

Rapport Intermédiaire

Référentiel de Renaturation

*Outil d'aide à la décision pour les
projets de renaturation*

Mai 2025



Institut
de la **Transition**
Foncière

afr. **astrance**




**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*



Préambule

Le référentiel de renaturation des sols est un outil d'aide à la décision à destination des porteurs de projet de renaturation (maîtrise d'ouvrage). Le projet a été développé par l'Institut de la Transition Foncière en partenariat avec Arp-Astrance, Icade et l'ADEME.

La construction de ce référentiel s'inscrit en complément d'autres travaux en cours ou réalisés au sujet de la renaturation ou de la restauration des fonctions des sols. L'approche proposée ici est spécifique dans ce paysage d'outils existants ou en développement, à la fois du point de vue de l'échelle abordée – celle du projet –, de la vision multifonctionnelle des sols qui est proposée, et de l'inscription de l'outil comme un outil de conception, et pas simplement un outil d'évaluation.

Le référentiel renaturation répond à trois objectifs majeurs. Il vise à accompagner les porteurs des projets :

- dans l'**aide à la conception** du projet de renaturation en fonction des caractéristiques initiales du site, et de son usage final et des objectifs du porteur de projet ;
- dans le **choix des techniques** de renaturation appropriées, en fonction de critères de temporalité, d'efficacité, de coût, d'impact environnemental ;
- dans leurs **échanges avec les acteurs techniques**, en offrant notamment un accompagnement à la rédaction des cahiers des clauses techniques et particulières (CCTP).

Le référentiel se rapporte aux enjeux de la renaturation, comprise comme une restauration des fonctions des sols urbains et dégradés – plus généralement la catégorie des SUTMA (Soils of Urban, Industrial, Traffic, Military and Mining Areas). Il ne traite pas de restauration écologique au sens large, ni de renaturation de sols agricoles.

Le référentiel constitue le complément détaillé et approfondi d'un arbre de décision qui l'accompagne. Les deux documents sont destinés à être consultés en parallèle. L'utilisation de l'arbre ne nécessite pas de lire la totalité du référentiel, mais il est conseillé de s'y référer pour l'éclairer.

Glossaire

Pédogenèse : La pédogenèse désigne l'ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques responsables de la transformation de la roche mère en sol, puis de son évolution. C'est la formation du sol.¹

Sol : Volume qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble peu altérée, ou peu marquée par la pédogénèse. Son épaisseur varie de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres. Il comporte le plus souvent plusieurs horizons correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux. Il est le lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et micro-organismes).²

Texture / granulométrie : Caractérisation d'un sol en fonction de la taille de ses particules. La granulométrie définit les argiles (> 2 µm), les limons (entre 2 µm et 50 µm) et les sables (entre 50 µm et 2 mm). La texture d'un sol est définie en fonction des proportions relatives de ces trois catégories granulométriques (par exemple, limon argilo-sableux, argile sableuse ou encore limon fin argileux).

Sols anthropisés : Ce sont des sols formés ou fortement modifiés par les activités humaines.³ Les Anthrosols et les Technosols sont des sols anthropisés. Un sol qui a été renaturé (et donc de nouveau multifonctionnel), est également souvent un sol anthropisé.

Sols artificialisés : L'artificialisation des sols est définie par la loi Climat et Résilience de 2021, comme l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation des usages. Ainsi les sols artificialisés sont des sols anthropisés dont les fonctions écologiques ont été durablement altérées.

Anthrosol / Technosol : Anthrosols et technosols sont des termes qui relèvent de différentes classifications scientifiques, et qui permettent de décrire les sols en fonction du degré et de la nature de l'anthropisation.⁴

Les Anthrosols sont définies à l'échelle nationale dans le Référentiel Pédologique⁵ français. Ils désignent des sols modifiés ou fabriqués par l'homme, souvent en milieu urbain, mais aussi parfois en milieu rural.

Les Technosols sont définies à l'échelle internationale, dans le World reference base for soil resources (WRB)⁶, proposé par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Ils désignent des sols qui contiennent une part significative d'artefact (au moins 20%), ou imperméabilisé par un matériau dur technique.

La catégorie des anthrosols recouvre ainsi une plus large diversité de situations que la catégorie des technosols⁷

¹ Source : Association Française pour l'Étude des Sols, Pédogénèse (formation du sol) (2023)

² Source : AFES, Définition et enjeux (2018)

³ Source : CNRS, Les sols anthropisés : des sols encore mal connus mais avec du potentiel (2022)

⁴ Source : Plante & Cité, Désimpermeabiliser les villes. Guide opérationnel pour (re)découvrir les sols urbains (2024)

⁵ Source : AFES, Référentiel Pédologique (2008)

⁶ Source : FAO, World reference base for soil resources (2014)

⁷ Source Plante & Cité, Désimpermeabiliser les villes. Guide opérationnel pour (re)découvrir les sols urbains (2024)

Construction de sol : Création artificielle d'un sol, dans le but de refunctionaliser un sol dégradé ou pollué.

Amélioration de sol : Procédé différent de la construction de sol, l'amélioration de sol désigne la modification des propriétés physiques d'un sol existant, dans l'objectif d'améliorer les fonctions du sol.

Renaturation des sols : Selon le code de l'urbanisme (article L101-2-1), la renaturation des sols correspond aux « actions ou opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol ».

Fonctions des sols : Aussi appelées fonctions écologiques des sols, elles constituent la dynamique qui assure le maintien de l'état écologique, physique et chimique des milieux.⁸ (ADEME, 2019) L'AFES en établit sept : Support physique stable pour le vivant ; Habitat pour les organismes ; Stockage, circulation et infiltration de l'eau ; Stockage, recyclage et transformation de la matière organique ; Stockage et fourniture de nutriments ; Échange gazeux avec l'atmosphère ; Filtration, rétention et dégradation de polluants. Le maintien de ces fonctions permet au sol de rendre certains services écosystémiques, essentielles pour l'être humain et l'environnement.

Services écosystémiques des sols : Les services écosystémiques sont les avantages retirés par l'Homme de son utilisation actuelle ou future de diverses fonctions des écosystèmes, tout en garantissant le maintien de ces avantages dans la durée.⁹ L'AFES dénombre 14 services écosystémiques rendus par les sols, issues de leurs sept fonctions écologiques. Ces services appartiennent à trois catégories : les services de régulation, les services d'approvisionnement, et les services culturels.¹⁰

Écologue : L'écologue (ou ingénieur écologue, bien que le titre professionnel n'existe pas officiellement), est un expert du fonctionnement des écosystèmes. Il sait décrire l'écosystème, son fonctionnement, l'imbrication des paramètres physico-chimiques et biologiques, ses dynamiques ou encore les causes du dysfonctionnement. Il a la capacité d'avoir une approche systémique, de conduire des études faisant intervenir de multiples acteurs, et d'animer les réflexions au sein de groupes de travail pluridisciplinaires.¹¹

Naturaliste : Le naturaliste est un expert de la biodiversité. Il est spécialisé sur l'identification d'un ou plusieurs taxons et la connaissance de leur biologie, écologie et niveau d'enjeu. Le métier de naturaliste se décline en trois fonctions (technicien naturaliste, chargé d'études naturaliste, et chef de projet naturaliste).¹²

8 Source : ADEME, Méthodologies d'évaluation des fonctions et services écosystémiques rendus par les sols (2019)

9 Source : ADEME, Méthodologies d'évaluation des fonctions et services écosystémiques rendus par les sols (2019)

10 Source : AFES, Services écosystémiques (2023)

11 Source : Union Professionnelle du Génie Écologique, Les métiers de la filière du génie écologique (2024)

12 Source : Union Professionnelle du Génie Écologique, Les métiers de la filière du génie écologique (2024)

Liste des abréviations

ACT : Assistance pour la passation des contrats de travaux, correspond à la sélection des prestataires

AMO : Assistance à maîtrise d'ouvrage

AVP : Études d'avant-projet

CCTP : Cahier des clauses techniques particulières

DCE : Dossier de consultation des entreprises

DGPF : Décomposition des prix globale et forfaitaire

EEE / EVEC : Espèces exotiques envahissantes / espèces végétales exotiques envahissantes

EQRS : Évaluation quantitative des risques sanitaires

ETM : Éléments traces métalliques

EXE : Études d'exécution (plans et détails d'exécution, devis quantitatifs détaillés, calendrier prévisionnel des travaux, etc.)

ISDI : Installation de stockage de déchets inertes

MOA : Maîtrise d'ouvrage

MOE : Maîtrise d'œuvre

PGTDE : Plan de gestion des déblais et terres excavées

Prestation LEVE : Levé de doute (LEVE)

Prestation Diagnostic pollution (DIAG)

Prestation PG : Plan de gestion (PG)

PLU(i) : Plan local d'urbanisme (intercommunal)

PRO : Phase projet

SCOT : Schéma de cohérence territoriale

SSP : Sites et sols pollués

SUITMA : Soils of urban, industrial, traffic, mining and military areas

VRD : Voirie et réseaux divers

Table des matières

INTRODUCTION.....	11
Les sols et leurs fonctions écologiques	11
La renaturation comme une restauration des fonctions écologiques des sols.....	12
Pourquoi renaturer ?.....	12
Cadrage du référentiel.....	13
Un outil d’accompagnement pour les porteurs de projet.....	14
Une démarche de co-construction de l’outil.....	14
Structure du référentiel	14
I. Définir sa stratégie de renaturation.....	17
I.1 Choix du site à renaturer	19
I.2 Études préalables et diagnostic initial	23
I.3 Dimensionner son projet.....	29
I.3.1 Comment spatialiser mon projet ?	30
I.3.2. Hiérarchiser ses objectifs de refunctionalisation	34
I.3.3. Quels sont les coûts de la renaturation et comment les réduire ?	39
1.3.4 Dimension temporelle	43
II. Réaliser son projet de renaturation.....	46
II.1 Phase chantier.....	48
II.1.1 Avant le chantier - anticipation.....	48
II.1.2. Pendant le chantier	51
II.2 Travaux de préparation	53
II.2.1. Descellement.....	53
II.2.2 Excavation	56
II.2.3 Tri et transport des matériaux.....	60
II.2.4. Gestion des espèces végétales exotiques envahissantes (EVEE) et des terres contaminées .	61
II.3 Remise en état des sols	64
II.3.1 Gestion des pollutions.....	64
II.3.2. Stockage et réemploi des terres excavées	67
II.3.3 Amélioration et création de sol.....	72
II.4 Réaménagement écologique	83
II.4.1. Sélection de la végétation	83
II.4.2. Travailler un couple sol-végétation écologiquement fonctionnel.....	88
III. Évaluer son projet de renaturation.....	96
III.1 Évaluer les fonctions des sols	96
III.2 Assurer le maintien et la gestion des fonctions du sol.....	104
Bibliographie.....	106

Table des tableaux

Tableau 1 : Tableau des critères pour le choix du site à renaturer	20
Tableau 2 : Les études préalables à réaliser dans le cadre d'un projet de renaturation (optimum) ©ARP Astrance.....	24
Tableau 3 : Hiérarchiser ses objectifs de refunctionalisation	36
Tableau 4: Réglementation impactante pour les ouvrages de gestion des eaux pluviales ou d'incendie ©ARP Astrance	38
Tableau 5 : Techniques de descellement ©ARP Astrance.....	54
Tableau 6 : Comparatif des techniques ©ARP Astrance	55
Tableau 7 : Techniques d'excavation ©ARP Astrance.....	57
Tableau 8 : Comparatif des techniques d'excavation ©ARP Astrance.....	58
Tableau 9 : Exemple de matériaux pouvant être valorisés ©Cerema, 2024	71
Tableau 10 : Typologies des milieux ouverts selon les caractéristiques du sol	90
Tableau 11 : Typologies de végétation herbacée en fonction de caractéristiques pédologiques généralement observées	92
Tableau 12 : Paramètres du sol (physiques (bleu), chimiques (rose), biologiques (vert)) par fonction et indications sur les méthodes de mesure. Indiquasol et Calvaruso & al, 2019 ©ARP Astrance	100

Table des figures

Figure 1 : Différents profils de sols urbains, plus ou moins anthropisés ©Cerema, OFB, Flore Vigneron, 2024.....	11
Figure 2 : Déroulé du référentiel, les grandes étapes d'un projet de refonctionnalisation des sols ©ARP Astrance.....	15
Figure 3 : Des pistes pour une mise en œuvre de la renaturation - FNAU, sur la base de la publication "Renaturer les villes" de l'ARB Île-de-France	17
Figure 4 : Les acteurs clefs de la renaturation à chaque étape de projet	18
Figure 5 : Zones prioritaires à renaturer en île-de-France. Extrait de l'outil Cartoviz a été élaboré par L'Institut Paris Region et son département Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France dans le cadre du Projet européen REGREEN.....	22
Figure 6 : Mise en oeuvre du diagnostic agro-pédologique - ©ARP Astrance	27
Figure 7 : Principe de co-conception d'un projet de renaturation ©ARP Astrance	29
Figure 8 : Actions à mener sur les sols selon l'état de dégradation initial de leurs fonctions ©ARP Astrance.....	30
Figure 9 : Schéma du principe d'implantation des zones renaturées pour favoriser la trame brune à l'échelle de son projet ©ARP Astrance	32
Figure 10 : Exemple de différenciation des espaces sur la base d'un "gradient de naturalité", applicable en conception et en gestion ©ARP Astrance	33
Figure 11 : Stratégie de hiérarchisation des enjeux de refonctionnalisation des sols ©ARP Astrance	34
Figure 12 : Renaturer ©FédéSCOT, à partir de La fresque du sol, ADEME.....	35
Figure 13 : Les supers pouvoirs des sols ©Matthieu Ughetti - Cerema, 2019	35
Figure 14 : Coût médiant d'un projet de renaturation selon les itinéraires techniques employés ©Salin et al. 2025.....	39
Figure 15 : Identification des principaux facteurs d'impact sur les coûts de la renaturation ©Salin et al. 2025.....	42
Figure 16 : Temporalité d'une opération de refonctionnalisation des sols ©ARP Astrance... ..	43
Figure 17 : Déroulement de la réalisation d'un projet de refonctionnalisation ©ARP Astrance	46
Figure 18 : Schémas de principes de protection des arbres ©ARP Astrance	50
Figure 19 : SEQ Figure * ARABIC 18 : Profil de sol scellé ©G. Séré, LSE.....	53
Figure 20 : Différentes méthodes de tri selon les ambitions de revalorisation ©ARP Astrance	60
Figure 21: Gestion des terres contaminées aux espèces exotiques envahissantes dans la zone chantier ©ARP Astrance d'après le Guide d'identification et de gestion des Espèces Végétales Exotiques Envahissantes sur les chantiers de Travaux Publics ©MNHN, FNTP, ENGIE.....	62
Figure 22 : Gestion des terres excavées selon leur contamination aux espèces exotiques envahissantes ©ARP Astrance	63
Figure 23 : Schéma de la méthode de valorisation des terres excavées ©ARP Astrance.....	67
Figure 24 : Pratiques de stockage des terres extraites des règles professionnelles de l'UNEP (N°: P.C.1-R0, Décembre 2022).....	69

Figure 25 : Méthode de remise en état des sols ©ARP Astrance.....	72
Figure 26 : Les organismes du sol et leurs rôles	76
Figure 27 : Exemples d'amélioration de sol ©ARP Astrance	76
Figure 28 : Modèles de profils de sols ©ARP Astrance.....	78
Figure 29 : Schéma de méthode de création de sols ©ARP Astrance	78
Figure 30 : Exemples de calculs de valeurs de fonds.....	82
Figure 31 : Les différentes strates végétales ©ARP Astrance.....	85
Figure 32 : Diversité d'habitats spécifiques à la faune ©ARP Astrance.....	88
Figure 33 : SEQ Figure * ARABIC 40 : Guide éco-jardin ©PNR de la Haute Vallée de Chevreuse	93
Figure 34 : Lien entre objectifs de refonctionnalisation et fonctions des sols ©ARP Astrance	97
Figure 35 : Indicateurs à prioriser selon les objectifs de refonctionnalisation ©ARP Astrance	98
Figure 36 : Lombriduc installé à Nancy sur un sol stabilisé ©L'Est Républicain.....	104



INTRODUCTION

Les sols et leurs fonctions écologiques

Ce référentiel renaturation propose une approche axée sur la **restauration des sols et de leurs fonctions**.

Le sol peut être défini comme un « volume qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble, peu altérée, ou peu marquée par la pédogénèse. Son épaisseur varie de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres. [...] Il comporte le plus souvent plusieurs horizons correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux. [...] Il est le lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et micro-organismes). »¹³

Les sols sont formés par l'altération des roches, la dégradation de la matière organique et les mouvements de matières (Duchaufour, 1983).¹⁴ La succession de processus conduisant à leur formation est appelée pédogénèse. **De nombreux sols sont néanmoins altérés par l'activité humaine**, et présentent différents stades d'anthropisation. C'est notamment le cas en milieu urbain, où la pédogénèse des sols est souvent modifiée par des pressions anthropiques : remblais, apports de matières exogènes, couverture et imperméabilisation du sol, diffusion de contaminants, érosion, compaction ...

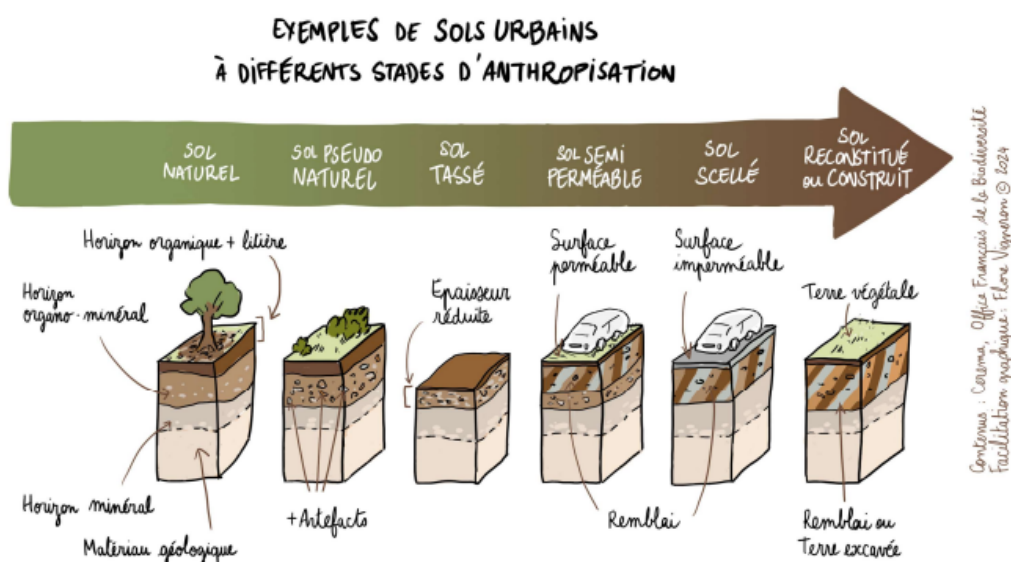


Figure 1 : Différents profils de sols urbains, plus ou moins anthropisés ©Cerema, OFB, Flore Vigneron, 2024

¹³ AFES, *Définition et enjeux* (2018)

¹⁴ Philippe Duchaufour, *Pédologie Tome I - Pédogénèse et Classification* (1983)

Ces pressions anthropiques contribuent à altérer les **fonctions remplies par les sols**. Ce référentiel s'appuie sur la liste de sept fonctions établies par l'Association Française pour l'étude des sols :

- Stockage, recyclage et transformation de la matière organique
- Habitat pour les organismes
- Échanges gazeux avec l'atmosphère
- Stockage et fourniture de nutriments
- Support physique stable pour le vivant
- Stockage, circulation et infiltration de l'eau
- Filtration, rétention et dégradation des polluants

La renaturation comme une restauration des fonctions écologiques des sols

Selon le code de l'urbanisme (article L101-2-1), la renaturation des sols correspond aux « actions ou opérations de **restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol**, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé ». D'autres termes sont employés dans la littérature scientifique ou dans les contextes opérationnels : restauration écologique, réhabilitation, régénération des sols ou encore requalification des friches.

Ici, le terme « renaturation des sols » est privilégié. On définit dans ce référentiel la renaturation des sols comme une action volontaire d'amélioration ou de « restauration » des fonctions écologiques des sols (ou « refonctionnalisation »), sans prétendre à un retour vers un sol dit naturel, la notion d'écosystème indigène n'étant pas pertinente dans un contexte urbain.

Le référentiel s'inscrit dans une lecture multifonctionnelle des sols dégradés, qui embrasse à la fois les enjeux de gestion des eaux pluviales (désimperméabilisation), de retour de la biodiversité (restauration écologique), de restauration de la qualité agro-pédologique et biologique des sols (construction de technosols), restauration de la qualité chimique des sols (gestion et/ou traitement des pollutions), etc.

Pourquoi renaturer ?

En milieu urbain, la renaturation des sols vient répondre à des exigences réglementaires mais aussi à des enjeux de conservation de la biodiversité, de gestion des eaux ou d'adaptation des villes au changement climatique.

Sur le plan réglementaire national, la **loi Climat et Résilience**, adoptée en 2021, impose un objectif « Zéro Artificialisation nette » à l'horizon 2050, en intégrant la possibilité de pratiques de compensation de l'artificialisation, par la renaturation de certains espaces. Cette réglementation s'inscrit dans une logique similaire à celle de la **séquence Éviter, Réduire, Compenser (ERC)**, introduite dans le droit français en 1976. Cette approche conduit notamment à mettre en œuvre des mesures de compensation écologique des aménagements faisant l'objet d'une évaluation environnementale. Celles-ci sont généralement effectuées en milieu naturel, mais la logique ERC pourrait conduire à mettre en œuvre des actions de renaturation de sols anthropisés. Au niveau européen, le **règlement européen pour la restauration de la nature**, adopté en 2024, vise à instaurer d'ici 2030 des mesures

de rétablissement des écosystèmes sur 20% des milieux terrestres et marins, et de restaurer 30% des habitats spécifiques en mauvais état.

Au-delà de ces différentes exigences réglementaires, parfois amenées à évoluer, la restauration des fonctions des sols reste une réponse pertinente dans le cadre de l'adaptation des villes au changement climatique. La présence d'un sol vivant et fonctionnel étant un prérequis nécessaire à la mise en place d'espaces végétalisés, la multiplication des projets de renaturation s'inscrit dans le cadre de la **lutte contre les îlots de chaleur urbains** : l'évapotranspiration par la végétation, et de manière générale les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère permettent de réguler le climat local, et d'apporter de l'ombre. La renaturation s'appuie également généralement sur des actions d'amélioration de l'infiltration des eaux, et permettent ainsi de mieux **prévenir les inondations**. La mise en place d'espaces renaturés peut aussi s'inscrire dans le cadre de **stratégies écologiques territoriales**, la trame brune (continuité de sols) permettant d'appuyer les trames vertes.

Cadrage du référentiel

Ce référentiel propose un cadrage complémentaire à celui d'autres outils davantage axés sur la *planification* de la renaturation, ou destinés directement à des *acteurs techniques*.

- Ce référentiel est destiné aux **porteurs de projets** de renaturation (maîtrise d'ouvrage) ;
- En termes d'échelle spatiale, il s'applique à l'**échelle du projet** ;
- En termes d'échelle temporelle, il couvre les différentes étapes de la chaîne de valeur de la renaturation entre la **conception, la réalisation et l'évaluation du projet**, mais se concentre notamment sur les différentes étapes de réalisation (choix des techniques, phase chantier) ;
- Les types de sols concernés par ce référentiel sont de type **SUITMA** (soils of urban, industrial, traffic, military and mining areas). La restauration des sols agricoles ou naturels n'est donc pas traitée dans ce document. La restauration des cours d'eau (reconstitution hydraulique) n'est pas non plus traitée.



Focus planification

Si la planification territoriale n'est pas traitée dans ce référentiel, elle n'en demeure pas moins une étape indispensable permettant de mieux articuler les objectifs de renaturation avec les stratégies écologiques du territoire, et les trajectoires en matière d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Les guides développés par l'ARB Ile-de-France (« [Renaturer les villes](#) », 2022), la CDC Biodiversité et l'OFB (« [Renaturer les sols, des solutions pour des territoires durables](#) », 2022) ou encore la Fédération des SCoT (« [Renaturer](#) », 2024), explorent notamment les méthodologies pour mieux identifier les secteurs prioritaires de renaturation.

A l'échelle du projet, les porteurs de projet sont aussi dépendants des usages prévus par les documents de planification (PLU, PLUi, SCoT). De ce fait, l'usage du sol est souvent prédéfini et antérieur aux éventuels diagnostics de sols qui pourront être conduits au début de l'opération. La maîtrise d'ouvrage conserve néanmoins la possibilité de modifier le projet en faisant évoluer certains usages notamment l'usage de renaturation (ex : éviter ou réduire les zones destinées aux infrastructures, logements, etc.).

Un outil d'accompagnement pour les porteurs de projet

Le référentiel de renaturation vise à accompagner les porteurs des projets :

- dans l'**aide à la conception** du projet de renaturation en fonction des caractéristiques initiales du site, et de son usage final et des objectifs du porteur de projet
- dans le **choix des techniques** de renaturation appropriées, en fonction de critères de temporalité, d'efficacité, de coût, d'impact environnemental
- dans leurs **échanges avec les acteurs techniques**, en offrant notamment un accompagnement à la rédaction des cahiers des clauses techniques particulières (CCTP)

Le référentiel détaillé sera accompagné d'un outil d'aide à la décision, d'abord sous la forme d'arbres de décision décomposés par sections du référentiel, puis sous la forme d'un outil numérique.

Une démarche de co-construction de l'outil

Cet outil, initié par l'Institut de la Transition Foncière, a bénéficié du soutien d'ARP-Astrance, d'Icade et de l'Ademe.

Il a fait l'objet d'une première phase de cadrage entre les différents partenaires de l'outil, puis d'une phase de cinq groupes de travail avec des acteurs publics, privés, associatifs et académiques du monde de l'aménagement, de l'urbanisme et de la gestion des sols (une trentaine de structures associées). Cette étape a donné lieu à une première version du référentiel renaturation. Celle-ci sera ensuite confrontée au terrain lors d'une phase d'expérimentation. Les retours de cette phase d'expérimentation permettront de structurer une version finale de l'outil, sous format numérique.

