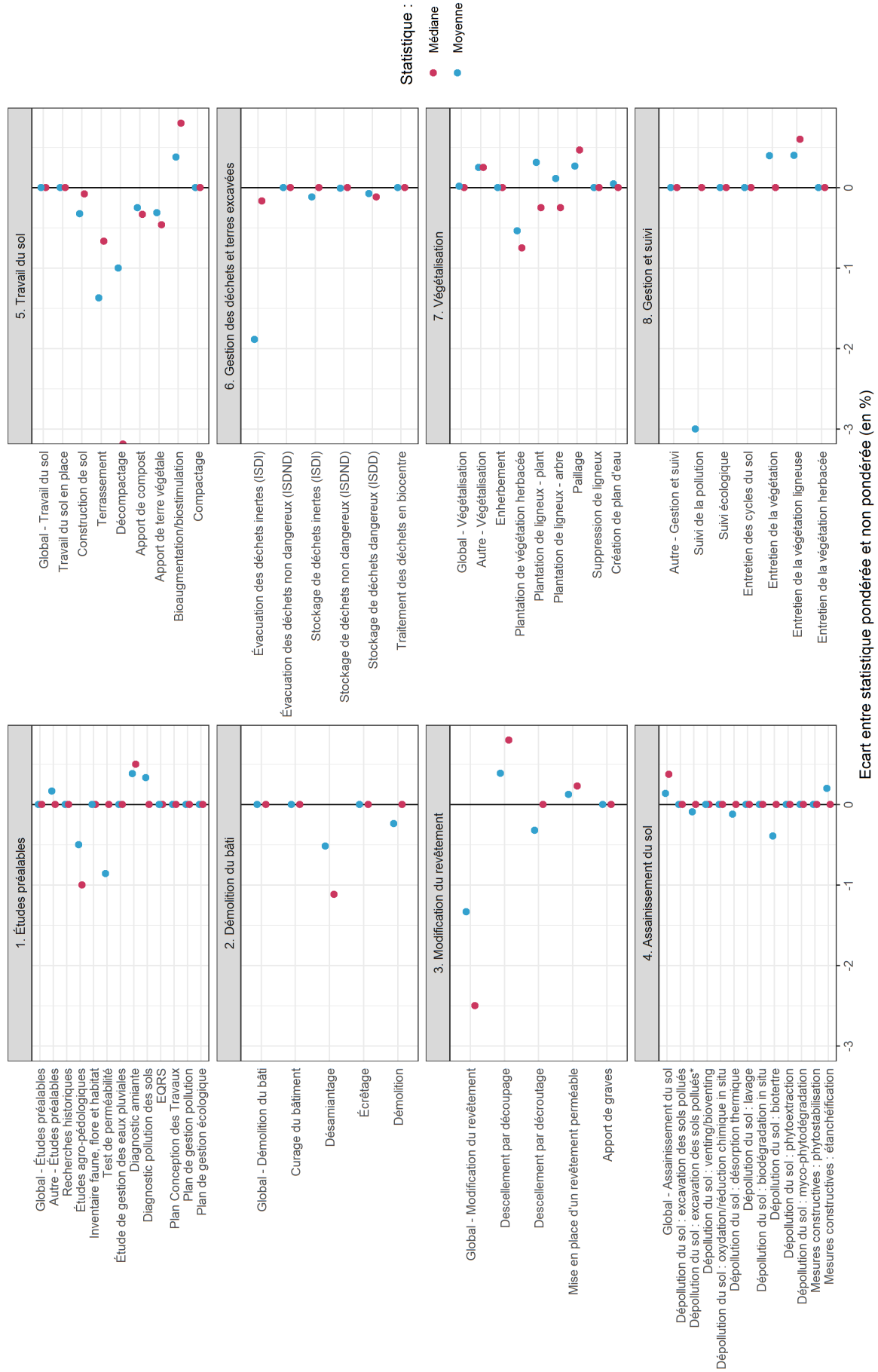


*Ici, les coûts d'excavation comprennent également les travaux de terrassement, le transport et le stockage.