Structure du référentiel

Ce référentiel s'articule en suivant les différentes étapes d'un projet de renaturation :

- 1) Définir son projet de renaturation (études préalables et conception)
- 2) Réaliser son projet de renaturation
- 3) Évaluer son projet de renaturation

La lecture n'est pas forcément pensée dans un sens chronologique. Elle peut se faire par section du référentiel, en fonction de l'avancée du projet. La troisième partie notamment peut être mobilisée dès l'amont d'un projet de renaturation, afin d'anticiper les diagnostics et la stratégie de suivi.

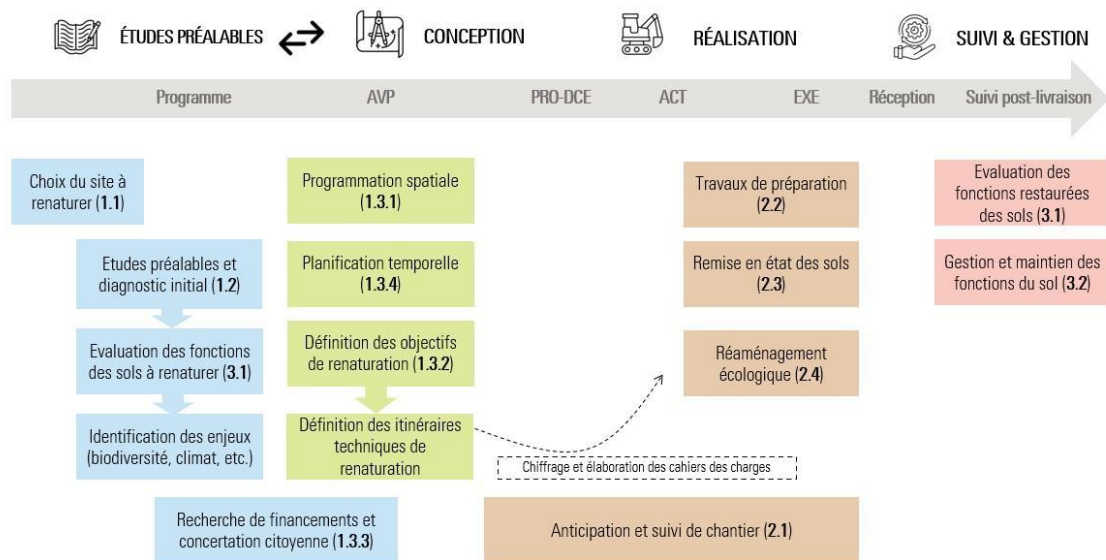


Figure 2 : Déroulé du référentiel, les grandes étapes d'un projet de refonctionnalisation des sols ©ARP Astrance



Pour aller plus loin :

- [Abécédaire de la renaturation](#) – FNAU, 2024
- [Renaturer les villes](#) – ARB Ile-de-France, 2022
- [Renaturer les sols, des solutions pour des territoires durables](#) – CDC Biodiversité, OFB, 2022
- [Renaturer](#) – Fédération des SCoT, 2024
- [Restaurer les fonctions des sols ? Approches scientifiques et perspectives interdisciplinaires](#) – Cahier de la Chaire Transition Foncière, 2024



I – Définir sa stratégie de renaturation

I. Définir sa stratégie de renaturation

Pour garantir le succès d'un projet de renaturation, il est essentiel de définir une **stratégie complète**, en prenant en compte et anticipant **toutes les étapes du projet**. Cette stratégie repose sur l'analyse approfondie du site choisi, incluant son historique, sa géologie, son hydrologie et sa biodiversité existante.

Il est crucial de définir clairement les **objectifs et enjeux de la renaturation**, qu'ils soient écologiques, sociaux ou économiques, et de les hiérarchiser. Le dimensionnement du projet doit être réaliste, en **planifiant** rigoureusement les étapes de renaturation, les **techniques de génie écologique mises en œuvre**, ainsi que les **besoins en ressources humaines et financières**.

La définition d'un projet de renaturation devrait également intégrer :

- **La participation des parties prenantes** : Impliquer les acteurs locaux, les riverains, les associations et les experts permet de recueillir des connaissances précieuses, de favoriser l'adhésion au projet et d'assurer sa pérennité.
- **Le suivi et l'évaluation** : Mettre en place des indicateurs de suivi pour mesurer l'efficacité des actions de renaturation, évaluer l'atteinte des objectifs et ajuster la stratégie si nécessaire (partie 3)
- **La gestion à long terme** : Prévoir les modalités de gestion et d'entretien du site renaturé, afin de garantir sa durabilité et de maximiser ses bénéfices écologiques.
- **L'adaptation au changement climatique** : Anticiper les impacts du changement climatique sur le site et intégrer des mesures d'adaptation pour renforcer la résilience des milieux refunctionalisés.
- **La communication et la sensibilisation** : Informer les riverains et utilisateurs du site sur les enjeux de la renaturation, les bénéfices attendus et les actions mises en œuvre, afin de favoriser l'appropriation du projet et de sensibiliser à la protection de la biodiversité et au traitement et à la gestion des pollutions.

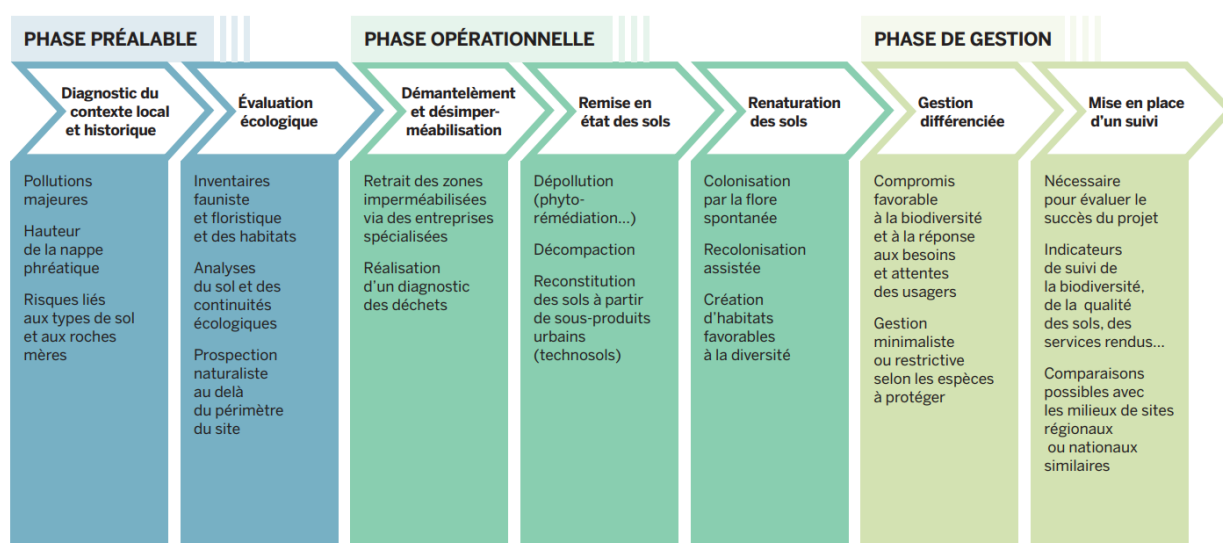


Figure 3 : Des pistes pour une mise en œuvre de la renaturation - FNAU, sur la base de la publication "Renaturer les villes" de l'ARB Île-de-France

En définissant son projet, il est impératif d'intégrer les bons acteurs au bon moment, permettant d'appréhender l'ensemble des enjeux à chaque étape.

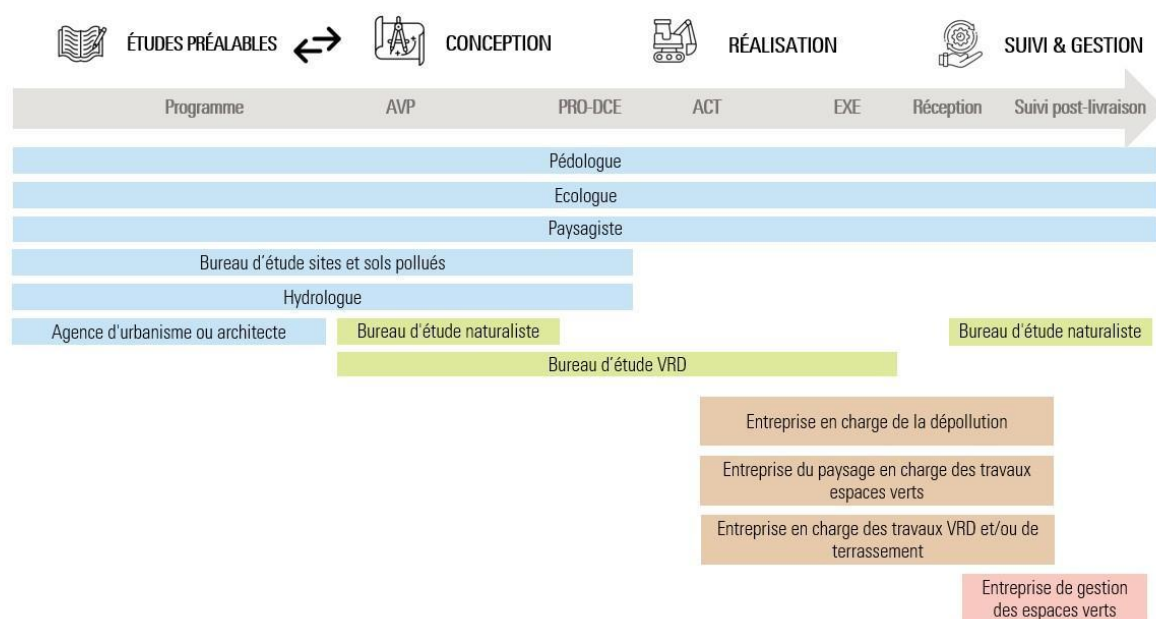


Figure 4 : Les acteurs clefs de la renaturation à chaque étape de projet

I.1 Choix du site à renaturer

EN BREF

Qui ? #MOA #AMO

Quelle phase de projet ? #Programme

Objectif : Prioriser le site à renaturer selon des critères techniques, environnementaux et réglementaires

Lorsque plusieurs possibilités existent, la priorisation du ou des sites à renaturer est une étape stratégique qui doit être guidée par des critères précis et des outils adaptés. Ces critères permettent de comparer différents sites et d'orienter la décision en fonction de l'importance de chaque facteur. Lorsque l'ensemble des données sont collectées, les sites peuvent alors être comparés et priorisés selon les enjeux et critères. La priorisation des sites n'est pas le cœur de ce référentiel, l'objectif est de donner quelques clefs en préambule ici. Néanmoins cela fait l'objet d'autres publications mentionnées dans les ressources en fin de partie.

Le tableau qui suit présente les principaux critères permettant de prioriser les sites à renaturer, ainsi que les ressources permettant d'identifier ces informations.

Tableau 1 : Tableau des critères pour le choix du site à renaturer

CRITÈRES DE CHOIX	SOURCES D'INFORMATION	PRIORITE FORTE	PRIORITE MOYENNE	PRIORITE FAIBLE
STATUT FONCIER	Cadastre, titres de propriété, plans d'urbanisme, contacts avec les propriétaires	Foncier disponible	En cours d'acquisition	Foncier non acquis
EFFORT TECHNIQUE	Selon état initial et projet : Études de sol, plans topographiques, inventaires des infrastructures existantes, avis d'experts techniques	Faible	Moyen	Elevé
SURFACE DESIMPERMEABILISABLE SUR LE SITE	Selon état initial et projet : Plans d'urbanisme, orthophotographies, relevés de terrain, estimation des surfaces imperméables.	Toute la surface	Plusieurs zones dispersées	Zones isolées et de petite taille
TEMPS NECESSAIRE A LA REALISATION	Planification des travaux, disponibilité des ressources, complexité des interventions, retours d'expérience de projets similaires	1-2 ans	5 ans	Plus de 5 ans
GESTION DE L'ILOT DE CHALEUR URBAIN	Portail de l'artificialisation des sols, données de température, cartes de vulnérabilité, simulations thermiques, analyse de la végétation existante	Risque élevé	Risque modéré	Faible risque
REGULATION DES INONDATIONS	PGRI, PPRI, AZI, cartes des zones inondables, données pluviométriques, études hydrologiques, analyse des réseaux de drainage	Risque élevé	Risque modéré	Faible risque
APPROVISIONNEMENT EN EAU	Cartes des nappes phréatiques, données de qualité de l'eau, études de potentiel de recharge, analyse des réseaux d'eau potable, inventaires des points d'eau existants	Potentiel de recharge des nappes, de stockage ou réutilisation existant et fort	Potentiel à développer ou modéré	Potentiel faible ou inexistant
PRODUCTION ALIMENTAIRE	Cartes des sols agricoles, données de qualité des sols, inventaires des friches agricoles, études de faisabilité d'agriculture urbaine, contacts avec les acteurs locaux	Potentiel pour faire potager/jardins partagés élevé Sol fertile	Potentiel modéré Sol à améliorer	Potentiel faible Sol peu adapté

LUTTE CONTRE L'EROSION	Cartes des risques d'érosion, études de stabilité des sols, analyses de la végétation de berge, relevés de terrain, inventaires des ouvrages de protection	Erosion forte, risques immédiats, berges instables	Erosion modérée ou risque potentiel	Faible érosion, stable
CONTINUITES ECOLOGIQUES	Trame Verte et Bleue locale dans SRCE, ZNIEFF, Natura 2000, cartes des corridors écologiques, inventaires de la faune et de la flore, analyses de la connectivité des habitats	Forte connectivité : proximité directe avec un réservoir ou corridor	Connectivité modérée : à proximité d'un corridor ou corridor potentiel	Faible connectivité : isolé ou séparé par un élément fragmentant majeur
RISQUES DE POLLUTION	Géorisques, BASIAS, BASOL, études de pollution des sols et des eaux, inventaires des sites industriels et des décharges, analyses de la qualité de l'air	Risque faible	Risque modéré	Risque élevé
BESOINS SOCIO-ECONOMIQUES (ACCES A LA NATURE, SANTE PUBLIQUE, BIEN-ETRE, EDUCATION, LOISIRS, TOURISME)	Enquêtes de population, données démographiques, cartes des équipements publics, études d'impact social, contacts avec les associations locales, analyse des besoins exprimés	Forte proximité avec les habitants, forte densité de population, fort potentiel d'usage	Proximité modérée, potentiel d'usage à développer	Faible proximité, faible potentiel d'usage
COHERENCE AVEC LES POLITIQUES PUBLIQUES	Plans locaux et régionaux (PCAET, SRADDET). Stratégies nationales et européennes (SNB, Stratégie biodiversité 2030). Objectifs de développement durable (ODD). Documents d'urbanisme (PLU(i), SCoT).	Zone prioritaire à renaturer	/	/

Des cartographies peuvent être réalisées pour synthétiser les informations à l'échelle d'un portefeuille d'actif ou d'un territoire. A titre d'exemple, L'Institut Paris Region et son département l'Agence régionale de la biodiversité ont cartographié les zones prioritaires à renaturer à l'échelle de la région, ces données sont accessibles sur le site Cartoviz de l'Institut Paris Région.

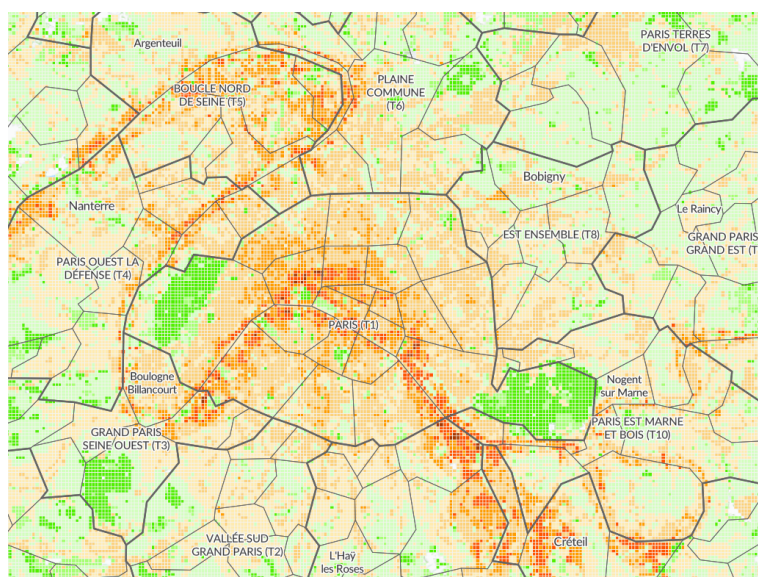


Figure 5 : Zones prioritaires à renaturer en Île-de-France. Extrait de l'outil Cartoviz a été élaboré par L'Institut Paris Region et son département Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France dans le cadre du Projet européen REGREEN.



Pour aller plus loin :

- **Méthodologie pour identifier les secteurs à fort potentiel de renaturation** : Renaturer les villes, Méthodes exemples et préconisations - ARB idF ([ARB-idF - Renaturer les villes - WEB.pdf](#))
- **Carte indiquant les zones urbaines prioritaires pour la renaturation en Île-de-France** : Cartoviz, Institut Paris Région ([Cartoviz - Où renaturer en Île-de-France ?](#))
- **Concevoir une stratégie territoriale de renaturation des sols** : Renaturer les sols, des solutions pour des territoires durables - CDC Biodiversité ([renaturer-les-sols.pdf](#))
- **Outil d'analyse et d'aide à la décision pour accompagner les collectivités vers la sobriété foncière** : UrbanSimul ([UrbanSIMUL, outil collaboratif d'analyse et de prospective sur le foncier / UrbanSIMUL](#))
- **Analyser le potentiel de connectivité d'un site** : Indice du Potentiel de Connectivité, Gondwana, ARP Astrance
- **Outil d'aide à la décision pour la reconversion des friches** : Mutafriches, ADEME ([Evaluer la mutabilité des friches - Outil MUTAFRICHES - La librairie ADEME](#))
- **Base de données des analyses de sol urbain** : BDSolU([Accueil | BDSolU](#))
- **Comment réagir si je soupçonne d'une pollution du sol ?** Présomption de pollution d'un sol – Plante&Cité ([mise en page presumption de pollution 10 dec.pdf](#))
- **BENEFRICHES**, Ademe (<https://benefriches.ademe.fr/>)

I.2 Études préalables et diagnostic initial

EN BREF

Qui ? #MOA #Pédologue #Ecologue #Hydrologue #Experts spécialisés

Quelle phase de projet ? #AVP #Diagnostic

Objectif : Réaliser un diagnostic complet des caractéristiques physiques, biologiques et écologiques du site afin d'évaluer sa potentialité de renaturation et de définir les actions appropriées

Pour la réussite d'un projet de renaturation, il est crucial de réaliser un diagnostic préalable. Ce diagnostic permet de collecter des données de base essentielles, telles que la fonctionnalité du sol, la biodiversité existante ou encore les conditions hydrologiques. Ces informations sont indispensables pour **planifier efficacement les interventions nécessaires** et garantir la **durabilité du projet**.

Les experts référents de chaque étude doivent être mobilisés le plus tôt possible pour **anticiper les contraintes** et **orienter la conception**.

Si les études préalables représentent un certain investissement (10 % des coûts globaux des opérations d'après Plante & Cité – voir partie 1.3.3), elles permettent d'anticiper les contraintes du site et d'optimiser les choix techniques. Cette approche réduit ainsi les risques d'imprévus et contribue à **maîtriser les coûts globaux du projet**, qu'il s'agisse de la conception, des travaux ou de l'exploitation. Pour limiter leur coût, ces études peuvent être menées en plusieurs étapes : une première analyse rapide (diagnostic « flash ») permet d'identifier les principaux enjeux et de cibler les **études complémentaires** réellement nécessaires.

En bref, les résultats des études initiales jouent un rôle central pour :

- Identifier les **contraintes techniques, réglementaires ou juridiques** ;
- Orienter les **actions de renaturation** vers les priorités écologiques et sociales ;
- Établir une base de référence pour le **suivi des indicateurs de succès** de la refunctionalisation, (voir partie 3).

Le tableau ci-après donne une vision globale des études préalables à mener. Cette vision est un optimum, la priorité de chaque étude et la précision attendue varie en fonction des enjeux pré-identifiés, d'où l'importance d'effectuer un pré-diagnostic. Comme mentionné dans le tableau, certaines études sont réglementaires (obligatoires dans certains cas).

Tableau 2 : Les études préalables à réaliser dans le cadre d'un projet de renaturation (optimum) ©ARP Astrance

ETUDES	DESCRIPTION	OBJECTIF POUR LE PROJET	EXPERTISE A MOBILISER	REGLEMENTAIRE
ETUDES AGRO-PEDOLOGIQUES	Analyse des caractéristiques physico-chimiques du sol par une analyse pédologique visuelle et/ou en laboratoire (voir focus ci-après)	● Évaluer la qualité des sols en place pour adapter les itinéraires techniques. ● Déterminer le potentiel de réemploi des matériaux présents. ● Définir des pratiques de chantier limitant l'impact sur les sols. ● Maximiser la qualité / multifonctionnalité des sols du projet après intervention.	Agro-Pédologue	NON Sauf si imposé par une réglementation locale ou un cahier des charges spécifique (ex. projets en milieu agricole ou naturel protégé).
ÉTUDES DE BIOLOGIE DU SOL / FAUNE DU SOL	Évaluation de la biodiversité des sols : abondance, diversité des organismes du sol, activité microbienne, activité de la microfaune, mésofaune et macrofaune, etc.	● Identifier la biodiversité et l'activité biologique des sols. ● Évaluer le rôle des organismes du sol dans la refonctionnalisation. ● Orienter les pratiques pour préserver et renforcer la vie du sol.	Ecologue des sols	NON Mais peut être requise dans le cadre d'évaluations environnementales (étude d'impact, dossier loi sur l'eau, compensation écologique)
ETUDES DE POLLUTION (SITES ET SOLS POLLUES – SSP)	Analyse de la qualité des sols et des eaux souterraines pour identifier d'éventuelles pollutions et évaluer les risques pour la santé humaine et l'environnement	● Vérifier la compatibilité des sols et des eaux souterraines avec l'usage prévu. ● Identifier et quantifier les polluants présents. ● Proposer des mesures pour limiter les risques de pollution et, si nécessaire, établir un plan de gestion. ● Anticiper les coûts et contraintes liés à la dépollution éventuelle.	Sites et sols pollués, hydrogéologue si impact sur les eaux souterraines	OUI Obligatoire en cas de suspicion de pollution (secteurs potentiellement pollués répertoriés, changement d'usage sensible, arrêté préfectoral, ICPE...).
ETUDE GÉOTECHNIQUE	Analyse des caractéristiques du sol en profondeur pour évaluer sa portance, sa stabilité et son comportement face aux contraintes du projet.	● Déterminer les capacités portantes du sol pour adapter les fondations et limiter les risques de tassement ; ● Identifier les contraintes géotechniques (présence d'argiles gonflantes, cavités, risques de glissements...) ;	Géotechnique	OUI Dans certains cas (ex. loi ELAN pour les constructions en zone d'argiles gonflantes)

**MUTUALISER
CES
DIAGNOSTICS**

Optimiser le nombre de relevés, à mettre en lien avec les fouilles archéologiques le cas échéant

		● Prévoir les mesures de confortement ou d'adaptation du projet si nécessaire.		
DIAGNOSTIC HYDROLOGIQUE	Analyse des écoulements, de l'infiltration et du stockage de l'eau sur site pour anticiper les impacts du projet et adapter la gestion des eaux pluviales	● Prévenir les risques d'inondation et d'érosion. ● Optimiser l'infiltration et la gestion des eaux pluviales. ● Assurer la compatibilité avec les contraintes réglementaires.	Hydrologue, ingénierie en gestion des eaux	OUI Selon les exigences de la loi sur l'eau, du PLU, du SDAGE ou en zone soumise au risque d'inondation
ETUDE DES RESEAUX	Identification des réseaux souterrains existants (eau, électricité, gaz, assainissement, télécoms) et analyse de leur compatibilité avec le projet	● Prévenir les risques de conflit avec les réseaux existants. ● Anticiper les éventuels déplacements ou renforcements nécessaires. ● Garantir la faisabilité technique des aménagements.	VRD (Voirie Réseaux Divers), géomètre	NON Mais obligatoire en phase travaux via la procédure DT-DICT (Déclaration de Travaux et Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux)
ETUDE ECOLOGIQUE FAUNE-FLORE-HABITAT	Analyse de l'état initial écologique du site et de son contexte, identification des impacts potentiels du projet sur les milieux en place, définition de mesures pour limiter cet impact et favoriser la biodiversité sur le projet, à chacune des phases	● Limiter les impacts du projet sur la biodiversité sur site et alentours ● Favoriser la faune et la flore locale sur le projet ● Prendre en compte les continuités écologiques dans la conception ● Encourager les pratiques de génie écologique	Ecologue, naturaliste	OUI Souvent obligatoire dans plusieurs cadres réglementaires liés au Code de l'environnement : en cas d'atteinte à une ou plusieurs espèces protégées (L411-1 et suivants), pour les projets soumis à étude d'impact (R122-2), si le projet a une incidence sur une zone Natura 2000. Si un dossier loi sur l'eau est requis, en cas d'autorisation de défrichement... Dans le cadre de la loi fillet , tout projet ayant un impact sur l'environnement peut être soumis à étude d'impact, même s'il ne rentre pas dans les critères de l'article R122-2.
DIAGNOSTIC ZONE HUMIDE	<i>[Volet spécifique de l'étude écologique]</i> Identification, délimitation et caractérisation des zones humides sur le site	● Limiter l'impact du projet sur les zones humides ● Intégrer la restauration de zone humide dans le projet	Écologue ou Pédologue	OUI Critères à retenir pour la définition des zones humides mentionnés à l'article L211-1 du code de l'environnement.

A coupler à l'étude pédologique pour affiner les préconisations

Fortement recommandé en phase diagnostic pour anticiper les contraintes de réseau

A coupler à l'étude pédologique pour les critères

	sur la base de critères floristiques et/ou pédologiques		
ETUDE PAYSAGERE	Analyse du contexte paysager et proposition d'intégration harmonieuse du projet dans son environnement, en tenant compte des enjeux esthétiques, culturels et écologiques - Assurer l'intégration du projet dans son contexte paysager - Proposer un projet fonctionnel et adapté aux usages souhaités - Connaître les caractéristiques du terrain pour prévoir un aménagement paysager résilient et adapté au terrain	Paysagiste, urbaniste, écologue	NON
DIAGNOSTIC AMIANTE	Recherche et identification de la présence éventuelle d'amiante dans les bâtiments, structures ou sols concernés par le projet - Assurer la sécurité des travailleurs et de l'environnement - Planifier les éventuelles opérations de désamiantage - Ajuster le potentiel de réemploi de certains matériaux comme les enrobés	Diagnostiqueurs amiante certifiés	OUI Lorsque le site implique un bâtiment ou des enrobés construits avant juillet 1997
DIAGNOSTIC REEMPLOI / PRODUITS, EQUIPEMENTS, MATERIAUX ET DECHETS (PEMD)	Analyse des éléments à déconstruire ou réutiliser lors des travaux, incluant l'identification des matériaux valorisables, recyclables ou à éliminer - Identifier les matériaux à réemployer dans le projet, en particulier dans le projet paysager - Assurer la gestion réglementaire des déchets de chantier	Expert économie circulaire, ingénierie environnementale	OUI Pour les projets de démolition ou réhabilitation de plus de 1 000 m² ou impliquant certains seuils de volumes de déchets (Code de l'Environnement, loi AGECE de 2020)
ANALYSE DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX	Identification des aléas naturels pouvant affecter le projet Prendre en compte les risques naturels dans la conception du projet afin de garantir sa durabilité, la sécurité des infrastructures et le respect des réglementations locales	Ingénierie environnementale, géotechnique, hydrologie, etc.	NON Sauf si imposée dans le cadre d'un PPRN (Plan de Prévention des Risques Naturels)

d'hydromorphie du sol

ÉVALUER LA FONCTIONNALITÉ DES SOLS À L'ÉTAT INITIAL : LE DIAGNOSTIC AGRO-PÉDOLOGIQUE

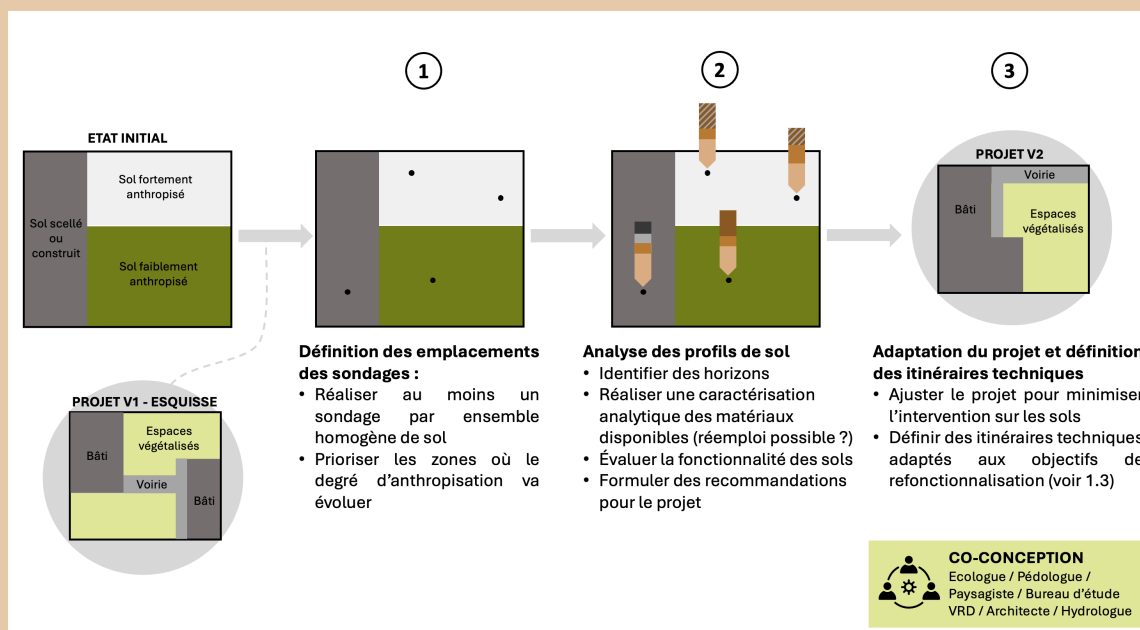


Figure 6 : Mise en oeuvre du diagnostic agro-pédologique - ©ARP Astrance

• Définition des emplacements des sondages pédologiques :

Le choix des emplacements des sondages est une étape clé pour obtenir une vision représentative des sols du site. Il est recommandé de réaliser **au moins un sondage par ensemble homogène de sol** afin de bien différencier les unités pédologiques présentes. **A minima**, l'effort doit être concentré sur les zones où **le degré d'anthropisation va évoluer**, par exemple les secteurs destinés à être renaturés, revalorisés ou modifiés en profondeur.

• Analyse des profils de sol :

Les profils de sol récoltés par carottage mécanique (pelle mécanique, carottier, etc.) ou manuel (tarière) sont analysés sur le terrain par un pédologue et éventuellement complétés par des analyses en laboratoire.

Cette analyse porte sur différents paramètres permettant de caractériser la fonctionnalité des sols. Il est conseillé de se référer à la partie 3, afin d'identifier les indicateurs pertinents à évaluer pour chacune des fonctions des sols, en fonction de différents critères (temporalité, sur le terrain ou en laboratoire, etc.).

L'analyse des profils permet d'étudier la structure et la composition des sols en vue de leur utilisation et de leur remise en fonction. Il est important de caractériser les différents **horizons** (couches de sol aux caractéristiques homogènes) afin d'identifier les **matériaux disponibles** et leur potentiel de réemploi. Cette analyse sert de **point de départ** pour définir son projet de renaturation.

• Préconisations pour le projet :

Dans son étude, le pédologue préconise des mesures pour adapter le projet à la ressource sol du site. L'objectif est de **minimiser les interventions, préserver au maximum la fonctionnalité initiale des sols** et maximiser le **réemploi de matériaux in-situ**. Cette étude préfigure les **itinéraires techniques** nécessaires pour refonctionnaliser les sols.

Le pédologue doit également accompagner le projet en **conception et réalisation** pour affiner les orientations de l'étude, éventuellement les réajuster et s'assurer de leur succès.



Opportunité : Il est possible de combiner différentes études pour gagner du temps et maîtriser les coûts. Par exemple, le **diagnostic pédologique** peut être réalisé en même temps que les relevés **géotechniques**, le diagnostic pédologique des zones humides (ZH), le **diagnostic sites et sols pollués**, les **fouilles archéologiques** ou encore s'il est intégré à un **diagnostic hydrologique**.

La prestation de levée de doute (LEVE)¹⁵ est destinée à identifier les sites ou des parties de sites qui ne sont pas réputés comme potentiellement pollués par des activités industrielles et/ou de service (par exemple : réserves foncières, parcelles boisées, etc.) ou par des pratiques susceptibles d'engendrer une pollution (par exemple : zone de dépôt de déchets, zone de remblais constitués de matériaux naturels ou anthropiques, zone d'épandage d'effluents ou de déchets, etc.)



Pour aller plus loin :

- **Connaître, choisir et étudier les indicateurs de qualité des sols, projet INDIQUASOL :**

Cousin I. (coord.), Desrousseaux M. (coord.), Angers D. et al. (2025). **Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs**. Rapport d'étude, INRAE (France). 780 pages - DOI [10.17180/qnpx-x742](https://doi.org/10.17180/qnpx-x742)

Cousin I. (coord.), Desrousseaux M. (coord.), Leenhardt S. (coord.) et al. (2024). **Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs**. Synthèse du rapport d'étude, INRAE (France). 126 p. DOI [10.17180/k4j0-m162](https://doi.org/10.17180/k4j0-m162) - Version feuilletable [ici](#)

Cousin I., Desrousseaux M. et Leenhardt S. (2024). **Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs**. Résumé du rapport d'étude. INRAE (France). 10 p. DOI [10.17180/h37a-4n09](https://doi.org/10.17180/h37a-4n09) - [Résumé IndiQuaSolpdf - 4.84 MB](#)

- **La réglementation sur les sites et sols pollués** : Guide pour les diagnostics des sites et sols pollués - Ministère de la Transition écologique ([Rapport en Français](#))
- **Intégrer le diagnostic de sol dans son évaluation environnementale** : Comment intégrer les sols dans la séquence ERC - Cortet et al. ([Mieux intégrer les sols dans la séquence "Éviter-Réduire-Compenser"](#))
- **Protocoles simples pour évaluer la santé des sols** : Biofunctool ([BIOFUNCTOOL® a new framework to assess the impact of land management on soil quality](#))
- **Programme de science participative pour le suivi de la qualité biologique des sols** : QUBS ([QUBS - Page d'accueil](#))
- **Se former sur les diagnostics de sols urbains** : Agrocampus Ouest, Association française pour l'Etude des sols, UPGE, EODD ingénieurs conseils (anciennement Sol &co), INP ENSAT

¹⁵ La prestation LEVE est définie à la partie 2 de la série de normes NF X31-620.

I.3 Dimensionner son projet

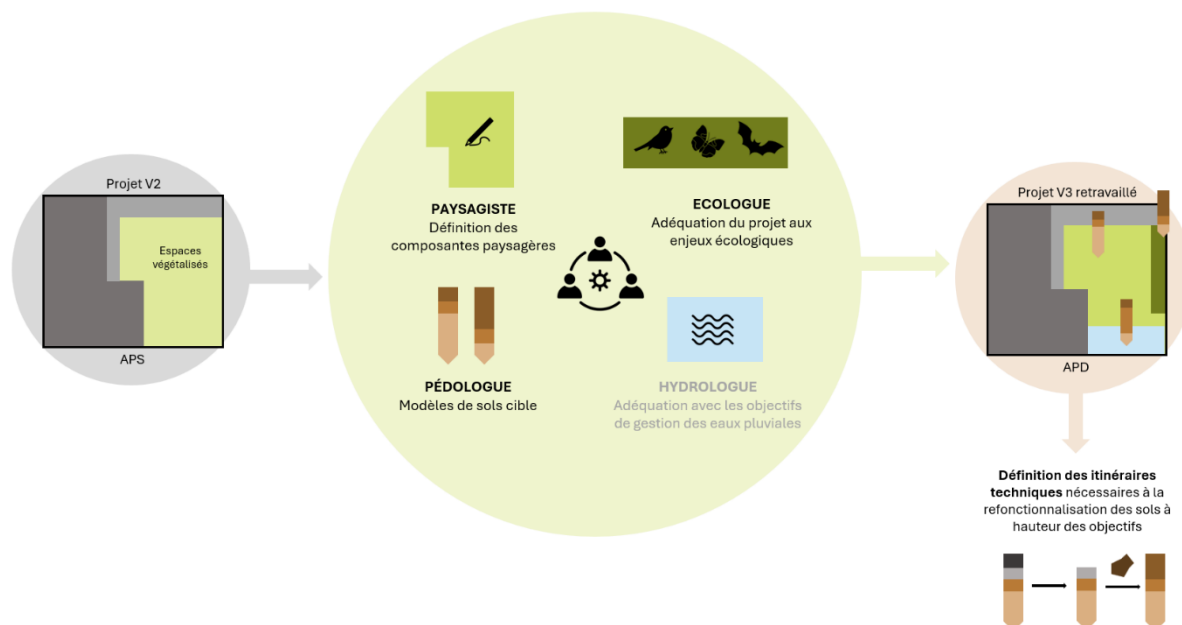


Figure 7 : Principe de co-conception d'un projet de renaturation ©ARP Astrance

La phase de conception est une étape clé du projet de renaturation. Cette phase inclut la spatialisation du projet, l'élaboration d'un plan détaillé des interventions, l'estimation des coûts et la planification des travaux. Elle permet également d'anticiper les contraintes réglementaires, techniques et financières afin de garantir la viabilité et la cohérence du projet avant son passage à la phase opérationnelle. Cette phase doit d'appuyer sur les résultats des études préalables. Le dimensionnement doit être le fruit d'une **co-conception entre experts du paysage, de l'écologie et du sol** (pédologie) et, les experts sites et sols pollués le cas échéant. Le sujet de la gestion des eaux sur un projet peut être traité par l'expertise paysage, néanmoins il peut être intéressant d'intégrer un hydrologue dans la conception, notamment lorsque la gestion des eaux est un enjeu majeur du projet.

I.3.1 Comment spatialiser mon projet ?

EN BREF

Qui ? #MOA #Paysagiste #Architecte #Pédologue #Ecologue

Quelle phase de projet ? #Programme #Esquisse #AVP

Objectif : Différencier et spatialiser les objectifs de renaturation à l'échelle de son projet.

I.3.1. 1) Minimiser l'effort et préserver la ressource sol

L'état de dégradation des fonctions des sols varie fortement en milieu urbain. Pour une approche cohérente et efficace, il est essentiel d'en tenir compte dès la spatialisation du projet. **Les sols peu ou pas dégradés constituent une ressource précieuse à préserver absolument.** À l'inverse, les sols très altérés, voire totalement imperméables, nécessitent un effort considérable pour retrouver un fonctionnement écologique. Il est donc plus pertinent de concentrer les nouvelles constructions sur ces zones fortement dégradées, afin de préserver au maximum les sols encore fonctionnels.

Pour connaître le degré de dégradation, et donc le niveau de fonctionnalité d'un sol, il est important de se référer aux études préalables. L'**étude agro-pédologique** fournit des préconisations complètes sur le potentiel de réemploi des sols en place. Le Plan de gestion (PG) définit le ou les solutions techniques les plus adaptées pour maîtriser le risque sanitaire liés à la pollution des milieux eau, sol, air.



Figure 8 : Actions à mener sur les sols selon l'état de dégradation initial de leurs fonctions ©ARP Astrance

Dans une optique de refonctionnalisation, quel que soit l'état initial du sol, il est pertinent de cibler les objectifs pour mieux orienter les actions à mener.

Les actions sont à mener en fonction de l'état initial des sols (dégradation) et des enjeux du projet (état final projeté - état écologique de référence à retrouver).



État écologique de référence et renaturation

La renaturation est un retour à une nature sur le site, mais pas forcément vers le type de nature qui s'y trouvait auparavant. Ceci est lié au fait que l'état écologique historique du site est la plupart du temps peu connu ou inconnu. Certains milieux peuvent présenter un intérêt pour un projet d'aménagement comme par exemple la restauration d'une zone humide, bois, habitats côtiers, etc. Le milieu écologique visé peut être choisi parmi une liste de milieux écologiques type en cohérence avec le contexte pédoclimatique du site, les résultats du diagnostic agro-pédologique et du diagnostic pollution et selon d'autres critères socio-économiques, politiques et culturels. Ces milieux à restaurer peuvent être déclinés suivant la typologie EUNIS : unités retenues de A à H les moins artificialisées.

Pour aller plus loin : [Guide de l'INEREIS : Méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués, 2025.](#)

FOCUS

INTEGRER LES SOLS DANS LA DEMARCHE ERC

Introduite dans le droit français en 1976 par la loi sur la protection de la nature, la séquence **Éviter, Réduire, Compenser (ERC)** vise à limiter l'impact écologique des projets d'aménagement. La loi Climat et Résilience de 2021 et l'objectif Zéro Artificialisation Nette (ZAN) ont renforcé la prise en compte des sols en y appliquant ce même principe ERC. Les sols étant essentiels au bon fonctionnement des écosystèmes, ils devraient être directement intégrés dans les études réglementaires au même titre que la faune, la flore et les habitats. Pourtant, **leur analyse reste souvent absente des études d'impact** (J. Cortet et al.).

- **Éviter (E)** : prévenir la dégradation des sols dès la phase de conception. Un diagnostic pédologique en amont permet d'identifier les zones sensibles (pollutions, érosion, compaction) et d'adapter l'implantation du projet pour limiter l'emprise au sol. L'organisation des travaux et la gestion des engins doivent également être pensées pour minimiser les perturbations.
- **Réduire (R)** : limiter les impacts résiduels grâce à des techniques adaptées. Un travail du sol minimal, des amendements organiques et des dispositifs de gestion de l'eau favorisent le maintien de la fertilité et de la structure des sols. En parallèle, les risques de pollution doivent être maîtrisés par des mesures de dépollution et de protection des sols durant le chantier.
- **Compenser (C)** : restaurer ou recréer des sols fonctionnels lorsque les impacts sont inévitables. La réintroduction d'organismes du sol, l'apport d'amendements ou encore l'utilisation de techniques de génie écologique permettent de retrouver des sols vivants et productifs. Un suivi régulier est nécessaire pour ajuster les pratiques et garantir la réussite des mesures mises en place.

L'intégration des sols dans la séquence ERC est une approche essentielle pour limiter l'artificialisation et préserver leur rôle fondamental dans les écosystèmes.

1.3.1. 2) Se connecter à la trame brune : continuité des sols fonctionnels

Dans la spatialisation du projet, il est essentiel de considérer les connexions potentielles à la **trame brune locale**, c'est-à-dire la continuité des sols peu ou pas dégradés. Cette approche permet d'orienter l'implantation des zones de refunctionalisation en favorisant leur connexion avec des sols fonctionnels attenants. En plus de renforcer les continuités brunes locales, cette continuité facilite la recolonisation du sol restauré par les organismes du sol, un processus clé pour retrouver un fonctionnement écologique optimal.

La recolonisation est un **phénomène progressif**. Les différents groupes d'espèces montrent des dynamiques de colonisation variables. Les microarthropodes et les bactéries semblent recoloniser plus rapidement les technosols que la macrofaune, bien que l'abondance et la diversité de tous les taxons tendent à s'intensifier (Biodiversité et fonctionnement d'un technosol construit utilisé dans la restauration de friches industrielles (BIOTECHNOSOL), J. Cortet et al. 2013). À mesure que les organismes recolonisent le sol, un **réseau trophique complexe** se met en place, jouant un rôle déterminant dans la structuration du sol et la restauration de ses fonctions écologiques.

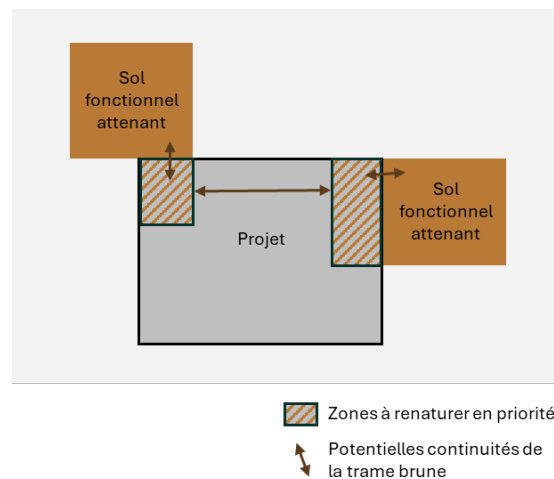


Figure 9 : Schéma du principe d'implantation des zones renaturées pour favoriser la trame brune à l'échelle de son projet ©ARP Astrance

1.3.1. 3) Définir les usages à l'échelle de son site en adaptant à l'état initial et aux enjeux projetés

L'aménagement d'un site implique une réflexion sur la **spatialisation des usages** afin de préserver les sols et favoriser leur refunctionalisation. Plutôt que d'adopter une approche uniforme, il est essentiel d'adapter l'aménagement en fonction de l'état initial des sols, de leur potentiel écologique et des enjeux projetés. Cette différenciation permet d'intégrer un **gradient de naturalité** et d'**optimiser à la fois les usages humains et la conservation des sols**.

Un site peut être pensé selon un **gradient allant des espaces fortement aménagés aux zones préservées**, en fonction des caractéristiques des sols et des dynamiques écologiques locales :

- **Zones refuges, sol préservé** : espaces de conservation et de restauration des sols, refuges pour la biodiversité du sol et la faune associée. Ces espaces nécessitent une intervention minimale pour maintenir leur équilibre (boisements spontanés, prairies naturelles, zones humides).
- **Zones intermédiaires** : secteurs où les sols sont modérément altérés et peuvent être restaurés ou aménagés avec des techniques douces (sols végétalisés, stabilisés, infiltration des eaux pluviales).
- **Zones à usage intensif** : espaces dédiés aux infrastructures, aux cheminements ou aux activités nécessitant un sol stabilisé. Ici, la gestion des sols passe par des choix techniques permettant de limiter leur imperméabilisation et d'optimiser leur infiltration et leur porosité.

Cette spatialisation doit être structurante dans la conception du projet, mais également prise en compte pour la gestion future du site. La partie 3.2 oriente sur les pratiques de gestion respectueuses des sols. En différenciant les usages à l'échelle d'un site, il devient possible de limiter l'impact sur les sols, tout en conciliant les objectifs du projet et la préservation des fonctions écologiques essentielles.

Dans le cadre d'une pollution des sols, il sera nécessaire de s'assurer de la comptabilité de l'usage renaturation avec les pollutions en place sur le site. La gestion de la pollution des sols et des eaux souterraines repose sur l'absence de risque sanitaire ou environnemental lié aux usages définis. Cette étude peut conduire à la mise en place d'une couverture végétale permettant de couper les voies de transferts vers l'homme et/ou la mise en place d'une restriction d'usage avec potentiellement une surveillance environnementale des milieux impactés (sols et/ou eaux souterraines). L'usage renaturation est défini dans le cadre d'une analyse multicritères intégrée dans le plan de gestion (bilan coût/avantage). Ce Plan de gestion (PG) peut conduire à différentes techniques d'intervention (retrait des pollutions concentrées, traitement sur site ou in-situ des pollutions concentrées, gestion des pollutions non concentrées via l'utilisation des phytotechnologies, mise en place d'une couverture végétale, etc.)



Figure 10 : Exemple de différenciation des espaces sur la base d'un "gradient de naturalité", applicable en conception et en gestion ©ARP Astrance

I.3.2. Hiérarchiser ses objectifs de refonctionnalisation

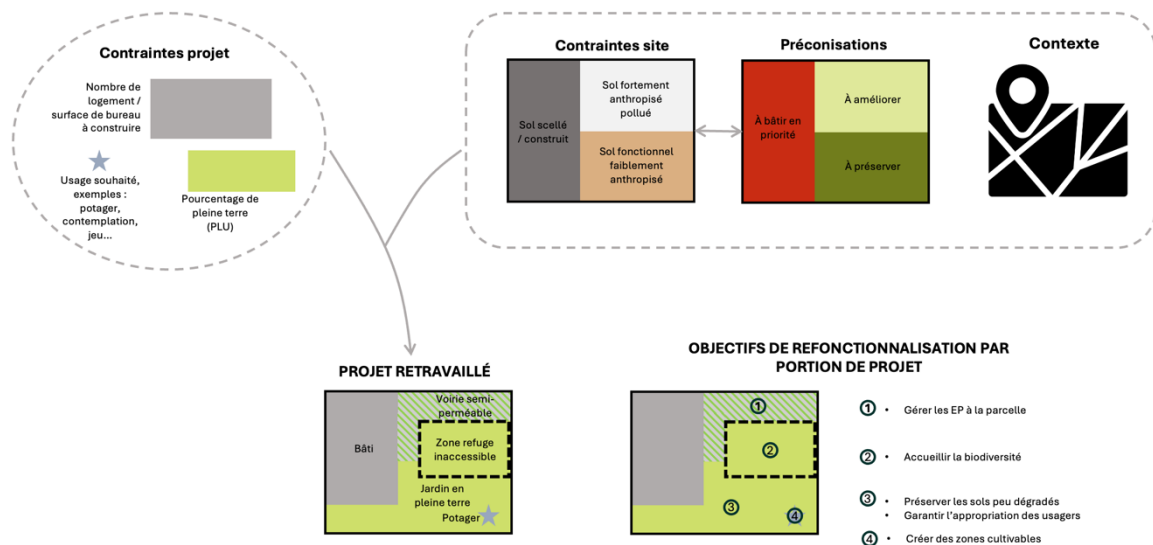


Figure 11 : Stratégie de hiérarchisation des enjeux de refonctionnalisation des sols ©ARP Astrance

Dans le but d'orienter la conception du projet, et notamment les fonctions des sols à retrouver, 5 grands objectifs de refonctionnalisation sont proposés :

1. **Accueillir la biodiversité** : fournir des habitats écologiquement fonctionnels, adaptés aux organismes végétaux et animaux (prairies, forêt urbaine, zone humide, etc.)
2. **Améliorer la gestion des eaux pluviales** : maximiser l'infiltration et/ou le des eaux pluviales lors d'événements pluvieux exceptionnels
3. **Créer des zones cultivables** : garantir un sol de bonne qualité agronomique, pédologique et chimique (absence de risque sanitaire liées aux productions alimentaires).
4. **Maximiser la fraîcheur** : favoriser la rétention en eau des sols, les échanges gazeux entre sol et atmosphère et maximiser une végétation évapo-transpirante
5. **Garantir l'appropriation des espaces par les usagers** : être un support de végétation qui soit adapté à l'usage du site, en termes de sécurité, d'esthétique, de pression liée à la fréquentation, etc.

L'enjeu de gestion de la pollution n'a pas été retenu ici comme un objectif de renaturation, puisqu'il s'agit d'une obligation réglementaire. Pour toute question relative à la gestion de la pollution, se référer à la partie 2.3.1.

FOCUS

LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES RENDUS PAR LES SOLS

Les objectifs de renaturation définis ici sont une traduction opérationnelle des services écosystémiques rendus par les sols à maximiser sur le projet. Pour rappel, ces services reposent sur les fonctions des sols, elles-mêmes régies par leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. L'articulation entre fonctions des sols et objectifs de refonctionnalisation sera davantage explorée dans la partie 3.