4.6 Analyse de sensibilité

4.6.1 Coûts des techniques

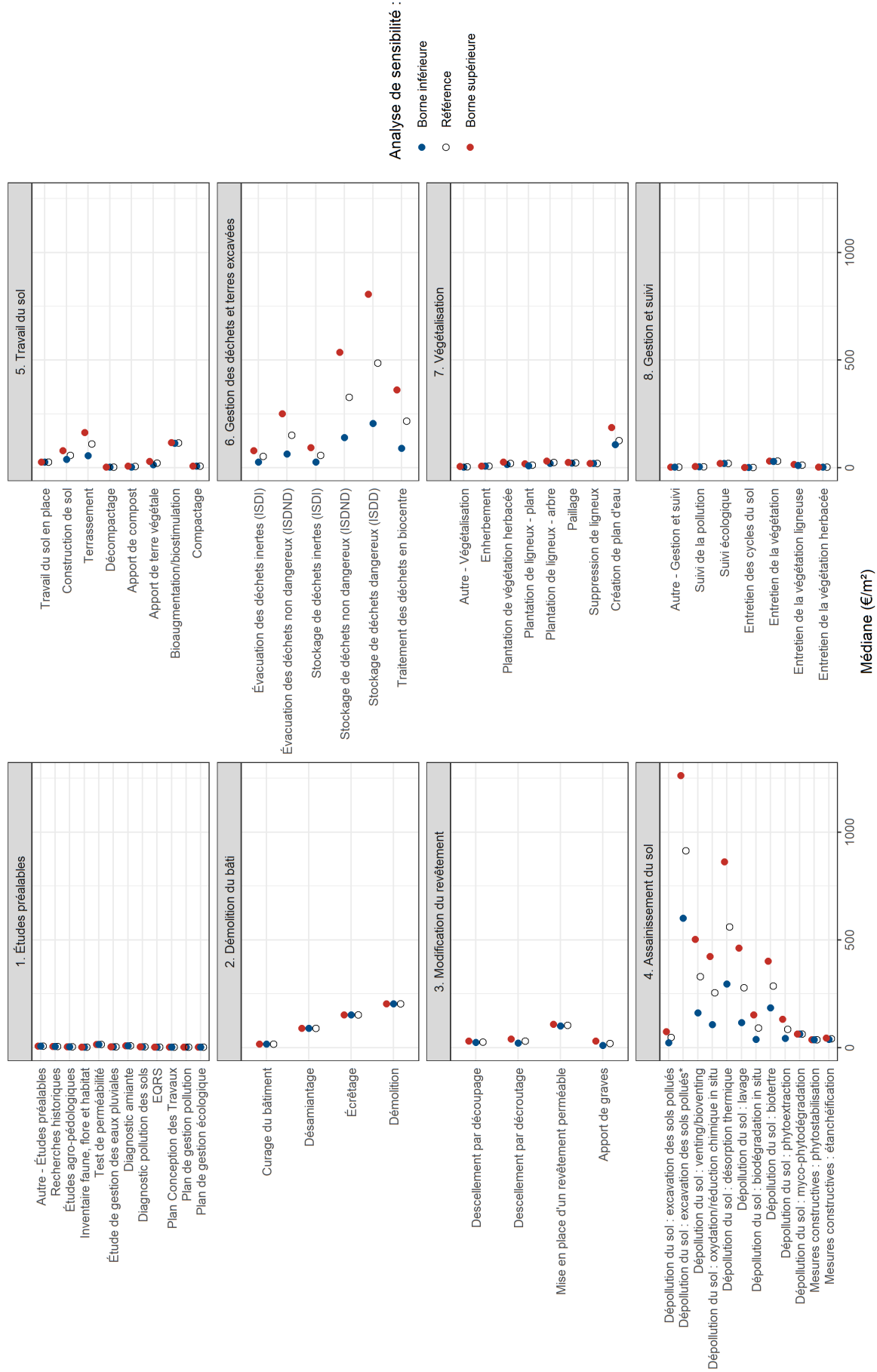
Figure A14: Coûts moyens et médians des techniques - Sensibilité à la pondération des statistiques par rapport aux observations



Note : Les coûts de type "observation" (issus de devis ou d'expériences spécifiques) ont une pondération de 1, tandis que les coûts indiqués par des experts ou des documents sous forme de statistiques (par exemple, médiane, minimum, etc.) ont un poids de 50.