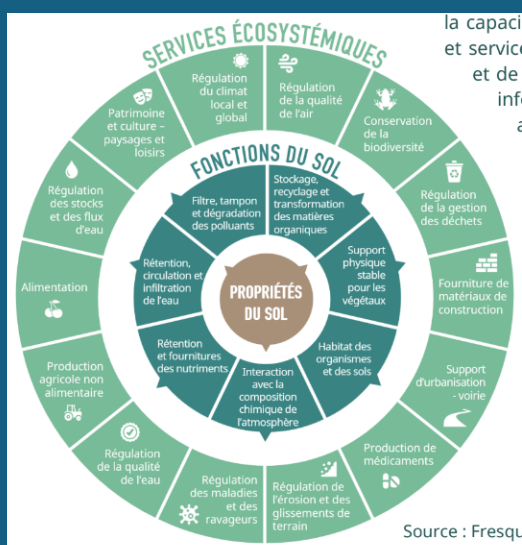


Figure 12 : Services écosystémiques et fonctions du sol ©FédéSCOT, à partir de La fresque du sol, ADEME

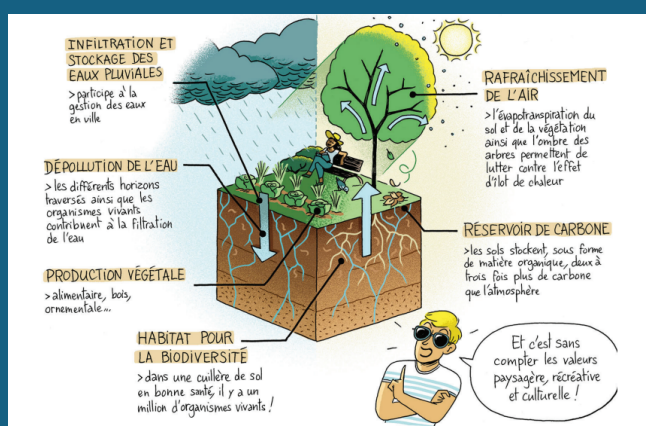


Figure 13 : Les supers pouvoirs des sols ©Matthieu Ughetti - Cerema, 2019

La **hiérarchisation** de ces objectifs dépend des enjeux propres au site, déterminés à la fois par son état initial et par l'état projeté. Ces enjeux doivent être identifiés lors des **études préalables** (voir partie 1.2) et affinés à travers l'analyse des premiers éléments de conception, en s'appuyant sur les principes de spatialisation précédemment définis (1.3.1). Étant donné que les conditions et contraintes peuvent varier d'une zone à l'autre au sein du projet, il est essentiel **d'adapter la priorisation des objectifs en fonction des spécificités de chaque portion du site**.

Le tableau qui suit donne un premier aperçu de la priorisation des enjeux en fonction des différents facteurs. Une **version complète sous forme d'arbre de décision** pourra être mobilisée en annexe du référentiel.

Tableau 3 : Hiérarchiser ses objectifs de refonctionnalisation

Facteurs	Dans quel document trouver l'information ?	Objectifs prioritaires de refonctionnalisation				
		Accueillir la biodiversité	Gérer les eaux pluviales	Maximiser la fraîcheur	Garantir l'appropriation des futurs usagers	Fournir une bonne qualité agronomique
Zone inondable	PPRI / Etude hydrologique		X			
Zone de fragilité des réseaux d'assainissement	Cartographie des réseaux / Etude hydrologique		X			
Zone humide potentielle ou avérée	Zonages nationaux / régionaux Etude écologique	X	X			X
Ouvrage de gestion existant : bassin étanche, réseau canalisé, etc.	Réseau hydrographique / Etude hydrologique		X			
Zonage d'intérêt écologique : ZNIEFF, ZICO, PNR, PN (aire d'adhésion comprise), Natura 2000, etc.	Zonages nationaux / Etude écologique	X				
Présence avérée ou potentielle d'espèces ou d'habitats à enjeu	Etude écologique / Bases de données naturalistes	X				
Zone de potentiel de connectivité à la trame verte et bleue	Etude écologique / Etude des trames / Documentation locale	X				X
Zone à forte sensibilité à l'îlot de chaleur urbain	Zonages locaux / Etude environnementale		X	X		
Cette portion de site sera fréquentée par plus de 200 personnes par jour	Programme				X	
Zone urbaine dense (densité > 250 habitants/hectare)	Etudes Insee / Etude urbaine			X	X	
Volonté d'intégrer un espace d'agriculture urbaine dans une portion du site	Programme Opportunité locale					X

Certains **facteurs de risque** ont des impacts forts sur le dimensionnement du projet, néanmoins leur impact sur la conception doit être appréhendé au cas par cas avec l'appui d'un expert sol :

- **Nature du sous-sol particulière** : risque de dissolution (ex. gypse), difficulté à infiltrer, etc.
- **Risque d'érosion** : favoriser la stabilisation par les racines, adaptation à faire au cas par cas
- **Risque incendie** : rester en conformité sur l'éloignement de la végétation vis-à-vis des bâtiments

Le projet peut aussi être soumis à une **réglementation** apportant des contraintes à prendre en compte, par exemple :

- **ICPE** (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement), pour les activités présentant des risques ou nuisances : dimensionnement spécifique des ouvrages de gestion des eaux pluviales, installation d'ouvrages pour la gestion des incendies. Ces ouvrages ne sont pas toujours « renaturables » (voir tableau ci-dessous)
- **ERP** (Établissement Recevant du Public) et/ou **PMR** (Personnes à Mobilité Réduite) : les normes de sécurité et d'accessibilité peuvent impacter le choix de la végétation, la topographie, l'entretien, etc.

Dans un projet de renaturation, il est nécessaire d'intégrer le diagnostic de la pollution des sols dans un cadre plus large d'évaluation de leur qualité avant et après travaux de dépollution. En effet, certains types de traitements proposés pour traiter la pollution peuvent impacter, modifier ou supprimer certaines caractéristiques écologiques ou pédologiques des sols et donc influencer les fonctions associées. L'évaluation des fonctions du sol qui doivent être conservées/améliorées ou restaurées après mise en œuvre des travaux de dépollution ne peuvent donc pas toujours être appréciées au démarrage du projet de renaturation.

Il est donc important de mener une réflexion sur les interactions entre dépollution et renaturation.

- Si les fonctions du sol sont significativement impactées par le traitement de la pollution :
 - Quelles sont les zones (et donc les sols) qui sont impactées ou modifiées par l'opération de dépollution et qui devront être restaurées dans le cadre du projet de renaturation ?
 - Quelles sont les zones (et donc les sols) qui ne seront pas impactées par l'opération de dépollution ?
- Si les fonctions du sol ne sont pas ou peu impactées par le traitement de dépollution
 - Quelles sont les fonctions du sol qui doivent être conservées au cours du traitement de la pollution ?
 - Est-ce que ces mêmes fonctions doivent être aussi améliorées au cours du projet de renaturation ?

Tableau 4: Réglementation impactante pour les ouvrages de gestion des eaux pluviales ou d'incendie ©ARP Astrance

TYPE DE BASSIN	DESCRIPTION	VÉGÉTALISATION	RÉGLEMENTATION IMPACTANTE	POINTS CLÉS
BASSIN HYDRAULIQUE 	Ouvrage de gestion des eaux pluviales, destiné à infiltrer et/ou stocker les eaux pluviales	 Possible et recommandée sous conditions : végétation adaptée à l'hygrométrie, racines peu profondes si bâché, respect du fonctionnement hydraulique du bassin	- Loi sur l'eau (Code de l'environnement) - ICPE : déclaration/autorisation - PLU et règlement d'assainissement : limitation débit rejeté, taux d'infiltration, zones sensibles - Normes : gestion décennale/vicennale, entretien	Respecter le dimensionnement imposé, éviter les interférences hydrauliques
BASSIN POMPIER 	Bassin de stockage d'eau claire à disposition pour les interventions des pompiers	Généralement non recommandée ; possible sous validation (SDIS/ICPE). <u>Option</u> : radeaux végétalisés avec conditions strictes (encrage, retrait, volume préservé)	- ICPE - Réglementations des assurances et SDIS	Vérifier la conformité avec les autorités compétentes
BASSIN SPRINKLER 	Bassin récoltant des eaux d'extinction d'incendie issues des systèmes Sprinkler (souvent polluées)	Très complexe : hydrométrie variable, eaux polluées, faible acceptabilité réglementaire	- ICPE - Réglementations locales et SDIS	Difficilement compatible avec des objectifs écologiques



Pour aller plus loin :

- **Analyse des risques sur le site projet** : France et outre-mer : [Géorisque](#), pour l'Île-de-France : [Cartoviz](#), Institut Paris Région
- **Analyse contextuelle du site (écologique, hydrologique, social, etc.)** : [Géoportail](#)
- **Analyse du potentiel zone humide** : [Cartographie interactive](#) - Agro Campus Ouest, [Cartographie nationale des zones humides](#) - PatriNat
- **Analyse de la sensibilité au risque d'îlot de chaleur urbain** : [Cartographie des zones climatiques locales \(LCZ\)](#) - Cerema
- **Analyse des continuités écologiques** : Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE), Schéma régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET), cartographies locales des trames vertes et bleues

1.3.3. Quels sont les coûts de la renaturation et comment les réduire ?

EN BREF

Qui ? #MOA #Economiste

Quelle phase de projet ? #Programme #AVP

Objectif : Identifier les leviers pour réduire les coûts de la renaturation des sols urbains tout en garantissant son efficacité écologique, et trouver des sources de financement adaptées au projet.

Les coûts médians de la renaturation sont estimés entre **50 à 320 €/m²** (Salin et al. 2025). Cette grande variabilité est due à la grande diversité d'itinéraires techniques, d'états initiaux et d'états projetés visés. Pour maîtriser ces coûts, il est crucial d'**anticiper les dépenses, d'identifier des financements adaptés et d'optimiser les interventions** pour limiter les coûts tout en garantissant l'efficacité écologique du projet.

1.3.3. 1) Échelles de coûts : comparaison des estimations existantes

Les coûts de renaturation varient fortement en fonction du type de sol et des techniques employées.

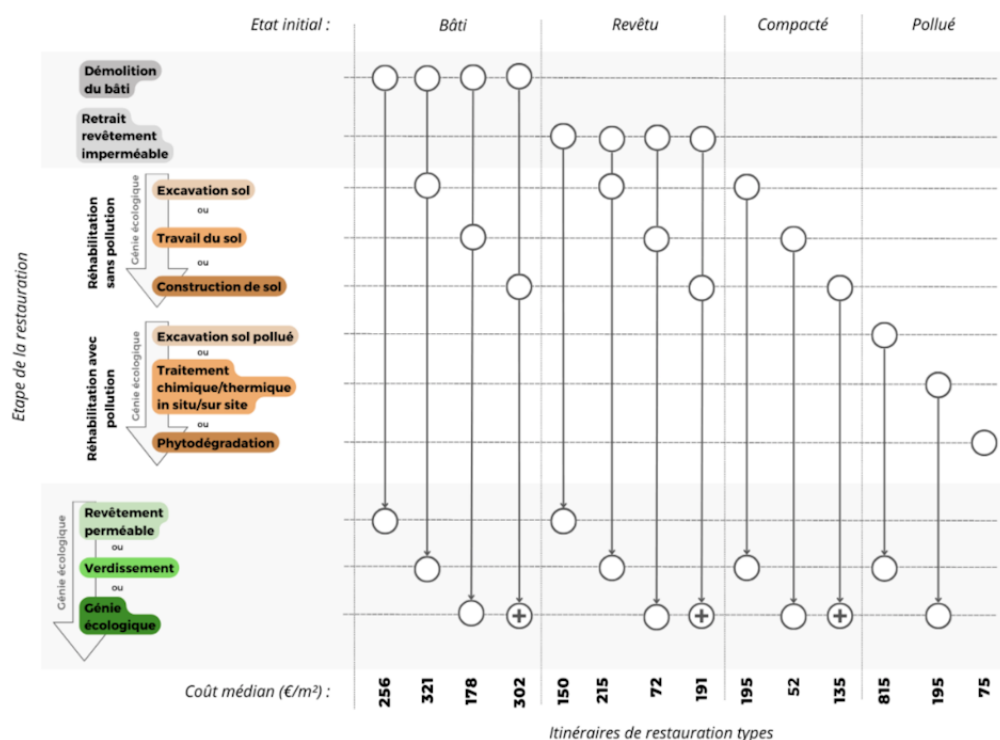


Figure 14 : Coût médiant d'un projet de renaturation selon les itinéraires techniques employés ©Salin et al. 2025

Selon l'étude de Salin et al. (2025), *Les coûts de la restauration des sols urbains* ([Les coûts de la restauration des sols urbains](#)), réalisée à partir d'entretiens avec une cinquantaine d'acteurs du secteur, les coûts médians de restauration des sols urbains varient en fonction de l'état initial des sols.

Pour les sols compactés, imperméabilisés ou construits, ces coûts se situent **entre 50 et 320 €/m²**. En revanche, **pour les sols pollués, les coûts peuvent dépasser les 800 €/m²**.

La restauration des sols urbains implique une séquence d'interventions comportant jusqu'à dix étapes, combinant diverses techniques. Cette diversité des approches entraîne une variation notable des coûts selon les types d'interventions. Parmi ces étapes, les études préalables représentent l'une des étapes les moins coûteuses, tandis que la démolition du bâti et l'assainissement du sol figurent parmi les interventions les plus onéreuses. Cette répartition des coûts souligne l'importance des spécificités de chaque projet et la nécessité d'une planification détaillée pour optimiser les dépenses liées à la restauration des sols urbains.

Dans le cadre du projet DESSERT, Plante & Cité a réalisé des sondages sur le coût des opérations de descellement. Les résultats ont révélé que les études préalables ne représentent que 10% du coût total des opérations en moyenne. Le coût global, renseigné par 42 répondants, se répartit comme suit : 12 opérations à moins de 100 €/m², 16 entre 100 et 300 €/m², et 14 au-delà de 300 €/m².

1.3.3. 2) Identifier les financements : un levier clé pour la faisabilité des projets

Les projets de renaturation peuvent bénéficier de plusieurs sources de financement, dont voici une première liste non exhaustive :

- Fonds publics, subventions et appels à projets :
 - Banque des territoires : financements dans le cadre du programme d'investissement d'avenir (PIA 4) ou dans le cadre du programme Action Cœur de Ville (financement de l'ingénierie)
 - ANRU (Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine) : financements de projets de renaturation au sein de projets de renouvellement urbain
 - Agences de l'eau : subventions d'actions
 - FEADER (Fonds européen agricole pour le développement rural) : finance principalement des actions en milieu agricole ou naturel (MAEC : mesures agro-environnementales et climatiques)
 - FEDER (Fonds européen de développement régional) : financement de projets dans le cadre du développement des territoires
 - Programme Life+ : volet de financement sur la nature et la biodiversité
 - Fonds Vert : financements au titre des mesures « recyclage foncier » et « renaturation des villes et des villages »
 - CDC Biodiversité : financements dans le cadre du programme Nature 2050
 - ADEME : accompagnement des territoires à la mise en œuvre du ZAN
 - Office Français de la Biodiversité (OFB)
 - Collectivités territoriales : les Fonds régionaux pour la biodiversité et certains financements des départements peuvent accompagner des opérations de renaturation
- Fonds privés : Entreprises engagées dans la transition écologique, promoteurs immobiliers.
- Mécénat et partenariats : Engagement d'entreprises via la RSE, fondations environnementales.

La fédération des SCoT, dans le cadre de son étude « Renaturer » (2024), a listé un ensemble de sources de financement pour des projets de renaturation. Cette liste, assortie de précisions sur les démarches à entreprendre, peut être consultée [à ce lien](#).

Il peut être pertinent de formaliser des partenariats pour partager les coûts :

- Mutualisation des ressources entre plusieurs maîtres d'ouvrage ou collectivités.
- Contrats adaptés (marchés publics, conventions, partenariats public-privé).

Il est important de noter également que les bénéfices de la renaturation sont nombreux sur le long terme, y compris en termes d'investissements futurs évités. Ils restent toutefois difficiles à quantifier financièrement :

- Amélioration du cadre de vie : Espaces verts accessibles, îlots de fraîcheur.
- Santé publique : Réduction de la pollution de l'air, bien-être psychologique.
- Gestion des eaux : Infiltration des eaux pluviales, réduction des risques d'inondation.
- Valorisation foncière : Augmentation de l'attractivité des quartiers

La Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) estime ainsi que les bénéfices de la restauration des sols sont jusqu'à 10 fois supérieurs à ses coûts ([source](#)).

1.3.3. 3) Leviers pour réduire les coûts de la renaturation

Pour réduire les coûts liés à la refunctionalisation des sols, il existe plusieurs leviers :

Adapter le projet au site pour limiter les interventions lourdes

- Conserver les sols existants et éviter les terrassements inutiles.
- Réutiliser les surfaces scellées (ex. : dalle béton) plutôt que de les démolir.
- Maîtriser les impacts liés à la pollution des sols : intégrer les critères écologiques dans les bilans coût/avantage afin d'adapter les solutions de gestion de la pollution à l'usage renaturation.

Optimiser les matériaux et favoriser l'économie circulaire

- Réutiliser les matériaux présents sur site (pierres, terre, matériaux issus de la démolition du bâti, terres excavées, déchets verts) pour limiter les achats et les coûts liés à l'évacuation des déchets.
- Récupérer des matériaux issus d'autres chantiers à proximité pour réduire les coûts d'extraction et de transport.
- S'approvisionner via des plateformes de valorisation (terres excavées, compost, matériaux recyclés ou biosourcés).

Réduire les coûts d'entretien post-livraison

- Favoriser la végétation spontanée pour réduire les achats et la plantation.
- Privilégier les milieux naturels tels que les forêts et prairies, qui demandent moins d'entretien que des espaces verts classiques.
- Planifier une gestion différenciée avec des interventions limitées.
- Privilégier les espèces locales (prise en compte du changement climatique dans les choix des espèces végétales).



Figure 15 : Identification des principaux facteurs d'impact sur les coûts de la renaturation ©Salin et al. 2025



Pour aller plus loin :

- **Quelle fourchette de coûts par étapes du projet de renaturation ?** ([Les coûts de la restauration des sols urbains](#))
- **Quels financements sont dédiés à la renaturation des sols ?** Renaturer les sols – CDC Biodiversité ([renaturer-les-sols.pdf](#))
- **Quels coûts pour les opérations de descellement ?** Désimpermeabiliser les villes – Plante&Cité ([Guide P C desimpermeabilisation V4.pdf](#))
- **Plateforme de réemploi :** [Cycle up](#)
- **Fournisseur de terre végétale issue de réemploi :** [Terre Utile](#), [Terre fertile](#)

1.3.4 Dimension temporelle

EN BREF

Qui ? #MOA

Quelle phase de projet ? #Programme

Objectif : Anticiper les délais des différentes étapes du projet et avoir une vision sur les étapes nécessaires à la refonctionnalisation

La refonctionnalisation des sols s'inscrit dans la conception et la réalisation de l'ensemble d'un projet le cas échéant. La durée de chacune des étapes dépend fortement de la complexité du projet, de la surface à refonctionnaliser, du contexte pédoclimatique et de l'hétérogénéité des sols en place, et des jeux d'acteurs. Des ordres de grandeur de ces temporalités sont donnés ci-après, ainsi que quelques indications sur les invariants à prendre en compte.

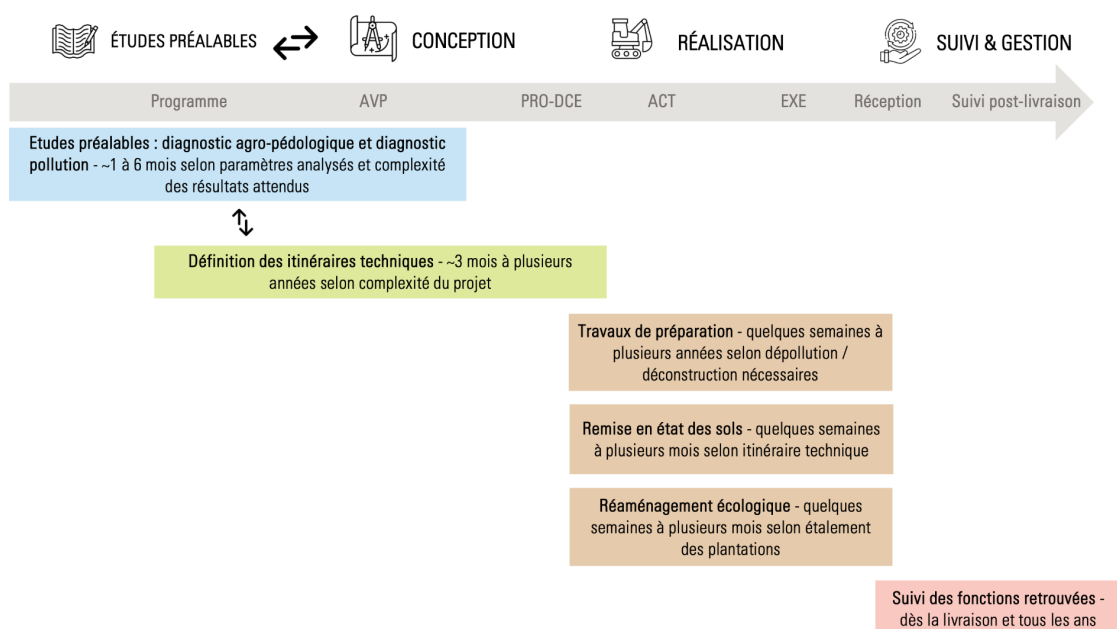


Figure 16 : Temporalité d'une opération de refonctionnalisation des sols ©ARP Astrance

! Le diagnostic agro-pédologique

Un diagnostic agro-pédologique peut être réalisé toute l'année, car la plupart des paramètres physico-chimiques sont mesurables en continu, sauf période exceptionnelle (fortes pluies ou forte sécheresse). Cependant, certains indicateurs nécessitent une saisonnalité adaptée. Par exemple, l'analyse des **communautés de vers de terre, de la macrofaune épigée (cloportes, carabes, fourmis...)** ou encore **de la mésofaune (collembolles)** doit idéalement être menée au printemps ou à l'automne, par temps sec, pour obtenir des résultats représentatifs. Attention également aux zones humides, qui, par le critère "sol" ne peuvent être détectées correctement en été ou en hiver.

La phytoextraction : un processus long et inadapté

Le temps nécessaire pour réduire la charge polluante via une technique de phytoextraction, notamment des métaux lourds, n'est pas typiquement compatible avec la durée d'un projet d'aménagement. Une alternative consiste à sanctuariser certaines zones du site qui présentent des pollutions non concentrées ou à adapter les usages en fonction des niveaux de pollution afin d'atteindre une acceptabilité du risque sanitaire avec les usages de renaturation (ex : recouvrir certaines zones fréquentées par l'homme, sanctuariser des zones végétalisées uniquement destinées à accueillir une biodiversité végétale et animale).

Diagnostic eaux souterraines

Le diagnostic pollution intègre des analyses sur les eaux souterraines (et sur les eaux superficielles et/ou sédiments le cas échéant). Ces diagnostics, notamment des eaux souterraines, peuvent intégrer des campagnes de prélèvement sur plusieurs périodes de l'année (ex : en période de hautes et basses eaux) afin de mieux apprécier les transferts des polluants vers la zone saturée.

Diagnostic faune/flore

Ce type de diagnostic peut nécessiter plusieurs campagnes d'observation et de terrain pouvant s'étaler sur 1 ou 2 années : étude 4 saisons

Le bon timing pour la plantation

La réussite des plantations repose sur un calendrier adapté. En règle générale :

- Printemps : période propice pour les semis et la mise en place des vivaces.
- Automne : idéal pour la plantation des arbres et arbustes, favorisant un bon enracinement avant l'été.

Il est essentiel de se fier aux recommandations du paysagiste pour affiner ces choix en fonction du climat local et des espèces sélectionnées.

Adapter le calendrier des travaux aux sensibilités écologiques

L'organisation des interventions doit intégrer les périodes sensibles pour la faune et la flore du site. Une analyse préalable permet d'ajuster le phasage des travaux pour limiter les impacts, par exemple en évitant les périodes de nidification des oiseaux ou la floraison de certaines espèces protégées. Cet enjeu relève de la réglementation environnementale qui interdit toute atteinte à des espèces protégées ou habitats d'espèces protégées.



II - Réaliser son projet de renaturation

II. Réaliser son projet de renaturation

La mise en œuvre d'un projet de renaturation implique une série d'étapes techniques visant à désartificialiser, refunctionaliser, et végétaliser les sols. Afin d'opter pour les techniques et stratégies les plus adaptées, on peut les comparer selon des critères de temporalité, de coût, de difficulté technique et d'impact environnemental.

! Réaliser un **diagnostic ressource** en phase préparatoire permet d'identifier les opportunités de réemploi, de recyclage et de valorisation des matériaux du site ou à proximité (chantiers attenants) pour inscrire le projet dans une démarche d'économie circulaire et diminuer les coûts de fourniture, de transport, etc.

La réalisation peut être divisée en trois parties : les travaux de préparation, la remise en état des sols et le réaménagement écologique.

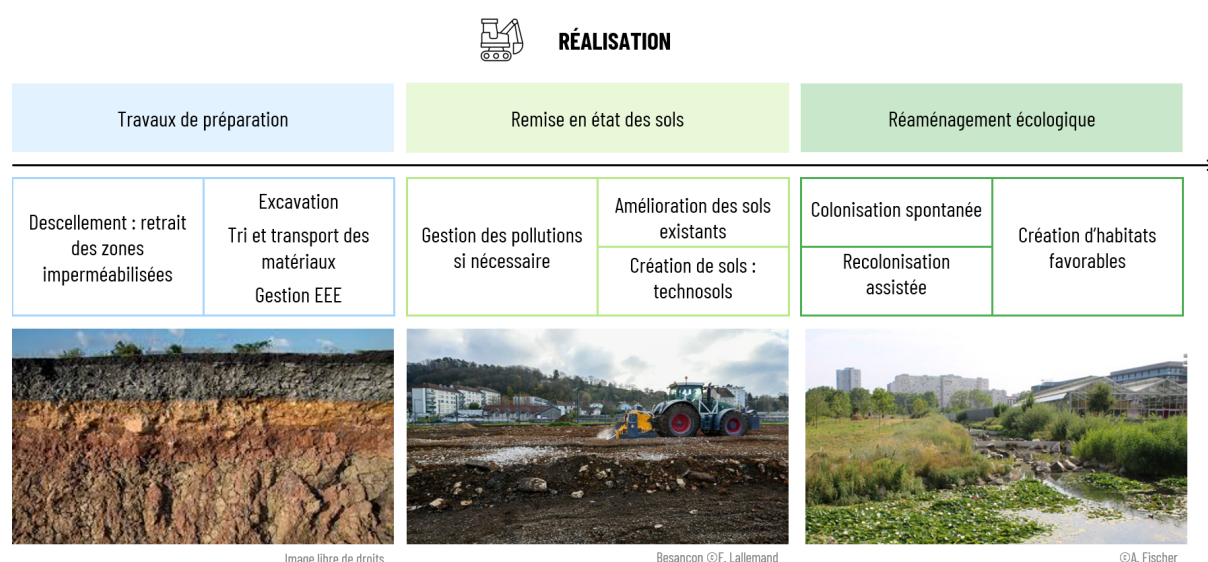


Figure 17 : Déroulement de la réalisation d'un projet de refunctionalisation ©ARP Astrance

La présente partie a pour but de **mieux comprendre les techniques mises en œuvre** dans ce type de projet et d'orienter la rédaction des pièces constitutives du PRO-DCE : CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières) et DPGF (Décomposition des Prix Globale et Forfaitaire) des lots concernés en particulier lots espaces verts, VRD (Voiries Réseaux Divers), éventuellement gros-œuvre, terrassement (en fonction de l'allotissement des travaux). Pour aller plus loin, le référentiel du projet DESSERT (Schwartz et al. 2024) développé par le Laboratoire Sols et Environnement, l'Université de Lorraine et l'INRAE propose des orientations pratiques dans sa section "Comment desceller".

CHOIX DES ENTREPRISES

Les capacités des entreprises à réaliser les travaux relatifs à la renaturation doivent être absolument évaluées dès la phase de consultation. Les critères d'analyse des offres et de sélection des candidats peuvent par exemple intégrer la demande de :

- **Références de projets** réalisés impliquant descellement / réemploi de sol / amélioration de sol / etc.
- Qualité du **mémoire technique** sur les étapes du chantier de renaturation
- Qualité des indicateurs sélectionnés pour l'étude et du plan d'échantillonnage qui doit être assez représentatif des sols en place
- **Planning de formation** des compagnons sur les bonnes pratiques de préservation des sols en phase chantier, sur la création d'habitats pour la faune, sur la diminution des nuisances en phase chantier, etc.
- **Compétence de l'équipe projet** : étant donné le caractère pluridisciplinaire de la renaturation particulièrement sensible aux particularités du territoire, l'équipe projet sera constitué d'une équipe regroupant plusieurs expertises en écologie, pédologie, agronomie, sites et sols pollués, en fonction des besoins et spécificités du projet.

Pour les travaux relatifs à la remise en état des sols et au réaménagement écologique, il est conseillé de faire appel à une entreprise spécialisée dans l'aménagement paysager. Certaines qualifications peuvent orienter ce choix (exemple Qualipaysage). Néanmoins les références de projets restent à considérer en priorité dans le choix de l'entreprise.

Pour la réalisation des études (LEVE, DIAG et PG) et des travaux de dépollution, il est nécessaire de faire appel à des prestataires certifiés LNE SSP (référentiel suivant les normes françaises NF X 31-620). Cette certification concerne 3 domaines d'activité : études, assistance et contrôle – ingénierie des travaux de réhabilitation - exécution des travaux de réhabilitation.

II.1 Phase chantier

EN BREF

Qui ? #MOA #Architecte #Paysagiste #Pédologue #Ecologue #Entreprises de travaux

Quelle phase de projet ? #PRO-DCE #EXE

Objectif : Garantir un chantier à faible impact environnemental et qui préserve au maximum la fonctionnalité des sols.

II.1.1 Avant le chantier - anticipation

L'anticipation de la phase chantier est une étape déterminante pour garantir la réussite d'un projet de renaturation. Cette préparation rigoureuse repose sur la mise en place de **documents de référence** solides et sur la formalisation d'**engagements environnementaux précis**, tout en veillant à la sensibilisation et à la formation de l'ensemble des intervenants.

II.1.1. 1) Les enjeux à prendre en compte

Cette anticipation doit impérativement couvrir les aspects fondamentaux suivants : la **gestion des sols**, la **protection de la flore et de la faune**, ainsi que la **prévention des pollutions**.

La **protection des sols existants** est essentielle dans la réussite du projet. Il s'agit de prévoir, mettre en place et maintenir les **protections temporaires nécessaires** et la délimitation claire des zones de chantier, mais aussi de mettre en œuvre des mesures spécifiques pour préserver leur structure. Il convient de **définir clairement en amont du chantier** l'entreprise qui aura la charge de cette prestation de fourniture, mise en place et surveillance des protections tout au long du chantier.

L'idéal est de conserver les sols dans leur état initial sans déblais/remblais pour en préserver au maximum la structure et les espèces qui s'y trouvent. Néanmoins, si le projet implique de déblayer/remblayer une partie des sols, une attention particulière sera apportée aux **pratiques de stockage** (voir partie 2.2.2).

La **gestion des déblais et remblais** doit être rigoureuse, en privilégiant un **tri rigoureux** et le contrôle de la **qualité des terres**. La prévention des pollutions, la **préservation de la fertilité des sols**, la **gestion des eaux pluviales** et des **espèces exotiques envahissantes**, ainsi que la gestion des pièges à faune et des déchets, sont autant d'aspects cruciaux à considérer. Une attention particulière doit être portée à la gestion de l'eau, en mettant en place des dispositifs de rétention et d'infiltration pour limiter le ruissellement et l'érosion des sols en place.

La **prévention et la réduction des pollutions** en phase chantier (chimiques, sonores, lumineuses) est primordiale. En particulier, les risques de pollution des sols du site ou alentour doivent être maîtrisés par la mise en place de dispositifs de rétention, la gestion des eaux de ruissellement et la surveillance régulière des zones de stockage de produits dangereux. Un protocole de gestion des pollutions en cas d'urgence doit être établi dès la préparation du chantier (ex. présence d'un kit antipollution sur le chantier, formation des compagnons, etc.). Il convient d'analyser la composition et la propriété des échantillons de sol à différentes profondeurs et emplacement du chantier. Ces analyses permettent de détecter toute contamination ou dégradation du sol et de prendre les mesures correctives nécessaires avant le début du chantier.

La protection de la flore et du patrimoine arboré existant doit être assurée par la mise en place de mesures de conservation adaptées, en tenant compte des spécificités des espèces : emprise du système racinaire, emprise des parties aérienne.

La limitation des perturbations sur la faune doit être une priorité, en adoptant des techniques de travail respectueuses de la biodiversité et en veillant à la protection des habitats naturels. En particulier, il s'agit d'adapter les calendriers d'intervention pour éviter de commencer en période de nidification. Certaines bonnes pratiques sont aussi nécessaires pour réduire l'impact : éviter les pièges écologiques (cavités, bassins sans échappatoires, etc.), éviter de stocker du matériel non bâché sur de longues durées au printemps, mettre en place un protocole d'alerte en cas de présence d'individus sur le chantier (suivi écologue), etc.

II.1.1. 2) Les documents cadres à amender

Pour garantir l'efficacité de cette anticipation, il est essentiel de s'appuyer sur des **documents de référence** tels que le **Plan d'Installation de Chantier (PIC)**, la **charte chantier** (définissant les périodes d'intervention pour minimiser les perturbations), les engagements environnementaux et les protocoles de gestion des déchets et des **espèces exotiques envahissantes (EEE)**.

Enfin, la **sensibilisation du personnel de chantier et des intervenants** est un élément clé pour assurer l'adhésion à la démarche et la mise en œuvre effective des bonnes pratiques environnementales.

Plan d'Installation de Chantier (PIC)

Le **PIC** doit représenter les éléments structurants pour la préservation des sols du site dans le but de minimiser l'impact du chantier sur les sols. En particulier :

- Identification des **zones préservées** (sol fonctionnel, habitat écologique, arbres) et le **balisage associé**
- Représentation des **emprises au sol temporaires ayant un impact sur les sols** (compactage notamment) dans le but de les minimiser : aires de nettoyage, poste béton, des aires de stockage des postes d'atelier, de la base vie, des abris engins, des voies d'accès, des stationnements, des circulations piétons et engins et de la clôture chantier. Il convient d'identifier la hauteur des différents éléments pour vérifier la compatibilité entre la rotation des engins et les arbres protégés.
- **Surface nécessaire au stockage des matériaux excavés** en vue de leur réutilisation. Cette évaluation doit prendre en compte le volume total des matériaux extraits, leur nature (terre, gravats, sédiments, etc.) et leur tri, en prévoyant un espace dédié pour chaque type de matériau. Organiser le stockage sous forme de tas distincts permettra d'optimiser leur gestion, de faciliter leur réemploi et de limiter les risques de contamination ou de dégradation. Une bonne planification de ces aspects contribuera à réduire les coûts et les impacts environnementaux du projet.

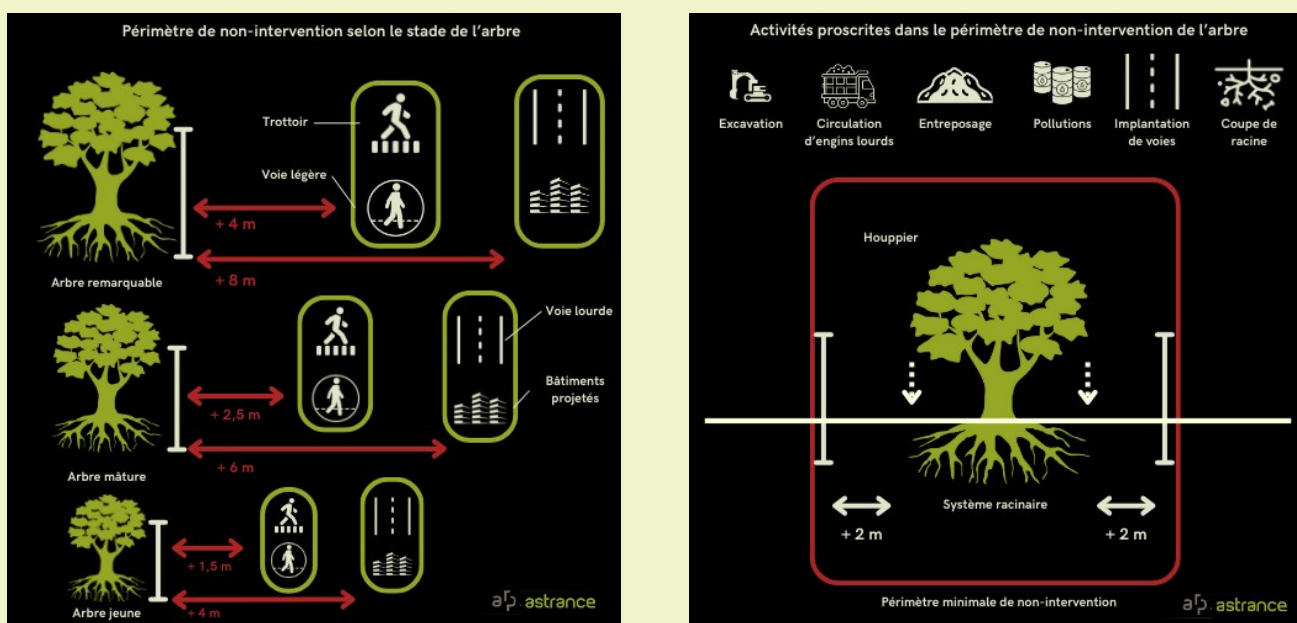
FOCUS

PROTECTION DE LA VEGETATION EXISTANTE

La **protection de la végétation existante** et des zones mises en défens est cruciale pour préserver la biodiversité et la stabilité écologique du site.

Avant le début des travaux, il est important de **délimiter les zones sensibles et de les protéger par des clôtures**. La **mise en défens** consiste à restreindre l'accès piéton, le stockage et le stationnement et la circulation d'engins dans une certaine emprise autour de la végétation.

Des inspections régulières doivent être effectuées pour vérifier l'efficacité des mesures de protection et prendre des actions correctives si nécessaire. L'entreprise en charge de l'installation et la surveillance de ces éléments doit être clairement identifiée en amont du chantier.



La charte chantier

La charte chantier répertorie les engagements des entreprises sur les sujets environnementaux. Il est important d'y intégrer les sujets précédemment énoncés en lien avec la préservation des sols (2.1.1.1). Il est également possible de créer une **charte spécifique au sujet sol** pour en accentuer l'importance. Un engagement des entreprises est alors à exiger sur la base de cette charte. Pour en renforcer l'impact, il est recommandé d'instaurer des **pénalités** en cas d'atteinte au sol et/ou à la végétation préservée.

II.1.2. Pendant le chantier

FOCUS

PREPARATION DU CHANTIER

Selon les ambitions du projet, il est recommandé de demander à l'entreprise de mesurer la température et la perméabilité du sol avant descellement. Ces mesures, préconisées par le référentiel DESSERT pour établir un état zéro, sont simples à réaliser en été. Elles permettent de mettre à jour ou d'établir l'**état zéro** de la fonctionnalité des sols, selon l'ancienneté ou l'absence d'un diagnostic de sol. Le choix de ces analyses peut aussi être ajusté en fonction du budget (voir partie 3.1).

Selon les enjeux du site, un micro-inventaire peut également être envisagé pour vérifier l'absence d'espèces protégées. Toutefois, une attention particulière est nécessaire pour concilier la période idéale d'analyse des sols (en été, selon le projet DESSERT) avec celle de l'étude de la faune (hors période de nidification).

II.1.2. 1) Respect des engagements en phase chantier

- **Vérification du respect des engagements :**
 - Contrôle de l'application de la charte chantier et du PIC
 - Mise en place et suivi des mesures de réduction des nuisances
 - Contrôle du respect des itinéraires et emprises définis

Afin de prévenir les impacts sur la faune, les mesures suivantes seront mises en œuvre, telles que l'identification et la suppression des cavités pièges, le nettoyage quotidien du chantier pour éviter les pièges accidentels pour la faune, et la surveillance des zones de protection pour éviter les intrusions.

Le suivi en phase chantier est essentiel pour garantir la réussite d'un projet de renaturation. Il comprend la planification minutieuse des travaux, le suivi quotidien des activités de construction, et le contrôle de la qualité pour s'assurer que les travaux respectent les normes environnementales et les objectifs du projet.

2.1.2. 2) Suivi de la qualité des sols par un bureau d'étude spécialisé

Il est fortement recommandé de faire appel à un bureau d'étude spécialisé pour le **suivi de la qualité des sols durant la phase chantier**. Différents éléments doivent être réalisés lors du suivi sur les chantiers :

- S'assurer que les matériaux excavés sont **stockés correctement** pour éviter une dégradation de leur qualité. Cela inclut la sélection d'une zone de stockage appropriée, l'utilisation de techniques de stockage spécialisées, et la protection des matériaux :
 - **Emplacement** : stocker les matériaux excavés sur une zone plane, stabilisée et éloignée des milieux sensibles (cours d'eau, zones humides, habitat écologique à préserver, etc.).

- **Protection** : utiliser des bâches pour couvrir les matériaux et prévenir leur dégradation par les intempéries, ou végétalisation temporaire
- **Isolation** : placer des géotextiles sous les matériaux pour éviter toute contamination des sols sous-jacents.
- **Organisation** : former des andains (tas allongés) pour optimiser le stockage, en séparant les matériaux pollués, non pollués et réutilisables, avec un étiquetage clair. Les andains sont généralement dimensionnés à une hauteur de 1,5 à 2 m, une largeur de 2 à 3 m et une longueur ajustée selon la quantité de matériaux, pour garantir stabilité, accès facile et gestion optimale.
- **Contrôle** : Limiter l'accès à la zone de stockage et effectuer des inspections régulières pour vérifier l'état des protections et éviter tout drainage, dispersion ou croissance d'**espèces végétales exotiques envahissantes (EVEE)**.
- **S'assurer de la mise en oeuvre des mesures de protection des sols** : Le bureau d'étude spécialisé effectue des inspections régulières pour s'assurer que les mesures de protection des sols sont respectées. Cela inclut la vérification de l'efficacité des clôtures de protection, des barrières anti-érosion et des zones de mise en défense. En cas de problème, des actions correctives doivent être prises rapidement pour minimiser l'impact sur les sols.



Attention au tassement des andains de sol lors du stockage

Un tassement excessif des andains, souvent recherché pour obtenir un rendu visuellement "propre", peut entraîner la création de conditions anoxiques (manque d'oxygène en profondeur). Cela favorise le développement de bactéries anaérobies spécifiques, au détriment de communautés microbiennes plus équilibrées. Ce déséquilibre peut ensuite perturber le fonctionnement biologique du sol une fois réutilisé sur site, notamment en ralentissant sa régénération ou en limitant la disponibilité des nutriments pour les plantes.

Il est donc essentiel de **sensibiliser les conducteurs d'engins et les entreprises de terrassement** à ces enjeux, en privilégiant des méthodes de stockage qui préservent la structure et l'aération des sols (andains moins hauts, non compactés, couvertures végétales temporaires...).



Pour aller plus loin :

- **Guides pour réduire les nuisances de chantier réalisés par la Métropole du Grand Lyon** : [De nouveaux outils à destination des professionnels du bâtiment pour réduire les nuisances et pollutions - Vers un territoire résilient](#)
- **Quels coûts pour les opérations de descellement ? Désimpermeabiliser les villes – Plante&Cité** ([Guide P C desimpermeabilisation V4.pdf](#))

II.2 Travaux de préparation

EN BREF

Qui ? #MOA #Pédologue #Entreprises de travaux #BE VRD

Quelle phase de projet ? #PRO-DCE #ACT#EXE#Réception

Objectif : Préparer le terrain pour les interventions principales en réalisant le descellement, l'excavation, le tri des matériaux et la gestion des déchets, tout en garantissant la réutilisation des ressources et en minimisant l'impact environnemental.

Cette phase regroupe l'ensemble des opérations nécessaires pour préparer le terrain avant les interventions principales. Elle mobilise principalement des entreprises de travaux publics et des entreprises spécialisées en voirie et réseaux divers (VRD). Elles sont spécialisées dans les activités telles que le descellement, l'excavation, le tri des matériaux, le transport et la gestion des déchets spécifiques, y compris les **espèces végétales exotiques envahissantes (EVEE)**.

II.2.1. Descellement

Un sol scellé est constitué de plusieurs couches, dont la couche de surface qui est recouverte d'un revêtement imperméable. Selon l'usage du sol, cette couche peut varier en épaisseur et en composition, en fonction des matériaux utilisés (enrobés hydrocarbonés, béton, sablés stabilisés, dalles/pavés, etc.). Ces revêtements limitent les échanges d'eau et d'air entre le sol et son environnement, rendant ainsi la gestion des eaux pluviales et de la biodiversité plus complexe.



Exemple de profil de sol
imperméabilisé © G. SERÉ
Laboratoire Sol et Environnement

Le descellement est une étape cruciale dans les travaux de renaturation, permettant de retirer les revêtements imperméables (asphalte, béton, pavés, etc.) afin de se rapprocher de la pleine terre. Le choix de la technique dépend de plusieurs facteurs :

- **Surface à traiter** (petite, moyenne, grande).
- **Épaisseur et nature du revêtement** (enrobé mince ou épais, béton, autres).
- **Objectifs spécifiques du projet** (réutilisation des matériaux, limitation des nuisances).
- **Contexte environnemental** (proximité des bâtiments, gestion des poussières et du bruit).

Figure 19 : SEQ Figure * ARABIC 18 : Profil de sol scellé ©G. Séré, LSE

Tableau 5 : Techniques de descellement ©ARP Astrance

Procédé	Description	Utilisation	Avantages	Inconvénients
 Pelle mécanique	Une pelle mécanique est équipée d'un godet pour arracher les revêtements rigides. C'est la méthode la plus courante pour le descellement grâce à sa rapidité et son coût relativement faible.	- Grandes surfaces. - Épaisseurs de revêtements variables, jusqu'à 20-30 cm.	- Efficace pour les projets rapides. - Faible coût.	- Nuisances sonores et vibrations. - Moins adapté pour les zones sensibles ou nécessitant une grande précision. - Peut endommager les matériaux récupérés, rendant leur réutilisation difficile.
 Descellement manuel	Ce procédé repose sur l'utilisation d'outils à main comme des burins, marteaux, ou levier, ou encore de petits outils électriques portables.	- Petites surfaces. - Réutilisation des matériaux retirés sans dommages. - Chantiers participatifs	- Très précis - Peu de dommages aux matériaux. - Faible impact environnemental (bruit, vibrations).	Limité aux petites surfaces, moins efficace pour des zones plus grandes
Raboteuse	La raboteuse est un engin équipé d'un tambour rotatif à dents pour découper ou raboter l'enrobé sur des épaisseurs réglables.	- Petites à moyennes surfaces. - Enrobés de faible épaisseur ou nécessitant un retrait par couches successives.	- Précision élevée grâce à un réglage précis de la profondeur de coupe. - Permet de récupérer des enrobés en morceaux relativement homogènes	- Coût modéré, plus élevé que la pelle mécanique pour des surfaces importantes. - Moins adaptée pour des couches épaisses (>20 cm).
 Fraiseuse	Une fraiseuse est une variante de raboteuse, plus compacte et agile pour des zones ciblées.	- Petites surfaces très ciblées. - Réparation localisée d'asphalte ou béton.	- Efficace pour les travaux de finition ou sur des zones limitées. - Contrôle précis de la profondeur et de l'uniformité.	- Rendement faible sur de grandes surfaces. - Nécessite un entretien rigoureux pour garantir sa précision.
 Marteau-piqueur ou BRH (brise-roche hydraulique)	Outil ou équipement monté sur une pelle mécanique, utilisé pour casser les revêtements très durs ou épais (ex. : béton armé).	Zones localisées avec des matériaux difficiles à enlever.	- Très efficace pour les revêtements épais ou renforcés. - Compatible avec les pelles mécaniques.	- Nuisances importantes (bruit, vibrations). - Lent et coûteux pour de grandes surfaces.

Tableau 6 : Comparatif des techniques ©ARP Astrance

	Temporalité	Coût	Impact environnemental	Réutilisation des matériaux
Manuel				
Pelle mécanique				
Marteau-piqueur / BRH				
Fraiseuse / Raboteuse				

L'annexe 3 propose une aide à la décision détaillée pour le choix de la technique. Cette annexe fournit des critères pour orienter votre sélection en fonction des caractéristiques du projet.

RAPPEL : "Si le revêtement de surface n'est pas pollué, il est possible de :

- Réemployer une partie ou la totalité du revêtement de sol en l'utilisant en sous-couche, en matériau de surface ;
 - Exporter le matériau de surface et conserver le sol en place, sous le revêtement ;
 - Exporter la totalité du revêtement des sols et des structures pour amener un nouveau sol."
- D'après le référentiel du projet DESSERT.



Pour aller plus loin :

- **Pour être accompagné sur les projets de descellement de sols urbains :** *Projet DESSERT* ([Guide P C desimpermeabilisation V4.pdf](#))
- **Pour choisir des revêtements adaptés au changement climatique :** ([GUIDE-REVETEMENT-ADAPTAVILLE VF WEB.pdf](#))

II.2.2 Excavation

L'excavation désigne l'ensemble des méthodes utilisées pour retirer les matériaux présents dans le sol afin de permettre la renaturation ou d'autres travaux d'aménagement. Le choix des techniques dépend :

- des propriétés des matériaux (sols, substrats, végétaux) ;
- des objectifs de réutilisation, de la nature du site ;
- des contraintes environnementales.



L'excavation peut également constituer une étape dans le traitement des pollutions. Dans ce cas les terres excavées seront soit triées et éliminées hors site, soit traitées sur site et utilisées pour le remblaiement.

Tableau 7 : Techniques d'excavation ©ARP Astrance

Procédé	Description	Utilisation	Avantages	Inconvénients
Pelle mécanique et chargeuse 	Engins standard du BTP, la pelle mécanique est équipée d'un godet qui creuse et retire les matériaux. La chargeuse transporte ces matériaux sur le site ou les déplace vers des camions pour leur évacuation.	- Excavation générale de sols meubles ou cohérents. - Terrains sans obstacles majeurs comme des racines ou des structures enterrées. - Travaux nécessitant un rendement élevé.	- Grande capacité de déplacement et d'excavation. - Coût relativement bas pour les gros volumes.	- Moins adapté pour des sols fragiles ou sensibles. - Impact élevé sur l'environnement immédiat (compactage des sols, nuisance sonore).
Aspiratrice à embout caoutchouc 	Engin d'aspiration permettant d'excaver des sols ou de dégager des racines d'arbres avec précision, sans les endommager. L'embout en caoutchouc prévient les abrasions sur les végétaux ou infrastructures fragiles. L'usage d'une aspiratrice consiste à aspirer des matériaux non liés qui doivent être préalablement décompactés.	- Zones sensibles, par exemple autour des arbres ou des infrastructures enterrées (canalisations, câbles). - Projets où préserver les racines ou d'autres éléments est essentiel.	- Excavation douce et précise, limitant les dommages. - Peu de perturbation du sol autour.	- Très coûteux, adapté uniquement à un usage ponctuel. - Rendement faible pour de grandes surfaces ou volumes.
Motor-scraper (arracheuse) 	Engin combinant un système de coupe et de transport des sols en une seule opération, permettant le retrait de la couche supérieure du sol (décapage).	- Idéal pour les grands chantiers de terrassement - Nivellement de grandes surfaces de terrains - Transport de matériaux sur de longues distances	- Permet de déplacer de grandes quantités de matériaux rapidement. - Réduit les déplacements et optimise l'efficacité.	- Moins efficace sur terrain accidenté. - Moins précis que d'autres méthodes d'excavation (comme la pelle mécanique)

Tableau 8 : Comparatif des techniques d'excavation ©ARP Astrance

	Temporalité	Coût	Impact environnemental	Réutilisation des matériaux
Pelle mécanique/chargeuse				
Aspiratrice à embout caoutchouc				
Motor-scraper				

Les techniques d'excavation doivent être sélectionnées en fonction des **besoins spécifiques** du site et des **contraintes budgétaires**. Par exemple, les pelles mécaniques sont idéales pour les travaux rapides sur de grandes surfaces peu végétalisées, tandis que l'aspiratrice est privilégiée pour des contextes sensibles car elle permet de préserver les racines d'arbres, de protéger les câbles fragiles et de travailler en sécurité à proximité d'infrastructures souterraines délicates (réseaux d'eau, de gaz, d'électricité), limitant ainsi les perturbations et évitant les dommages. L'intégration du tri et de la gestion des matériaux est essentielle pour garantir une approche durable et économique dans un projet de renaturation.