*Ici, les coûts d'excavation comprennent également les travaux de terrassement, le transport et le stockage.

Figure A15: Coûts médians des techniques - Sensibilité aux hypothèses de conversion en €/m²

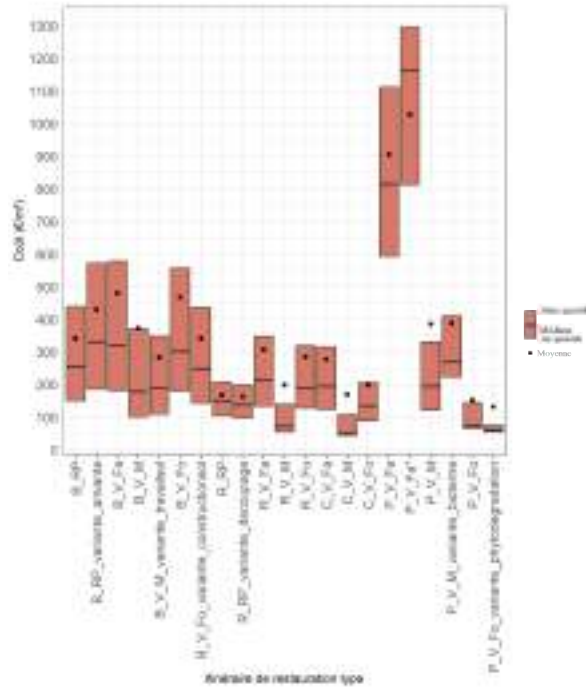


Note : les hypothèses de conversion des unités de coût en €/m² pour la *baseline*, la borne inférieure et la borne supérieure se trouvent dans le tableau. A5.
*Ici, les coûts d'excavation comprennent également les travaux de terrassement, le transport et le stockage.