L'annexe 4 propose une aide à la décision pour le choix de la technique. Cette annexe fournit des critères pour orienter votre sélection en fonction des caractéristiques du projet.

L'extraction en couches, avec une épaisseur de 0,1 à 0,3 m, permet une bonne fragmentation et un tri naturel des matériaux, ce qui est bénéfique pour la qualité des remblais. Elle expose les sols aux agents atmosphériques, ce qui peut être avantageux dans certains cas, mais contre-indiqué dans d'autres. En revanche, **l'extraction frontale** permet de sélectionner les couches les plus portantes, idéales pour la circulation des engins, mais ne favorise pas le tri des matériaux. Pour un projet de renaturation visant à réutiliser les matériaux du site, l'extraction en couche est généralement plus appropriée.



Utilisation de la sous-soleuse pour le décompactage préalable des sols

Lors des travaux d'excavation, les sols fortement compactés peuvent rendre les opérations difficiles et inefficaces. L'utilisation d'une sous-soleuse peut être envisagée pour décompacter le sol en profondeur avant les travaux, facilitant ainsi l'excavation ultérieure. Cet outil spécialisé ameublisse les couches compactées sans perturber excessivement les horizons inférieurs. Il est recommandé d'effectuer cette opération lorsque le sol est sec afin d'assurer une efficacité optimale.



L'excavation des terres doit être réalisée en fonction des classes de matériaux prenant alors le statut des déchets. Ils sont généralement classés en trois catégories : déchets dangereux, déchets non dangereux et déchets inertes. Chaque catégorie nécessite une gestion spécifique et une évacuation différenciée :

- **Déchets dangereux** (contiennent des substances nocives) : Ces matériaux doivent être traités avec des procédures spécifiques, souvent nécessitant un traitement particulier avant leur évacuation dans des installations agréées.
- **Déchets non dangereux** (ne présentent pas de risques pour la santé ou l'environnement mais ne peuvent pas être laissés sur place, comme : bois, plastiques, certains bétons) : Ils peuvent être évacués vers des sites de traitement ou de stockage dédiés, mais sans les contraintes strictes des déchets polluants.
- **Déchets inertes** (matériaux qui ne subissent aucune décomposition ni réaction chimique significative) : Ceux-ci, comme les gravats ou les sols non contaminés, peuvent généralement être réutilisés sur site ou évacués vers des sites de décharge adaptés aux matériaux inertes.

Une gestion adéquate et différenciée de ces déchets est essentielle pour respecter les normes environnementales et optimiser la réutilisation des matériaux.



Pour aller plus loin :

- **Utiliser une excavatrice par aspiration** : Fiche n° AT-TED Excavatrice par aspiration utilisée en technique douce ([GUIDE TECHNIQUE](#)), [Protection-des-racines-terrassement.pdf](#)
- **Guide de terrassements** : [Guide des terrassements des remblais et des couches de forme : Fascicule n°1 - Principes généraux / Fascicule n° 2 - Annexes techniques - Édition 2024 - Cerema](#)

II.2.3 Tri et transport des matériaux

II.2.3. 1) Tri des matériaux

Le tri des matériaux excavés est une étape essentielle pour favoriser le réemploi. Il consiste à séparer les matériaux en fonction de leur potentiel de réutilisation : terres fertiles, enrobés, gravats, etc. Ce tri peut être réalisé manuellement ou à l'aide de dispositifs mécanisés. Un tri précis permet de réduire les coûts d'élimination des déchets et d'optimiser l'utilisation des ressources.

- **Infrastructures nécessaires :**
 - Plateformes de tri avec convoyeurs et broyeurs.
 - Espaces de stockage temporaire adaptés (bennes, silos, entrepôts couverts).
 - Zones de traitement pour les déchets non valorisables.

Il est crucial d'anticiper ces besoins dès la phase de conception pour assurer une gestion optimale des matériaux, y compris en cas de contraintes d'espace.



Figure 20 : Différentes méthodes de tri selon les ambitions de revalorisation ©ARP Astrance

II.2.3. 2) Transport des matériaux

Le transport des matériaux excavés doit être réalisé de manière efficace et durable, en fonction des types de matériaux, de la localisation des sites de réemploi, et de la configuration du chantier.

- **Modes de transport possibles :**
 - Camions
 - Transport ferroviaire
 - Transport fluvial
 - Transports internes (grues, bennes sur rail, convoyeurs)

Pour limiter l'impact environnemental des transports, plusieurs critères doivent être pris en compte :

- **Réduction des distances parcourues :** Prioriser les filières locales pour réduire l'empreinte carbone.

- **Optimisation des charges** : Maximiser les chargements pour limiter le nombre de trajets.
- **Combinaison de modes de transport** : Utiliser plusieurs modes de transport pour optimiser l'efficacité.
- **Utilisation de véhicules à faibles émissions** : Privilégier les camions électriques ou alimentés au gaz naturel dans les zones sensibles.

La gestion des flux de transport nécessite également un suivi constant des émissions de gaz à effet de serre et une planification logistique claire pour éviter les embouteillages et réduire les perturbations autour du chantier.



Pour aller plus loin

- *Guides pour réduire les nuisances de chantier réalisés par la Métropole du Grand Lyon : [De nouveaux outils à destination des professionnels du bâtiment pour réduire les nuisances et pollutions - Vers un territoire résilient](#)*

II.2.4. Gestion des espèces végétales exotiques envahissantes (EVEE) et des terres contaminées

La présence d'**espèces végétales exotiques envahissantes (EVEE)** sur le site représente un point de vigilance majeur. Ces plantes, comme la Renouée du Japon, peuvent nuire à la biodiversité locale et compromettre la réussite des travaux de renaturation. La liste des espèces exotiques envahissantes est établie à l'échelle européenne et nationale (en application du règlement européen (n° 1143/2014) et de la réglementation nationale de 2018 (code de l'environnement L411-5 et suivants, décrets et arrêtés associés), ainsi qu'à l'échelle régionale (généralement établie par les Conservatoires Botaniques Nationaux – CBN).

II.2.4. 1) Gestion des espèces végétales exotiques envahissantes (EVEE)

La gestion implique des techniques spécifiques de retrait et d'élimination, dépendant de **l'espèce considérée**, de son **stade de développement** et de la **période d'intervention**. Il convient de se référer aux guides existants concernant leur gestion pour adapter le protocole d'intervention à chaque cas d'étude.

Plus généralement, la gestion des EVEE implique une grande vigilance :

- Nettoyer les engins et outils ayant servis à l'arrachage ou la fauche d'EVEE ;
- Certaines espèces ont une capacité à recoloniser un espace à partir de tout petits fragments, l'élimination doit se faire conformément aux protocoles recommandés et de façon rigoureuse pour retirer tous les fragments ;
- Les végétaux envahissants doivent être transportés avec attention en étant recouverts pour éviter les pertes de fragments pouvant les disséminer ;
- Les déchets verts d'espèces végétales exotiques envahissantes doivent être traités de façon adaptée : compostage industriel ou méthanisation de préférence. Le compostage domestique

est interdit car ne permet pas une élimination efficace des fragments (température trop basse).

11.2.4. 2) Gestion des terres contaminées par des espèces exotiques envahissantes

Si des espèces exotiques envahissantes sont observées sur un site ou ses abords, les terres sont susceptibles d'être contaminées. On considère comme saines les terres au-delà de 3m de profondeur.

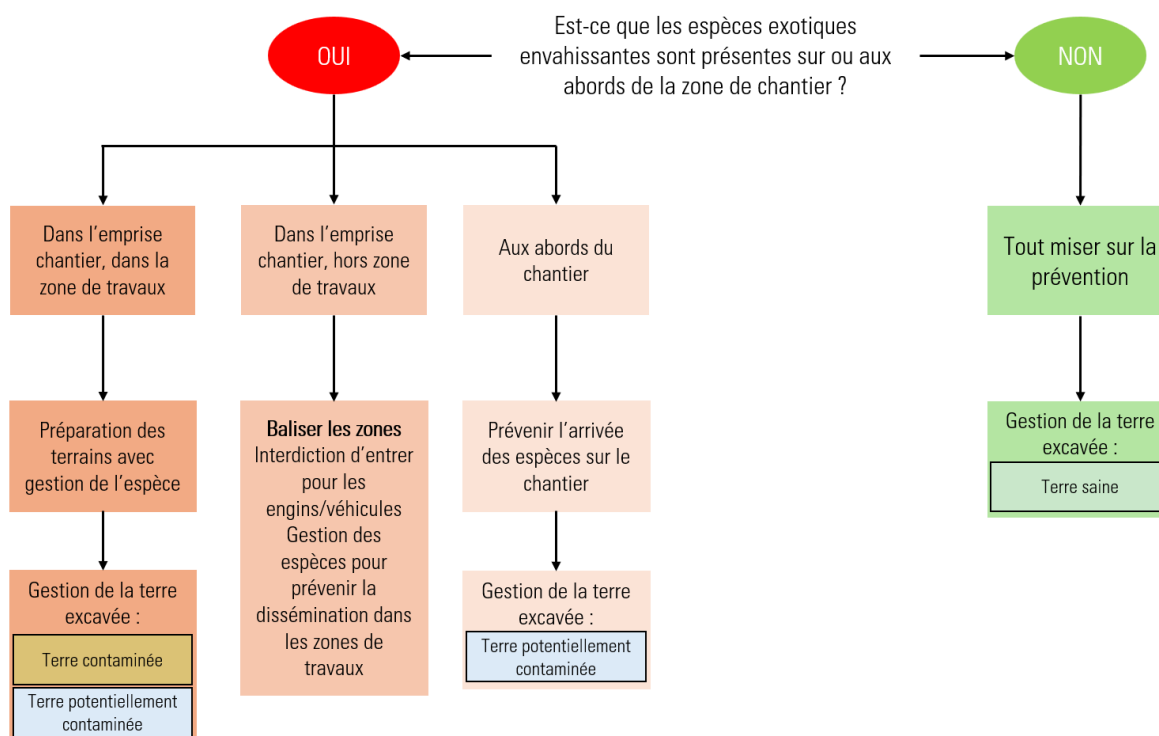


Figure 21: Gestion des terres contaminées aux espèces exotiques envahissantes dans la zone chantier ©ARP Astrance d'après le Guide d'identification et de gestion des Espèces Végétales Exotiques Envahissantes sur les chantiers de Travaux Publics ©MNHN, FNTP, ENGIE

Comment gérer une terre excavée selon sa contamination ?

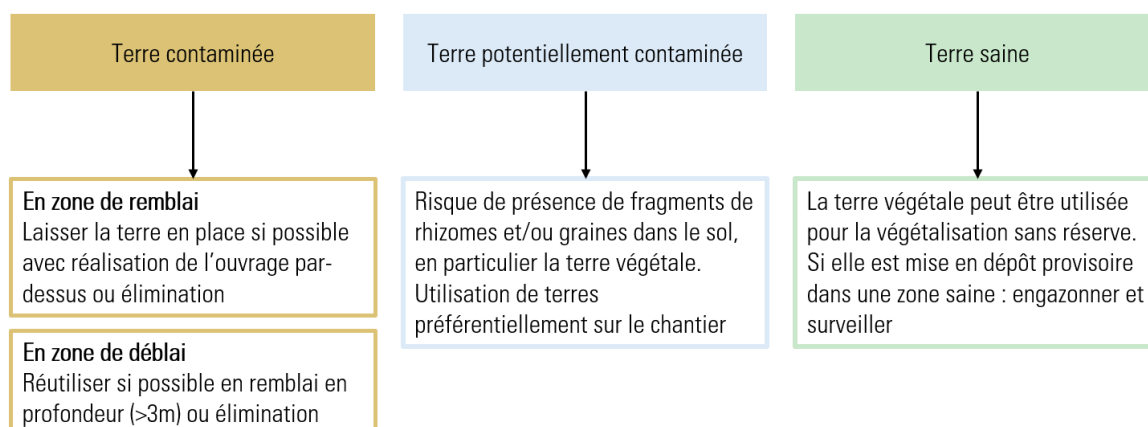


Figure 22 : Gestion des terres excavées selon leur contamination aux espèces exotiques envahissantes ©ARP Astrance



Pour aller plus loin :

- **Recommandations pour gérer des terres contaminées aux EEE :** [Terres infestées par les espèces exotiques envahissantes : recommandations pour les chantiers routiers | Cerema](#)
- **Guide d'identification et de gestion :** [Guide d'identification et de gestion des Espèces Végétales Exotiques Envahissantes sur les chantiers de Travaux Publics](#) - FNTF
- **La liste des espèces exotiques envahissantes réglementées répertoriées par l'Office Français pour la Biodiversité :** [Les espèces exotiques envahissantes](#) – OFB
- **Les listes régionales, exemple du Conservatoire Botanique du Bassin parisien :** [Les listes de plantes exotiques envahissantes](#) – CBNBP
- **Le centre de ressource des espèces exotiques envahissantes :** [Centre de ressource des EEE](#) – OFB, UICN

II.3 Remise en état des sols

Cette phase consiste à restaurer et améliorer les sols pour assurer leur qualité et leur fonctionnalité. Elle fait appel à des experts en ingénierie environnementale, géotechniciens et pédologues. Ces acteurs interviennent pour évaluer la pollution, concevoir des solutions de dépollution (si nécessaire) et améliorer les sols existants, ainsi que pour créer des technosols adaptés.

II.3.1 Gestion des pollutions

EN BREF

Qui ? #MOA #MOE #Bureau d'études sites et sols pollués

Quelle phase de projet ? #Réalisation

Objectif : Gérer efficacement les pollutions sur le site.

L'approche actuelle de la gestion des sites pollués repose sur une évaluation des risques sanitaires et environnementaux en fonction de l'usage des sites. Elle met l'accent sur la compatibilité de l'état des milieux avec les usages constatés et futurs, avec la nécessité de rétablir cette compatibilité afin de maîtriser les risques sanitaires et environnementaux (après réhabilitation des sites).

La politique nationale de gestion des sites et sols pollués est une politique de gestion des risques suivant l'usage des milieux (soit eau, air, sol, faune, flore). Elle engage à définir les modalités de suppression des pollutions au cas par cas, compte tenu des techniques disponibles et de leurs coûts économiques. Le maintien de pollution résiduelle sur un site est lié à sa compatibilité des milieux avec l'usage retenu (industriel, résidentiel, renaturation etc.) et, si nécessaire, assorti de conditions de maîtrise de leur impact sanitaire ou environnemental. La méthodologie nationale de gestion des SSP concerne tous les sites présentant potentiellement des problématiques de pollution de leurs sols et/ou de leurs eaux souterraines, ces sites relevant ou non de la réglementation des ICPE (Introduction à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, MEEM 2017a et b).

Un ensemble d'actions permettent de réduire les pollutions présentes dans les milieux (sol, eau, air, écosystème). Certaines opérations de traitement peuvent être mises en œuvre *in situ* (directement dans le milieu pollué) ou sur site (traitement sur place mais avec excavation et traitement sur site des matériaux pollués). En fonction du contexte de l'opération de dépollution (type de polluant, transfert possible vers la nappe, les végétaux ou l'air via les poussières, objectifs, surface disponible, calendrier, etc.), les matériaux pollués peuvent aussi être excavés et évacués en centre collectif de traitement.

Le choix des techniques de traitement se fait après caractérisation complète des milieux et de la pollution. Il s'appuie aussi sur un bilan "coûts - avantages" qui précise les meilleures techniques à envisager.

Plusieurs types de traitements existent :

- **Les traitements physiques** : par voie thermique, mécanique ou électrique, il est possible d'immobiliser, extraire ou dégrader les polluants (volatilisation, pompage, désorption thermique, stabilisation, venting, etc.).

- **Les traitements chimiques** : des réactifs chimiques détruisent ou transforment les polluants en des composés moins toxiques, moins mobiles et/ou plus facilement biodégradables.

- **Les traitements biologiques** : des microorganismes dégradent des substances chimiques, les immobilisent et les rendent moins toxiques. Les racines des végétaux complètent l'action des microorganismes et absorbant des polluants (ex : phyto/rhizodegradation).

Les traitements sont appliqués sur les zones de pollution concentrée identifiées dans le cadre du diagnostic. Après la mise en œuvre des solutions techniques de dépollution, certaines pollutions non concentrées sont parfois laissées en place. La gestion de ces pollutions repose principalement sur l'analyse des risques sanitaires devant conduire à une vérification de la compatibilité de l'état des sols avec les usages prévus. Cela peut se traduire par la mise en place de mesures spécifiques telles que le recouvrement des sols par de la terre saine (sur une épaisseur de 30 voire 50cm) ou la mise en place d'une restriction partielle ou totale de la fréquentation humaine au travers de servitude d'utilité publique ou un secteur d'information sur les sols (SIS).

Au même titre qu'une acceptabilité sanitaire des expositions aux pollutions résiduelles vérifiée par une analyse des risques résiduels dénommée « ARR fin de travaux », une démarche basée sur l'analyse des risques pour les écosystèmes pourrait être envisagée afin de vérifier la compatibilité environnementale de cette pollution résiduelle¹⁶. Dans le cadre de la mise en œuvre de travaux sur des sites pollués sur lesquels tout ou partie du terrain est destiné à un usage de renaturation, l'application de la démarche Triade permettra alors de sécuriser le risque environnemental en s'assurant que les polluants présents sur le site n'engendrent pas d'effet inacceptable sur les écosystèmes terrestres.

Définitions ¹⁷:

- **Pollution concentrée** : Pollution chimique délimitée spatialement, présentant des concentrations d'un ou plusieurs polluants, significativement supérieures à celles avoisinantes.
- **Pollution diffuse** : Pollution chimique présentant des concentrations d'un ou plusieurs polluants relativement uniformes sur de vastes volumes ou surfaces d'un ou plusieurs milieux.
- **Pollution résiduelle** : Présence dans un milieu d'un ou plusieurs polluants laissés en place sur un site après la mise en œuvre des **mesures de gestion** (actions, traitement ou travaux de réhabilitation), compatible avec les **usages des milieux** associés à la réhabilitation.

Note 1 : ces actions (par exemple, des mesures constructives, la mise en place de restrictions d'usage...), traitements et travaux de réhabilitation ont réduit les risques associés à la présence de la pollution et/ou il n'est pas possible actuellement, techniquement et/ou économiquement (en raison de coûts disproportionnés par rapport aux enjeux), d'éliminer les polluants restants.

Note 2 : la réduction des risques, induite par ces mesures de gestion, permet d'éviter les effets néfastes pour la santé, les milieux et les biens matériels pour les usages ayant permis de dimensionner ces

¹⁶ Voir : [ADEME, Démarche Triade : guide technique d'application \(2025\)](#)

¹⁷ Source : BRGM, Glossaire, (2025)

mesures et rend ces risques acceptables. Cependant, la présence résiduelle de ce ou ces polluant(s) pourrait être incompatible avec d'autres usages des milieux qui s'avéreraient plus exigeants.

Note 3 : en cas de pollution résiduelle qui pourrait être incompatible avec d'autres usages, il est nécessaire de conserver la mémoire de cette pollution, par exemple via une servitude d'utilité publique ou un secteur d'information sur les sols (SIS).



Points de Vigilance :

- Les chantiers doivent inclure des mesures de sécurité pour gérer des contaminants spécifiques comme l'amiante dans les enrobés, avec des filières adaptées pour leur évacuation.
- Le maître d'ouvrage doit réaliser un **diagnostic de la présence d'amiante dans les enrobés** avant toute intervention. En cas de contamination, leur évacuation doit suivre une filière réglementée afin de garantir la sécurité des travailleurs et la protection de l'environnement.
- Un **plan de gestion des eaux** doit répondre aux directives locales et européennes, notamment celles de la Directive Cadre sur l'Eau, afin de protéger les ressources aquatiques proches des sites.
- Un **plan de gestion de la pollution des sols** doit être élaboré à la suite des diagnostics réalisés en phase préparatoire. Ce plan de gestion définit les mesures à prendre permettant d'assurer une compatibilité entre l'état des sols et l'usage de renaturation. Certaines pollutions peuvent encore être présentes sur site après travaux de dépollution. Avant de mettre en œuvre les travaux, il est essentiel de vérifier l'absence d'impact lié à cette pollution résiduelle sur les eaux souterraines et de s'assurer de la compatibilité sanitaire avec l'usage futur du site. Cette démarche permet de limiter les volumes de déchets tout en garantissant la protection des milieux et des usagers.



Pour aller plus loin :

- *Guide Diagnostic des sites et sols pollués – BRGM ([Rapport en Français](#))*
- *Techniques de dépollution ([Techniques de dépollution](#) | [SelecDEPOL](#))*
- *DESTISOL : méthodologie d'aide à la décision pour la gestion intégrée des sites pollués ([DESTISOL : LES SOLS, UNE OPPORTUNITE POUR UN AMENAGEMENT URBAIN DURABLE](#))*
- *[Méthodes et outils de gestion](#) | [SSP-InfoTerre](#)*

II.3.2. Stockage et réemploi des terres excavées

EN BREF

Qui ? #MOA #MOE #Entreprises de travaux

Quelle phase de projet ? #PRO-DCE #ACT#EXE#Réception

Objectif : Valoriser les matériaux déjà présents sur le site pour la refunctionalisation des sols.

Le stockage et la revalorisation des terres excavées sont des étapes clés dans la gestion durable des sols lors de projets de renaturation. Ces opérations visent à réduire la quantité de déchets acheminés vers des sites d'enfouissement et à favoriser le réemploi des terres en adéquation avec leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques.

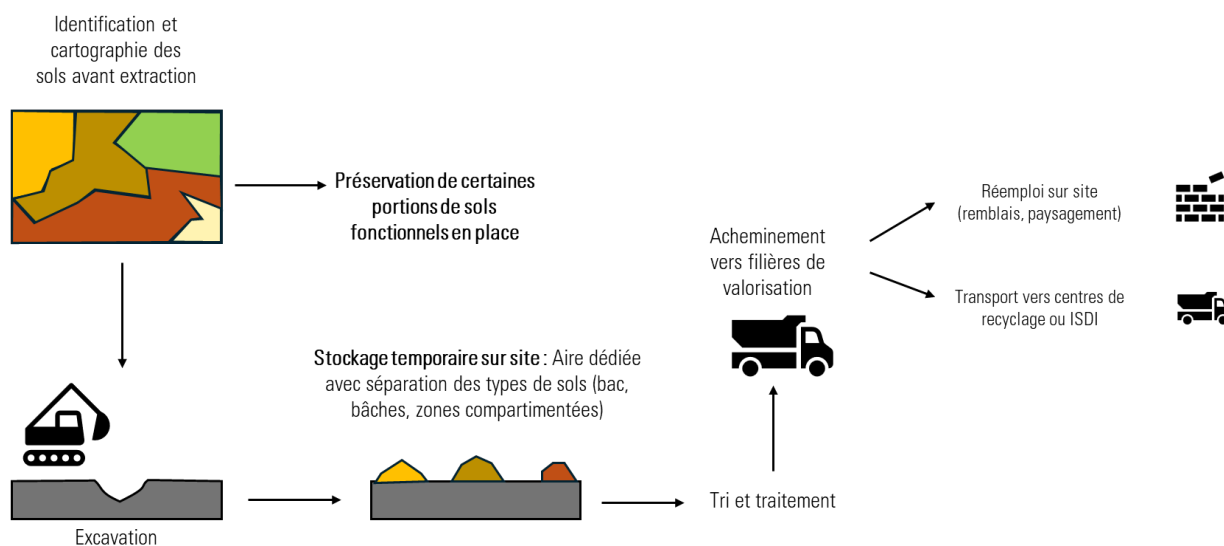


Figure 23 : Schéma de la méthode de valorisation des terres excavées ©ARP Astrance

11.3.2. 1) Caractérisation et planification des terres

Avant toute valorisation et décision de stockage ou de réemploi, une caractérisation détaillée des terres est nécessaire pour évaluer leur qualité et potentiel de réemploi.

Caractéristiques à analyser :

- La qualité et la composition des terres excavées.
- La présence éventuelle de contaminants.
- La compatibilité avec un usage futur.

L'élaboration d'un Plan de Gestion des Déblais et Terres Excavées (PGDTE) permet d'organiser :

- Le tri des terres selon leur qualité (propres, légèrement polluées, fortement polluées).
- Les possibilités de réemploi sur place pour limiter le transport et préserver la trame brune.
- Les alternatives de valorisation (filieres industrielles, agricoles, travaux publics).

11.3.2. 2) Stockage temporaire des terres

Le stockage temporaire des terres excavées doit respecter des règles strictes pour prévenir la dispersion de polluants et garantir une gestion optimale. Il est essentiel de séparer les terres propres, valorisables et polluées dès l'excavation pour **éviter les contaminations croisées** et garantir une traçabilité précise.

Les terres excavées sont souvent stockées temporairement sur le site ou dans des plateformes spécialisées en attendant leur réutilisation ou traitement. Ce stockage doit respecter les précautions suivantes :

- **Protection des matériaux** : Utilisation de toiles géotextiles ou de végétalisation temporaire pour protéger contre l'érosion et les infiltrations d'eau. Il est fortement déconseillé de stocker les terres végétales à nu pour éviter les risques de contaminations aux EVEC notamment. Il est possible de semer des engrais verts pour protéger et enrichir leur qualité agronomique (dans le cas où cet enrichissement est compatible avec la fonctionnalité cible du sol)
- **Ne pas dépasser une certaine hauteur de merlon** (levée de terre ou d'enrochement) pour éviter l'asphyxie (voir figure 26)
- **Minimiser la durée de stockage** (voir figure 26)
- **Séparation des flux** : Classification des terres selon leur nature pour faciliter leur gestion ultérieure.

Tableau 11. Hauteur de l'andain et durée maximale de stockage pour des terres ressources issues de couches de surface et dont le taux de matière organique est supérieur à 1 %				Tableau 12. Hauteur de l'andain et durée maximale de stockage pour des terres ressources issues de couches sous-jacentes et dont le taux de matière organique est inférieur à 1 %			
Humidité de la terre par rapport à la limite de plasticité	Texture dominante de la terre	Hauteur de l'andain recommandée	Durée maximale de stockage	Humidité de la terre par rapport à la limite de plasticité	Texture dominante de la terre	Hauteur de l'andain recommandée	Durée maximale de stockage
H° < LP	sableuse	< 6 m	< 2 ans	H° < LP	sableuse	< 6 m	sans objet
	non sableuse	< 4 m	< 2 ans		non sableuse	< 4 m	sans objet
H° > LP	sableuse	< 4 m	< 1 an	H° > LP	sableuse	< 4 m	sans objet
	non sableuse	< 2 m	< 6 mois		non sableuse	< 2 m	< 6 mois

Figure 24 : Pratiques de stockage des terres extraites des règles professionnelles de l'UNEP (N°: P.C.1-R0, Décembre 2022)

11.3.2. 3) Réemploi et valorisation

Le réemploi des terres fertiles excavées peut se faire directement sur site ou être transféré vers d'autres projets, avec pour objectif principal de limiter le transport et les impacts environnementaux :

- **Réutilisation locale** : Les terres peuvent être employées en remblais, en substrats pour les espaces verts ou encore en amélioration des sols selon l'usage (voir partie 2.3.3).
- **Intégration dans les filières de construction** : Certaines terres peuvent être valorisées dans la fabrication de matériaux comme le béton ou les enrobés, ou l'argile de manière plus spécifique en Ipisé ou briques de terres crues.
- **Collaboration avec les acteurs locaux** : Agriculteurs, collectivités et plateformes spécialisées (ex. [Terres Fertiles](#) ou [Terre Utile](#)) peuvent faciliter la réutilisation des terres pour d'autres usages.

Lorsque les terres à fertilité dégradée ou matériaux excavés non terreux nécessitent un traitement avant réemploi, plusieurs solutions existent, à adapter en fonction du matériau considéré et de sa destination :

- **Recyclage in situ** : Après amendement ou traitement léger, les terres peuvent être réintégrées directement dans le projet, limitant ainsi les coûts et les déplacements (voir 2.3.3)
- **Recyclage ex situ** : Les terres excédentaires peuvent être traitées et réutilisées via des plateformes spécialisées.
- **Gestion des terres polluées** : Les sols contaminés doivent subir un traitement adapté avant leur réemploi ou évacuation, en conformité avec la réglementation.
- **Contrôle des matériaux** : Un criblage peut être nécessaire avant stockage pour identifier d'éventuelles contaminations aux éléments indésirables (ex. espèces végétales exotiques envahissantes), néanmoins celui-ci a un impact notable sur les organismes du sol et doit donc être réalisé uniquement si nécessaire.



Points de vigilance :

Tous les travaux de gestion des terres doivent respecter le **cadre réglementaire en vigueur**, notamment en ce qui concerne la traçabilité des matériaux, leur conformité aux normes environnementales et le choix des filières de valorisation ou d'élimination (à intégrer dans le PGTDE).

Si le projet d'aménagement est soumis à une étude d'impact, les modalités d'utilisation des terres excavées sont définies à travers les **préconisations issues de l'étude d'impact**. La maîtrise des impacts liés à la valorisation de terres excavées sur les milieux du site receveur est proportionnelle aux enjeux à préserver.



En adoptant une approche réfléchie et intégrée pour le stockage et la revalorisation des terres, les projets de renaturation peuvent significativement limiter leur **empreinte environnementale** tout en **optimisant les ressources disponibles**.

Les matériaux minéraux et inertes évacués sont soumis à la réglementation des déchets. Avant leur élimination, une évaluation de leur contamination est nécessaire. Si les matériaux sont pollués, ils doivent être traités conformément aux normes en vigueur.

Tableau 9 : Exemple de matériaux pouvant être valorisés ©Cerema, 2024

Type de matériaux anthropiques	Description
Fraisat d'enrobé	Matériau issu du rabotage des couches de revêtement bitumineux des routes, contenant des granulats et du bitume
Béton concassé	Matériau obtenu par le concassage de structures en béton démolies
Produit de déconstruction concassé (hors béton)	Matériaux divers issus de la démolition de bâtiments, à l'exclusion du béton.
Matériaux traités et non traités	Matériaux issus de divers processus industriels, pouvant être traités (stabilisés) ou non.
Ballast recyclé	Granulats issus du recyclage de ballast ferroviaire.
Mâchefers d'incinération de déchets non dangereux - MIDND	Résidus solides issus de l'incinération des déchets non dangereux.
Cendres volants (CVCT) silico-alumineuses de charbon	Résidus fins issus de la combustion du charbon dans les centrales thermiques.
Laitiers	Sous-produits de la fusion des minerais métalliques dans les hauts fourneaux.
Sous-produits de fonderie (sable de fonderie, laitier de fonderie en four cupola)	Résidus de la fabrication de pièces métalliques en fonderie.
Schistes houillés calcinés	Résidus de l'exploitation minière du charbon, chauffés à haute température.
Briques	Matériaux de construction en terre cuite, souvent issus de la démolition de bâtiments.



Pour aller plus loin :

- *Guide de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement - Ministère de l'Environnement ([MEEM rapport Préventions Risques avec visuel](#))*
- *Guide de valorisation hors site des terres excavées non issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement – Ministère de l'Environnement ([Guide Valorisation TEX Non SSP](#))*
- *Outil de traçabilité des terres TERRASS : permet d'émettre des offres et des demandes de terres valorisables géolocalisées et renseignées, au sein d'un système d'échanges qui*

constitue une bourse aux terres valorisables. L'outil génère ensuite les BSTV afin de banqueriser, de pérenniser les informations, et de produire des indicateurs de suivi ([L'application TERRASS / TexInfoTerre](#))

- **Guide Cerema** : [Valorisation de matériaux alternatifs en infrastructures linéaires de transport terrestres : étude environnementale et sanitaire](#)
- **Les règles professionnelles de l'UNEP** : [Travaux des sols, supports de paysage Caractérisation, amélioration, valorisation et reconstitution N°: P.C.1-R0](#)

II.3.3 Amélioration et création de sol

EN BREF

Qui ? #MOA #MOE #Paysagiste #Pédologue

Quelle phase de projet ? #PRO-DCE#ACT#EXE#Réception

Objectif : Mettre en place des sols fonctionnels et adaptés aux usages.

L'amélioration et la création de sols sont essentielles pour restaurer ou concevoir des terrains adaptés aux usages prévus. Cette démarche doit tenir compte des contraintes locales (disponibilité des matériaux, gestion des eaux, interactions avec les infrastructures existantes).

Une approche méthodique combinant expertise pédologique, analyse des sols existants et définition d'un itinéraire technique est indispensable. Cela implique d'écouter le pédologue, d'étudier les coupes de sol du site et de définir des modèles adaptés pour garantir des sols fonctionnels, résilients et appropriés aux objectifs du projet.

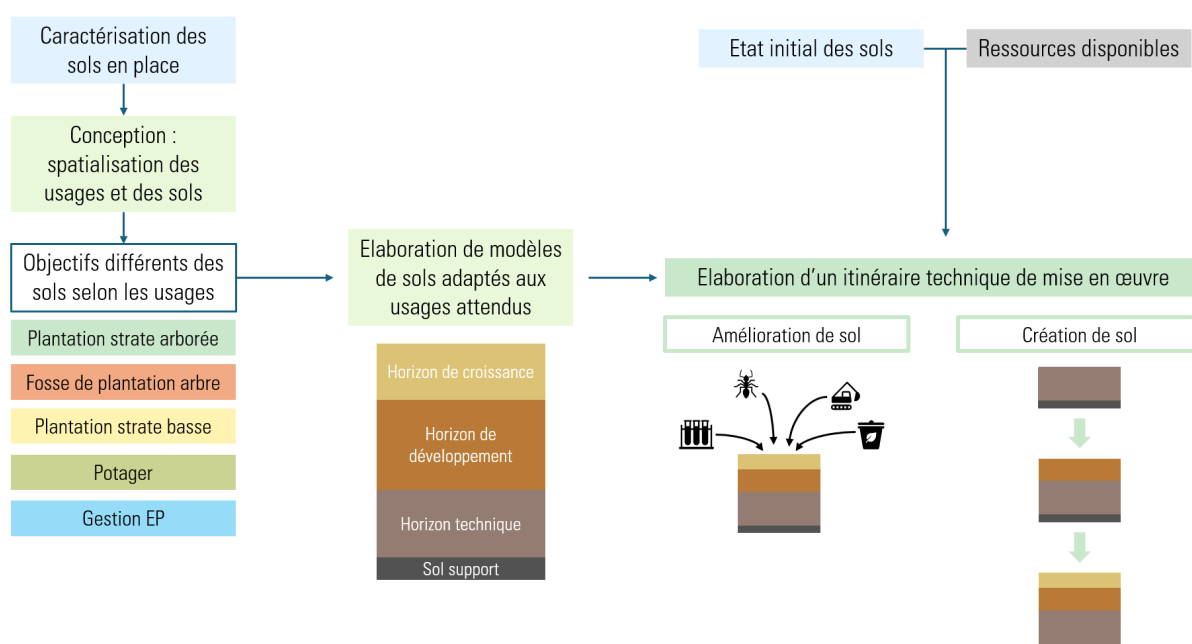


Figure 25 : Méthode de remise en état des sols ©ARP Astrance

Pour définir l'itinéraire technique et créer des sols fonctionnels, plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

État initial : évaluer les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol pour optimiser les efforts et adapter le projet aux caractéristiques du terrain.

Objectifs du projet : déterminer l'usage final et les exigences fonctionnelles des sols, puis élaborer un modèle ou profil de sol idéal.

Ressources disponibles : considérer les matériaux accessibles sur site ou à proximité pour garantir une mise en œuvre efficace.

La mise en place de sols multifonctionnels repose sur différentes approches selon l'état initial du sol et les objectifs visés. Deux stratégies principales peuvent être mises en œuvre :

- **Amélioration des sols existants**, lorsque le sol est encore fonctionnel mais nécessite des interventions ciblées.
- **Création de nouveaux sols**, si le sol est trop dégradé, contaminé ou pollué.

Ces méthodes permettent de s'inscrire dans une démarche d'économie circulaire tout en répondant aux enjeux écologiques et fonctionnels du site. Le choix entre amélioration et création dépendra du degré de dégradation, des niveaux de pollution et des objectifs écologiques ou d'aménagement.

11.3.3. 1) Amélioration de sols existants

Si le sol est relativement sain ou modérément dégradé, l'objectif sera de restaurer ses fonctionnalités en intervenant directement sur sa structure et sa biologie. Les techniques d'amélioration des sols peuvent être physiques, chimiques ou biologiques, et elles peuvent être utilisées seules ou combinées selon les besoins spécifiques.

- **Amélioration physique**

L'amélioration physique du sol vise à optimiser sa structure et ses propriétés pour favoriser une meilleure croissance des plantes et une gestion efficace de l'eau. L'amélioration physique des sols a également un impact sur la biodiversité.

- Décompaction et aération : Permet de restaurer la porosité du sol, facilitant les échanges hydriques et gazeux, essentiels à la vie du sol. Réalisation d'un sous-solage, travail du sol mécanique (fourche, grelinette, décompacteurs, outils de pseudo-labour) ou biologique (racines profondes, lombrics) peuvent être réalisés. Les travaux de décompaction dépendent de la surface du site, de l'intensité et de la profondeur du tassement.



Décompaction mécanique ou biologique ?

Par action mécanique, on peut atteindre 20-35 cm de profondeur, tandis que les méthodes biologiques prennent plus de temps : 1-2 ans pour recréer la porosité dans les 20 premiers cm, plus de 10 ans pour atteindre 30-50 cm de profondeur (Deboeuf De Los Rios et al. 2022).



Point de vigilance : Problématique technique de la décompaction

Il est crucial de **protéger les infrastructures existantes souterraines** (câbles, canalisations) et d'éviter une dégradation supplémentaire des sols humides. Les sous-soleuses et griffes permettent de réduire la compaction tout en respectant les réseaux souterrains.

- Modification de la texture : apport de sable, de limons ou d'argiles pour ajuster la granulométrie.
- Structuration : mise en place de couches drainantes, création de micro-reliefs pour la gestion de l'eau.

● **Amélioration chimique**

L'amélioration chimique vise à améliorer les propriétés du sol ou apporter des nutriments adaptés aux besoins des plantes en stimulant les dynamiques naturelles et en améliorant les conditions abiotiques (aération, apport de matière organique).

- Amendements minéraux : chaux pour corriger l'acidité, gypse pour améliorer la structure des sols sodiques (réduction de la salinité).
- Fertilisation raisonnée et amendement des sols : engrais organiques ou apports de matière organique (compost, fumier, bois raméal fragmenté (BRF), couverts végétaux).



Les engrais chimiques présentent plusieurs inconvénients majeurs. Leur utilisation entraîne une perte significative lors de l'épandage en raison de leur volatilité, et le ruissellement peut polluer les cours d'eau environnants. De plus, les minéraux utilisés dans les engrais chimiques ne sont pas toujours renouvelables et leurs méthodes d'extraction ont des impacts environnementaux négatifs. Les pratiques de fixation de l'azote minéral par le procédé Haber-Bosch ont également un impact carbone considérable.

● **Amélioration biologique**

L'amélioration biologique désigne l'utilisation de micro-organismes ou d'organismes du sol pour stimuler l'activité biologique. Il s'agit d'introduire des microorganismes spécifiques (issus de laboratoires ou du site) pour accélérer la recolonisation et la restauration des fonctions du sol.

- Stimulation de l'activité microbienne : Inoculation de micro-organismes bénéfiques (bactéries, champignons, etc.) pour améliorer la structure du sol, favoriser la dégradation des matières organiques et augmenter la disponibilité des nutriments.
- Mycorhization : Introduction de champignons mycorhiziens pour établir des relations symbiotiques avec les racines des plantes, ce qui améliore leur absorption d'eau et de nutriments, et renforce la résistance des plantes aux stress environnementaux.
- Vers de terre : améliorent la structure du sol en créant des galeries qui facilitent l'infiltration de l'eau (macroporosité), et en produisant des turricules riches en matière organique qui favorisent la rétention d'eau (microporosité) et enrichissent la fertilité du sol



- Les espèces « ingénieures des écosystèmes » telles que les vers de terre et les fourmis peuvent recréer la structure du sol ou relancer son activité biologique grâce à leurs capacités de bioturbation.

La sélection de ces espèces doit se baser sur une analyse préalable de l'état des sols afin de s'assurer que l'espèce introduite puisse se maintenir dans l'environnement dégradé, qu'elle soit adaptée à cet environnement, et qu'elle ne déséquilibre pas l'écosystème (par exemple, EVEC à proscrire).

D'après le guide Renaturer les Villes de l'ARB

- L'introduction de microorganismes nécessite de recréer au préalable les conditions requises pour leur développement (habitat et nourriture), condition sans laquelle ils ne pourront pas coloniser le site. Si l'amélioration des fonctions du sol a permis de recréer un habitat capable d'accueillir les micro-organismes, ces derniers reviendront d'eux-mêmes.
- Si les organismes qui jouent un rôle amont dans la décomposition de la matière organique (cloportes, vers de terre ...) ne sont pas présents, la matière organique ne sera pas accessible aux microorganismes, rendant inutiles leur introduction sur le site. Il est donc nécessaire de s'assurer de la présence de ces organismes.

FOCUS

LA FERTILITE BIOLOGIQUE

Pour une renaturation réussie, la fertilité biologique du sol est cruciale. Elle repose sur l'interaction entre bactéries, champignons et faune du sol, qui régulent les cycles biogéochimiques, décomposent la matière organique et structurent le sol. Les organismes ingénieurs, comme les vers de terre, jouent un rôle clé dans cette dynamique. En activant ces groupes biologiques, on dynamise le système, améliorant ainsi la fertilité et la production primaire du sol, éléments essentiels pour un développement durable de la végétation.



Figure 26 : Les organismes du sol et leurs rôles

L'association des techniques et stratégies combinées permet d'optimiser l'amélioration des sols en fonction des besoins spécifiques. Voici quelques exemples de combinaisons adaptées selon les contextes :

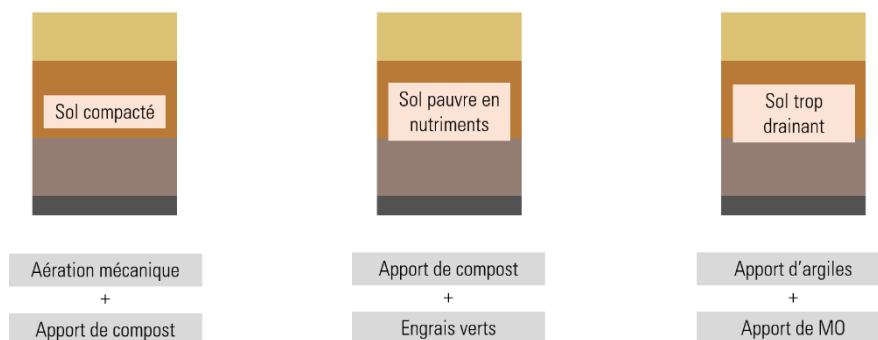


Figure 27 : Exemples d'amélioration de sol ©ARP Astrance

La planification et le suivi des interventions sont essentiels pour garantir une amélioration durable des sols.



Ces méthodes d'amélioration s'appliquent directement sur le sol en place ou en utilisant des matériaux excavés du site ou d'autres sites/plateformes spécialisés (2.3.2).

La préparation des matériaux excavés constitue une première étape clé. Cela peut être réalisé :

- In situ : les techniques comme le concassage permettent de réduire l'impact environnemental lié au transport et de réutiliser directement des matériaux (terre végétale, gravats, sédiments).
- En plateformes spécialisées : Des filières de valorisation de site à site, des plateformes de transit et de regroupement, des centres de traitement et des filières agréées de gestion des terres offrent des solutions pour le traitement et la valorisation des matériaux.

11.3.3. 2) La création d'anthroposol : une solution pour les sols fortement dégradés

Si le sol est trop dégradé ou contaminé pour être refunctionalisé efficacement, il peut être nécessaire de construire un nouveau sol fonctionnel.

Ces sols artificiels sont élaborés à partir de matériaux recyclés (gravats, composts, sédiments) et conçus pour remplir des fonctions spécifiques (infiltration d'eau, support de végétation, etc.). Cette création de sols peut intégrer des ressources issues du site lui-même ou d'autres chantiers, grâce à des plateformes de réemploi ou de stockage.

L'objectif de la création de sols est de reproduire au mieux la structure d'un sol naturel fonctionnel en utilisant des matériaux adaptés à son usage spécifique. Chaque sol, composé de ses horizons spécifiques, doit être conçu pour répondre aux exigences de son utilisation prévue afin d'assurer une fonctionnalité optimale. La formulation doit être précise, raisonnée et définie pour garantir un sol performant répondant à un niveau de fonctions compatible avec les objectifs. Pour construire un sol, il est essentiel de déterminer au préalable les services attendus, le niveau à atteindre pour chaque type de mélange ainsi que les propriétés associées.

Définition : Technosols

Les technosols sont des sols artificiels, aussi appelés anthroposols construits, modifiés ou créés par l'activité humaine. Définis en 2006 par l'International Union of Soil Sciences (IUSS), ils sont constitués de matériaux d'origine anthropique et peuvent être conçus pour remplir des fonctions écologiques similaires à celles d'un sol naturel.

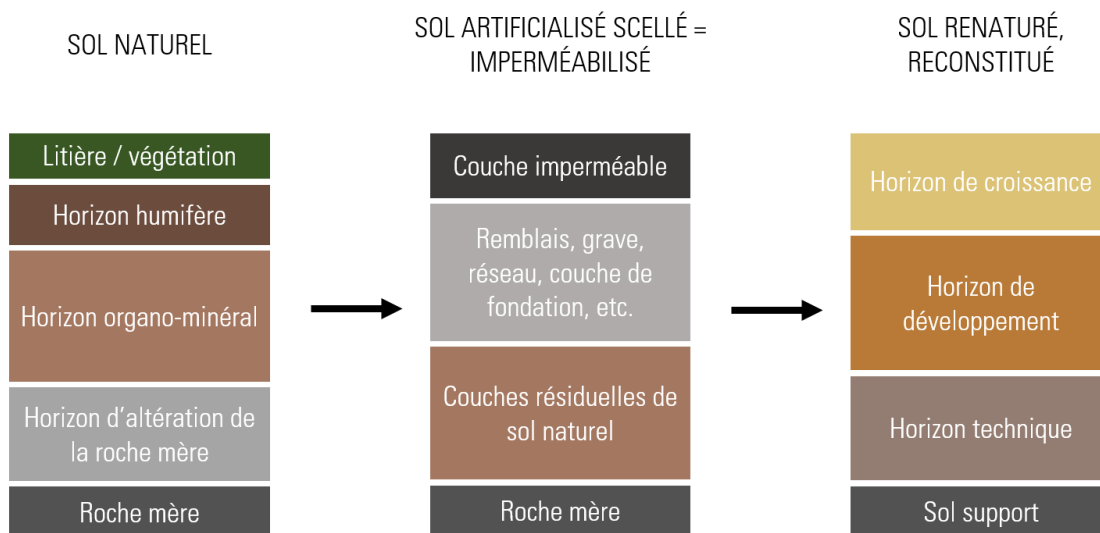


Figure 28 : Modèles de profils de sols ©ARP Astrance

La construction d'un technosol repose sur l'assemblage de divers sous-produits organiques et minéraux, permettant d'atteindre une fonctionnalité écologique comparable à celle d'un sol naturel. Contrairement à une simple reconstitution, elle implique l'incorporation de quantités significatives de matériaux exogènes, organisés en horizons fonctionnels distincts :

- **Horizon de croissance** : support du développement racinaire et source de nutriments.
- **Horizon de développement** : stabilité structurale et stockage hydrique.
- **Horizon technique** : drainage, rétention des nutriments, portance et durabilité.

La création de mélanges spécifiques pour chaque horizon est essentielle pour répondre aux exigences de l'usage prévu.

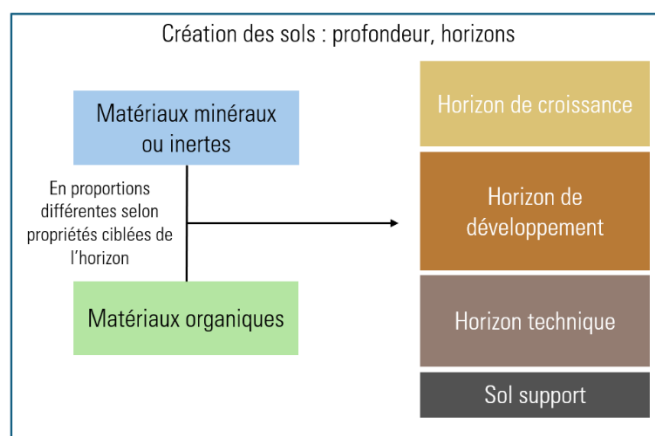


Figure 29 : Schéma de méthode de création de sols ©ARP Astrance

Dans une perspective d'économie circulaire et de réemploi, la construction de technosols s'appuie sur la valorisation de matériaux disponibles sur site, organisés en couches ou horizons fonctionnels (Fabbri

et al, 2021). Cette technique repose sur l'association de substrats minéraux et organiques, sélectionnés pour leurs propriétés spécifiques et leur adéquation avec les objectifs du projet.

1. Substrats minéraux ou inertes :

- Ballast, béton concassé, briques : matériaux issus de démolitions et de travaux publics.
- Déchets du bâtiment : résidus de construction et de rénovation.
- Terres excavées (basiques, neutres ou acides) : terres provenant de terrassements et de creusements.
- Sablons d'excavation, déblais de chantier : matériaux granulaires fins à grossiers issus de travaux de terrassement.

2. Substrats organiques :

- Déchets verts broyés, compost : matières organiques issues de la décomposition de végétaux.
- Sous-produits papetiers, déchets de rue : résidus issus de l'industrie papetière et du nettoyage urbain.
- Boues de stations d'épuration : matières organiques issues du traitement des eaux usées.
- Drêche de bière, marc de café, bois broyé, biodéchets : résidus organiques issus de l'industrie agroalimentaire et de la collecte des déchets organiques.

FOCUS

TERRES IMPORTEES

S'il n'est pas possible de réaliser un sol sur site ou de réutiliser des matériaux à cause de certaines contraintes, des plateformes spécialisées peuvent fournir de la terre. Ces filières de valorisation de site à site, des plateformes de transit et de regroupement, des centres de traitement et des filières agréées de gestion des terres offrent des solutions pour le traitement et la valorisation des matériaux

Exemples de types de sol apportés :

- Terre végétale (norme NF U 44-551) : terres arables amendées, conformes au référentiel pédologique de l'AFES.
- Mélange terre-pierres : associant deux volumes de pierres dures (anguleuses, calibre 40-120 mm) et un volume de terre végétale, ce mélange assure à la fois une fonction agronomique et une portance mécanique.
- Substrats de plantation circulables : similaires aux mélanges terre-pierres mais avec une fertilité plus limitée.
- Granulats de carrière : roche dure, utile pour la stabilisation des sols mais posant des problèmes de ressource et de transport.

Néanmoins, il est crucial de réaliser une mise en place des sols en affectant les matériaux aux horizons appropriés, et de déterminer l'épaisseur appropriée pour chaque horizon (par exemple, il est inutile de mettre de la terre végétale au-delà de 30 cm de profondeur).

- **Intégration des principes de durabilité**

Pour garantir un sol performant et durable, certaines orientations stratégiques doivent guider les projets :

- **Privilégier des solutions circulaires** : utiliser les matériaux présents sur site ou à proximité pour réduire les coûts et l'impact écologique.
- **Optimiser la formulation des sols** : ajuster les mélanges en fonction des objectifs fonctionnels et des contraintes du site (infiltration, portance, végétation prévue).
- **Suivre les sols après travaux** : mettre en place des indicateurs permettant de mesurer leur performance dans le temps et d'assurer un suivi pour adapter la gestion des sols.