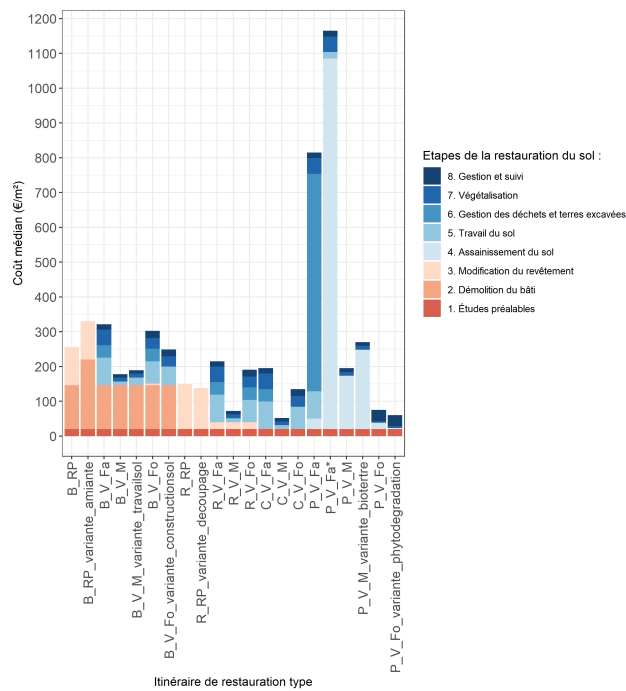
4.6.2 Scenarios

Figure A16: Coûts des scénarios (en €/m²) - Variantes incluses

(a) Distribution des coûts



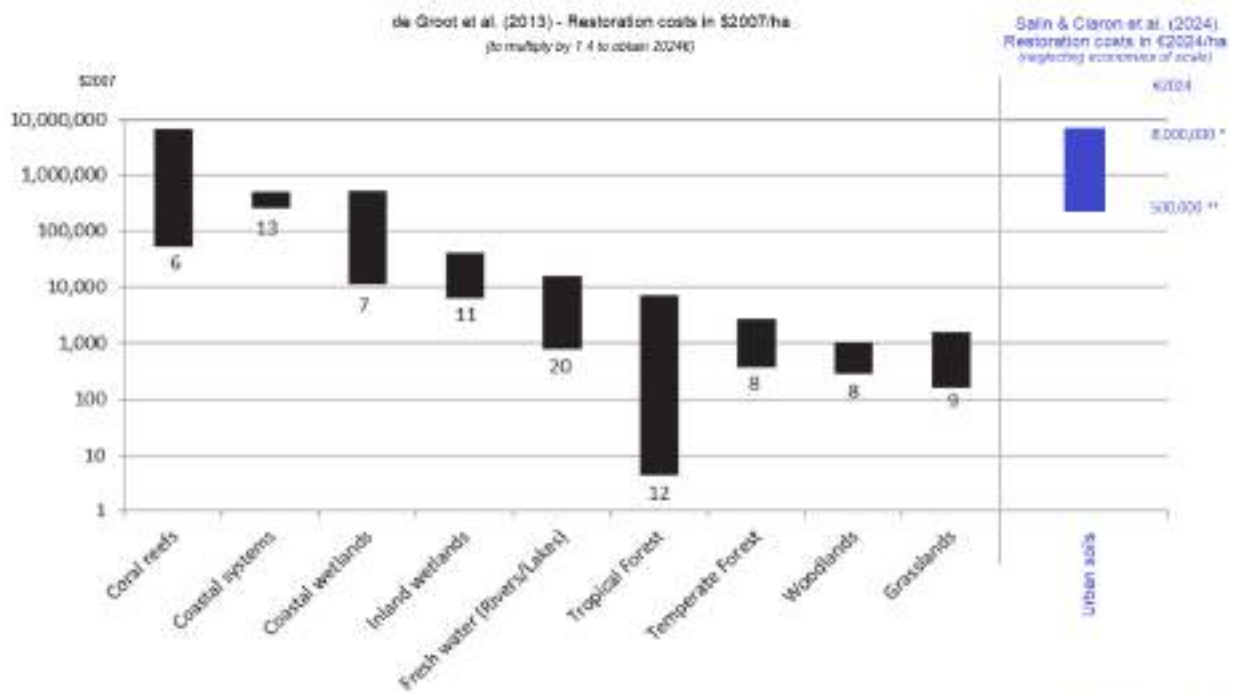
(b) Decomposition du coût médian



Note de lecture : Le nom de chaque itinéraire a la structure suivante: EtatInitial_EtatFinal_IngénierieEcologique, où l'État initial peut être bâti (B), couvert d'un revêtement imperméable (R), compacté (C) ou pollué (P); l'État final peut être un revêtement perméable (RP) ou de la végétation (V); et enfin de recours au génie écologique peut être faible (Fa), modéré (M) ou fort (Fo). Les hypothèses relatives à chaque itinéraire figurent à l'annexe 4.1.6.

4.7 Mise en perspective des coûts de restauration des sols urbains

Figure A17: Comparaison avec les coûts de restauration d'autres écosystèmes



* Median cost in a scenario with initially polluted soil, restored into a green area using soil excavation and disposal in landfill (800€/m²)

** Median cost in a scenario with a soil initially compacted, restored into a vegetation area with low level of ecological engineering (50€/m²)

Source : Auteurs, adapté de *De Groot et al. (2013)*. NB : une limite importante de cette comparaison est liée au fait que *De Groot et al. (2013)* estime les coûts de restauration au niveau mondial - les estimations peuvent donc être influencées par des coûts de main-d'oeuvre plus faibles dans les pays en développement.