Pour aller plus loin :

- *Créer des sols fertiles, Du déchet à la végétalisation urbaine* ([L'ouvrage "Créer des sols fertiles : Du déchet à la végétalisation urbaine" fruit du programme SITERRE - Plante & Cité](#))
- *Des projets pilotes tels que DESSERT ou SITERRE 2 explorent les modalités optimales pour mélanger et structurer ces matériaux en fonction des besoins, notamment en termes de composition physique et chimique.*
- *Le projet GeoBaPa ([GeoBaPa-BRGM](#)), a permis de définir un référentiel régional de qualité des sols, incluant le milieu urbain, sur le périmètre Île-de-France – Normandie afin de faciliter la valorisation des terres excavées d'un site à l'autre, en s'assurant que la qualité des sols reste équivalente.*
- Source : [Construire un sol fertile à partir de déchets | BRGM](#)
- [La santé des sols urbains au service de l'aménagement des villes et des territoires - La librairie ADEME](#)

FOCUS

Le Fond pédogéochimique anthropisé (FPGA)

La quasi-totalité des sols des villes, et notamment les friches et délaissés urbains et péri-urbains, ont de longue date été impactés par les activités humaines. En particulier, sur les territoires des grandes agglomérations urbaines, les sols présentent très souvent des teneurs relativement élevées en éléments traces potentiellement toxiques (ETM, e.g. As, Cr, Cu, Ni, Hg, Pb, Zn, etc.) et/ou en divers composés organiques plus ou moins persistants [e.g. hydrocarbure aliphatiques (HCT C10-C40) et polycycliques (HAPs)]. Dans de nombreux cas cependant, aucune source de pollution ne peut être identifiée précisément, la contamination du sol étant due à des émissions diffuses, ayant impacté de vastes surfaces sur de très longues périodes, (e.g. chauffage des habitations, circulation automobile, retombées industrielles).

Il est évident que la connaissance de ces contaminations diffuses, en termes de cartographie, de nature et de concentrations des éléments présents, mais aussi d'effets potentiels sur la santé publique et l'environnement, est au cœur des enjeux liés à la gestion du foncier urbain. C'est dans ce contexte que l'ADEME et le BRGM ont, depuis le début des années 2010, initié une démarche d'évaluation nationale et de bancarisation de la contamination des sols urbains¹⁸. L'ensemble des données disponibles a été compilé dans la base de données BDSolU, accessible en ligne.

Alors que Les fonds géochimiques naturels renseignent sur les gammes des valeurs habituelles des différentes caractéristiques des sols non soumis à l'influence humaine, le fond pédo-géochimique anthropisé correspond aux teneurs habituelles des principaux contaminants (notamment ETM, HAPs et PCB) dans les couches superficielles des sols (urbains, agricoles, prairiaux ou forestiers) exposés à des apports diffus, dus aux activités humaines présentes ou passées ([ADEME, 2018](#)). Il est important de noter que le fond pédo-géochimique anthropisé renseigne sur un niveau de contamination, mais ne doit pas être assimilé à un niveau de pollution acceptable pour un usage donné. Il s'agit simplement d'un référentiel permettant d'évaluer la qualité chimique d'un sol potentiellement dégradé, dans un environnement historiquement occupé par les hommes. Il permet de définir, pour chaque substance, une ligne de base au-dessus de laquelle les concentrations mesurées marqueront une "**anomalie anthropique**" (c'est-à-dire une teneur inhabituellement élevée, par rapport au référentiel déjà anthropisé).

¹⁸ Source : BDSolU, Base de données des analyses de sol urbain [https \(2025\)](https://bdsolu.ademe.fr/)

LpB (mg/kg_MS)	FPGA		FPGN
Substances	Zones urbaines	Zones vertes	
As	55	30	30
Ba	285	160	160
Cd	1	0,6	0,6
Cr total	50		50
Cu	100	45	35
Hg	1,0		0,2
Mo	4		2
Ni	40		40
Pb	215	120	55
Zn	265	155	120
16HAP	10		2
7PCB	0,1		0,07

Figure 30 : Exemples de calculs de valeurs de fonds

FPGA : Fonds pédogéochimiques anthropisés (BDSolU)

FPGN : Valeur basse de la gamme de teneurs couramment observées dans le cas d'anomalies naturelles (INRAE).

ASPITET : Valeur basse de la gamme des teneurs couramment observées dans le cas d'anomalies modérées (programme ASPITET)

TEX niveau 1 : Valeur proposée : valeur limites de niveau 1 du guide de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement (BRGM)

II.4 Réaménagement écologique

EN BREF

Qui ? #MOA #MOE #Paysagiste #Pédologue #Ecologue

Quelle phase de projet ? #Conception #Réalisation

Objectif : Favoriser un retour à la biodiversité.

Cette étape finale vise à favoriser le retour de la biodiversité et à recréer des habitats naturels adaptés. Elle implique des paysagistes, écologues et entreprises spécialisées en restauration écologique. Ils travaillent sur la plantation, la gestion de la végétation spontanée et la création d'habitats naturels propices à la biodiversité.



Dans la mise en place de sols fonctionnels, un sol fertile n'est pas toujours souhaitable. Les fonctions du sol et ses caractéristiques doivent être adaptées à l'usage et aux milieux souhaités. En effet, toutes les espèces végétales n'ont pas les mêmes besoins en nutriments. Par exemple, certains milieux prairiaux nécessitent un sol pauvre en nutriments.

II.4.1. Sélection de la végétation

Dans sa dimension écologique, la renaturation, qui vise à restaurer les communautés végétales par régénération naturelle ou recolonisation assistée, exige une sélection végétale réfléchie et stratégique.

Le choix des espèces doit garantir la résilience des écosystèmes et leur adaptation aux conditions locales. Au-delà de la simple préférence pour les espèces indigènes, il est impératif de considérer le contexte spécifique du site, les usages qui y seront associés et la plasticité des végétaux.

Les avantages indéniables des espèces indigènes

Ces espèces, naturellement adaptées aux conditions écologiques locales, présentent de nombreux atouts. Elles réduisent les besoins en interventions humaines et en ressources, nécessitant moins d'eau, de fertilisants et de traitements phytosanitaires. Elles contribuent également à préserver la diversité génétique, un facteur essentiel pour l'adaptation aux changements climatiques. De plus, elles favorisent l'installation d'un écosystème riche et équilibré, attirant insectes, invertébrés du sol et micro-organismes symbiotiques.



L'initiative "Végétal Local" permet d'assurer une sélection rigoureuse d'espèces indigènes adaptées aux contextes régionaux.

Une approche nuancée et contextuelle

Cependant, il est important de ne pas adopter une vision dogmatique et de considérer les spécificités de chaque projet. Dans les environnements urbains, où les effets du changement climatique sont amplifiés, les espèces végétales indigènes peinent à s'adapter aux stress croissants. Les approches de sélection axées sur la résistance permettent de développer des espèces ornementales mieux adaptées à ces milieux, plus tolérantes aux conditions difficiles. Ainsi, l'intégration de variétés de plantes résilientes dans ces environnements urbains devient particulièrement pertinente (Kisvarga et al. 2023). De même, les usages du site (végétation colorée, ombrage, plantes odorantes, végétaux comestibles ou sans risques, en évitant les espèces toxiques, allergisantes ou épineuses, notamment dans les espaces publics et à forte fréquentation) peuvent justifier l'introduction d'espèces non indigènes. L'objectif est de créer un équilibre harmonieux entre espèces indigènes et non indigènes, en fonction du contexte et des objectifs du projet.

Stratégies de végétalisation : adapter les espaces aux objectifs

La réussite d'un projet de renaturation repose sur la création d'un paysage végétal diversifié et fonctionnel, où chaque zone est soigneusement planifiée en fonction de ses usages, de ses fonctions écologiques et des objectifs globaux du projet. Cette approche stratégique permet de maximiser les bénéfices écologiques, esthétiques et fonctionnels, en intégrant une mosaïque d'espaces tels que des :

- **Zones de naturalité spontanée :**
 - Ces espaces sont dédiés à la libre expression de la nature, favorisant la biodiversité locale et les dynamiques écologiques naturelle. Ils offrent un refuge pour les espèces indigènes, permettant leur développement sans intervention humaine excessive.
- **Zones de naturalité semées ou plantées :**
 - Les zones de naturalité semées ou plantées accélèrent la restauration écologique par une sélection et une implantation d'espèces indigènes adaptées. Elles recréent des habitats spécifiques (prairies, bosquets, zones humides) en s'inspirant des écosystèmes et cortèges floristiques locaux, offrant refuges et ressources à la faune, tout en renforçant la connectivité écologique. Le choix d'introduire des espèces mellifères peut notamment permettre de favoriser la présence des pollinisateurs. Dans une approche de renaturation plus fine, des techniques complémentaires comme le transfert de foin, la transplantation de mottes ou encore l'installation de pièges à graines peuvent être mobilisées pour favoriser une dynamique végétale spontanée, en lien avec les milieux ciblés.
- **Zones d'agrément paysager :**
 - Conçues pour valoriser l'esthétique du site, ces zones intègrent des espèces végétales sélectionnées pour leurs qualités ornementales (couleurs, formes, parfums) Elles contribuent à l'attractivité visuelle du projet et au bien-être des usagers.
- **Zones de fonctionnalité ciblée :**
 - Ces espaces sont aménagés pour répondre à des besoins spécifiques, tels que la création d'ombre, la phytoremédiation des sols ou la production de ressources alimentaires. Leur conception repose sur des critères techniques et écologiques précis, visant à optimiser les services rendus par la végétation.

Adaptation au sol et aux conditions environnementales

La sélection végétale doit être rigoureusement adaptée aux caractéristiques du sol et du climat local :

- **Type de sol** : sableux, argileux, limoneux...
- **pH** : acide, neutre ou basique
- **Richesse en matière organique** : normale, riche, très riche
- **Profondeur et capacité de rétention d'eau** : sol drainant, gorgé d'eau, sec...
- **Exposition** : ensoleillement, ombrage, exposition au vent
- **Climat** : pluviométrie, extrêmes de températures
- **Topographie** : pentes, zones humides, zones sèches
- **Tolérance au calcaire actif**
- **Rusticité**

Une adéquation parfaite entre le sol et la végétation garantit une implantation durable et limite les besoins en entretien. L'utilisation de bases de données scientifiques et écologiques, telles que [Floriscope](#), permet de définir des palettes végétales spécifiques et adaptées au site.

Diversité des espèces et des strates végétales

Une végétation diversifiée est essentielle pour créer des écosystèmes équilibrés et résilients. Il est crucial d'intégrer différentes strates végétales : arbres, arbustes, herbacées et plantes grimpantes, ainsi que diverses espèces au sein de chaque strate. L'implantation doit être conçue en cortège végétal, intégrant des espèces complémentaires qui renforceront la stabilité et la résilience de l'écosystème.

La diversification des périodes de végétation et de floraison, à travers l'intégration de plantes à cycles de vie variés, est un levier essentiel pour renforcer la résilience et la fonctionnalité des écosystèmes renaturés. L'introduction de bulbeuses à floraison précoce, par exemple, permet de capitaliser sur les conditions climatiques favorables du début de printemps, une période souvent sous-exploitée par les espèces à floraison estivale ou automnale.

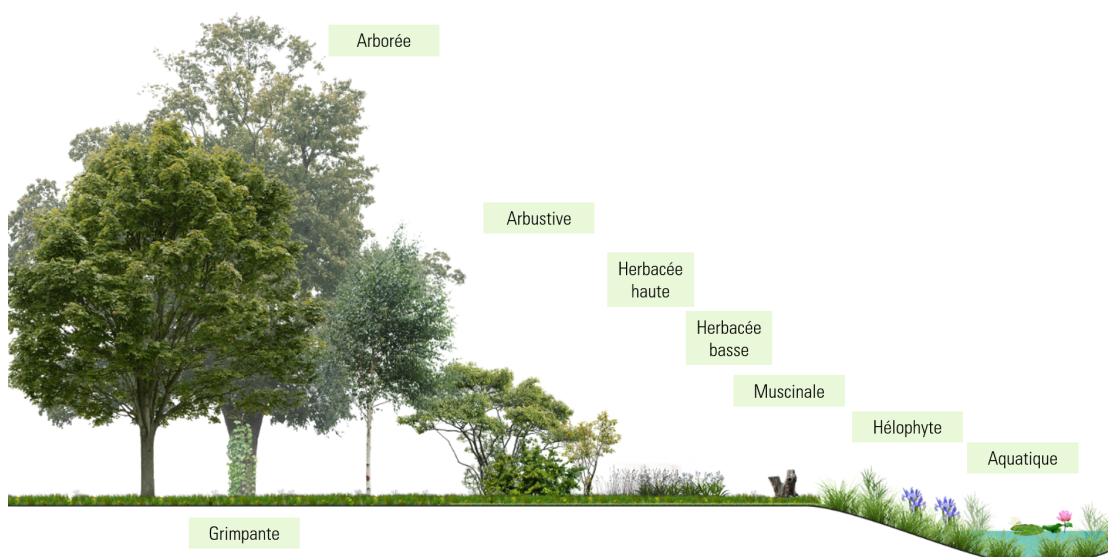


Figure 31 : Les différentes strates végétales ©ARP Astrance

La plasticité végétale : un critère essentiel

La plasticité végétale, c'est-à-dire la capacité d'une plante à s'adapter à différentes conditions environnementales, est un critère essentiel à considérer. Cette capacité d'adaptation permet aux plantes de mieux résister aux variations de leur environnement, telles que les variations hydriques, thermiques, la nature du sol ou l'exposition. En tenant compte de la plasticité végétale, il est possible de sélectionner des espèces plus résilientes, de réduire les besoins en entretien et de favoriser la pérennité des plantations. Certaines plantes possèdent une grande plasticité et s'adaptent mieux aux environnements contraints, notamment en milieu urbain. La sélection des espèces doit tenir compte de :

- Leur capacité d'évapotranspiration
- Leur tolérance aux variations hydriques et climatiques
- Leur mode de stockage des nutriments (ex. bulbeuses et rhizomateuses comme l'Iris nain, résistant et pouvant survivre jusqu'à 20 ans)

Un plan de plantation précis doit être établi pour assurer une répartition équilibrée entre plantes à réserve et plantes évapotranspirantes. Un exemple concret des limites d'une approche non nuancée est le recours systématique à des espèces méditerranéennes peu évapotranspirantes, qui peuvent réduire le potentiel de rafraîchissement et peiner à s'établir lors d'épisodes de pluies abondantes et régulières.

Utilisation des plantes pionnières

Les plantes pionnières jouent un rôle clé dans la régénération des sols dégradés. Elles améliorent la structure et la chimie du sol, facilitent l'implantation des espèces plus exigeantes et stabilisent les écosystèmes en transition. Il peut être intéressant de chercher à les implanter.



Point de vigilance : Même avec une approche de gestion libre, il est indispensable de surveiller la colonisation par des espèces exotiques envahissantes. Un suivi régulier et une gestion adaptée doivent être mis en place pour éviter la prolifération de ces espèces, qui peuvent compromettre la fonctionnalité de l'écosystème renaturé.

Phytoremédiation pour gérer les polluants (voir 2.3.1)

L'usage de plantes permet de gérer la contamination des sols en piégeant les métaux lourds ou en dégradant les polluants (composés organiques). La phytoremédiation n'est cependant pas envisageable pour les pollutions concentrées. Différentes techniques peuvent être mobilisées selon le type de contamination :

- Phytoextraction (pour les polluants inorganiques : Ni, Cd, Cu, Zn, As) : absorption des polluants par les racines
- Phytodégradation : transformation des polluants organiques en molécules moins toxiques
- Phytostabilisation : immobilisation des contaminants dans le sol



Ces solutions sont particulièrement adaptées aux grands espaces faiblement contaminés et aux projets nécessitant une dépollution progressive.

Dans la gestion des sites et sols pollués, les phytotechnologies présentent de nombreux atouts pour la renaturation des sols. Par exemple : la stabilisation des polluants dans le sol, valorisation des terres sur site (réduction des coûts de transport liés à leur élimination), amélioration des fonctions du sol, amélioration des aménités paysagères et participation des sols à la résilience face au changement climatique. Ces options de gestion doivent être envisagées dans le cadre du Plan de gestion (PG) suite à une étude bilan coût/avantage. Les sources de pollution doivent être maîtrisées en s'appuyant sur des études de délimitation et de traitement des pollutions concentrées, de délimitation des impacts, et de validation de la compatibilité des pollutions résiduelles avec les usages prévus.

Une démarche personnalisée et collaborative

La sélection des végétaux doit être alignée sur les objectifs globaux du projet, qu'ils soient écologiques, sociaux ou esthétiques. Un dialogue étroit et continu entre les différents acteurs du projet (paysagistes, écologues, pédologues, usagers, etc.) est indispensable pour garantir la réussite de la démarche. Les retours d'expérience de projets similaires sont une source d'inspiration précieuse pour affiner la sélection et optimiser les résultats.

La présence d'un écologue lors de la livraison des végétaux pourra permettre de garantir leur conformité (ex. taille à la livraison).

II.4.2. Travailler un couple sol-végétation écologiquement fonctionnel

L'objectif est de créer des habitats favorables à des espèces cibles, soit celles qui fréquentent les sites alentours, soit celles qui manquent d'habitats dans la zone. Pour cela, il est essentiel de suivre les préconisations de l'écologue afin de s'assurer que les habitats créés répondent aux besoins spécifiques des espèces cibles.

La diversité des habitats est également un facteur clé pour favoriser une biodiversité riche et équilibrée. Il est donc essentiel de concevoir une mosaïque d'environnements variés, capables d'accueillir une multitude d'espèces différentes. Enfin, la connectivité des habitats doit être minutieusement étudiée, afin de permettre aux espèces de se déplacer et de migrer librement. Cette connectivité est cruciale pour assurer leur survie et leur reproduction à long terme.

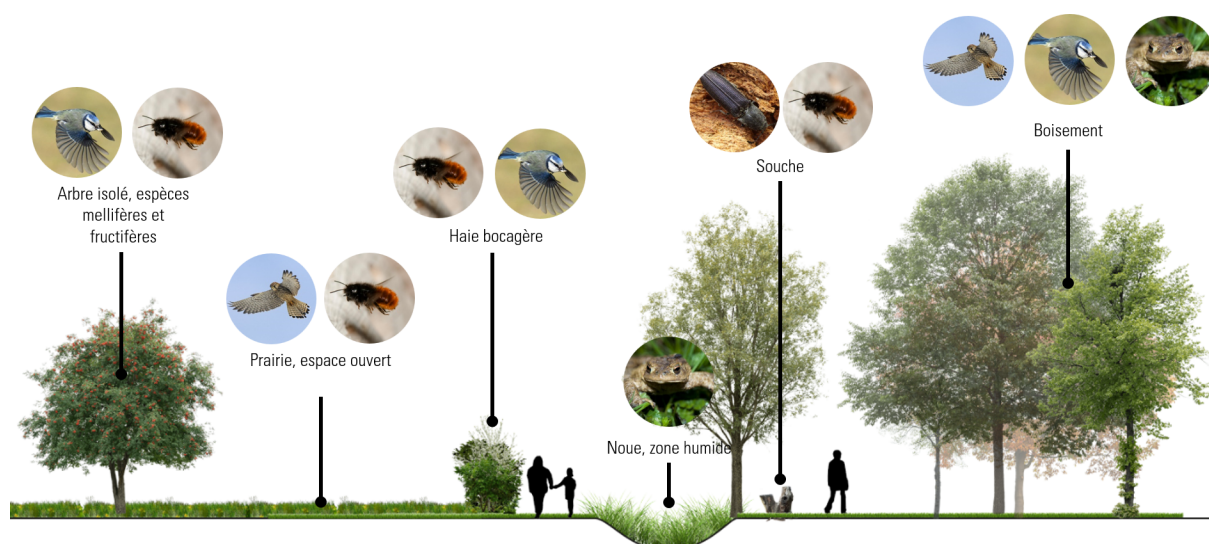


Figure 32 : Diversité d'habitats spécifiques à la faune ©ARP Astrance

L'optimisation de la biodiversité et de la continuité écologique dépend de l'implantation judicieuse des milieux, en adéquation avec les propriétés du sol et en synergie avec les continuités écologiques et habitats écologiques environnants.

Milieux fermés (urbains et non urbains) :

Les milieux fermés, qu'ils soient en milieu urbain ou rural, se caractérisent par un couvert végétal dense et continu. En ville, cela peut se traduire par des **boisements urbains**, des **parcs arborés denses**, ou même des cours intérieures fortement végétalisées. Ils offrent des **îlots de fraîcheur**, réduisent les effets d'îlots de chaleur urbains, et fournissent des habitats pour la



faune urbaine (oiseaux, insectes, petits mammifères). En milieu naturel, les forêts et les boisements jouent un rôle essentiel dans la régulation du climat et la conservation de la biodiversité. Dans les deux contextes, la présence de strates végétales variées et de microhabitats est cruciale pour la biodiversité.

→ Dans ces milieux, le sol, riche en matière organique, favorise une bonne rétention d'eau et une intense activité biologique. La zone d'interaction entre les racines des arbres et les communautés microbiennes (bactéries, champignons mycorhiziens) joue un rôle essentiel dans l'acquisition des nutriments. La faune édaphique (vers de terre, collemboles, acariens) et les micro-organismes décomposent la matière organique, libérant ainsi des nutriments essentiels pour la croissance des plantes et contribuant à la formation de l'humus, réservoir de carbone et de nutriments. La structure du sol, influencée par la pédogenèse et l'activité biologique, détermine sa capacité de rétention d'eau, sa porosité et la circulation des éléments.

Milieux semi-ouverts (urbains et non urbains) :

Les milieux semi-ouverts présentent une mosaïque d'habitats, avec une alternance de zones arborées, arbustives et herbacées. En ville, cela peut inclure des friches urbaines en transition, des berges de cours d'eau renaturées, des parcs avec des zones de prairies et de bosquets, ou des jardins partagés avec des haies et des arbres fruitiers. En milieu rural, les bocages et les lisières forestières sont des exemples typiques. Ces milieux favorisent la connectivité écologique, en permettant aux espèces de se déplacer entre différents habitats. Ils offrent également des ressources alimentaires et des abris pour la faune.

→ Le sol dans ces milieux est diversifié, avec des zones de sol nu, des zones de sol couvert de litière et des zones de sol enherbé avec une teneur en matière organique variable. L'activité biologique reste importante, mais peut être plus inégale en fonction des conditions locales (humidité, type de végétation, etc.). Cette diversité favorise une variété de microhabitats et une grande richesse biologique.

Milieux ouverts (urbains et non urbains) :

Les milieux ouverts, caractérisés par une végétation herbacée dominante, jouent un rôle essentiel dans la biodiversité, tant en milieu urbain que naturel. En ville, ils se manifestent sous diverses formes : prairies fleuries dans les parcs, pelouses sèches sur terrains en pente, ou jardins de pluie. Ces espaces contribuent significativement à la biodiversité urbaine, attirant les pollinisateurs et offrant des habitats précieux pour les oiseaux. En milieu naturel, les prairies et les pelouses sont des exemples typiques de milieux ouverts. Leur végétation, d'une grande diversité, varie considérablement en fonction de facteurs tels que l'hygrométrie, la topographie, l'exposition, le climat et les pratiques de gestion. Cette diversité floristique est cruciale pour la biodiversité, car elle offre une variété de ressources et d'habitats pour de nombreuses espèces. Que ce soit en milieu urbain ou naturel, la richesse floristique et la présence de microhabitats (tas de pierres, bois mort) sont des éléments déterminants pour la biodiversité. La diversité floristique, quant à elle, soutient une chaîne alimentaire complexe et favorise la présence de pollinisateurs, essentiels à la reproduction de nombreuses plantes.

Le sol dans ces milieux est souvent pauvre en matière organique et bien drainé, ce qui favorise la croissance des plantes adaptées aux conditions sèches. Il joue un rôle important dans la régulation du cycle de l'eau et dans la séquestration du carbone.



Tableau 10 : Typologies des milieux ouverts selon les caractéristiques du sol

Type	Caractéristiques du sol	Conditions nécessaires
Prairie humide	Sols saturés en eau, souvent argileux ou limoneux, parfois tourbeux	Proximité d'un cours d'eau ou d'une nappe phréatique élevée, drainage limité, pH neutre à légèrement acide
Prairie de fauche	Sols fertiles, profonds, texture équilibrée, bonne capacité de rétention d'eau	Humidité suffisante, pH neutre à légèrement acide, gestion de la fauche
Prairie pâturée	Sols variés, tolérance aux piétinements, capacité de régénération après pâturage	Accès à l'eau, gestion du pâturage pour éviter le surpâturage, sols variés
Pelouse sèche	Sols pauvres, sableux ou caillouteux, bien drainés	Exposition ensoleillée, faible pluviométrie, pH variable, tolérance à la sécheresse
Roselière	Sols très humides à inondés, souvent argileux ou limoneux	Présence d'eau stagnante ou à faible courant, pH neutre à légèrement alcalin, ensoleillement
Tourbière	Sols très acides, pauvres en nutriments, saturés en eau, composés de tourbe	Climat frais et humide, faible drainage, pH très acide

Structures linéaires (haies, corridors urbains) :

Les structures linéaires, telles que les haies, jouent un rôle crucial dans la connectivité écologique, en reliant les différents types de milieux. En milieu urbain, cela peut inclure des haies le long des rues, des corridors verts le long des voies ferrées ou des cours d'eau, ou des murs végétalisés connectés. Elles offrent des abris, des sites de nidification et des sources de nourriture pour la faune urbaine. En milieu rural, les haies bocagères sont des exemples typiques **et ont sur les sols un effet bénéfique sur l'érosion et le lessivage**. Dans les deux contextes, la diversité des espèces végétales et la continuité des structures linéaires sont essentielles pour la biodiversité en créant ou en maintenant des continuités vertes et brunes.

→ Le sol dans ces structures est souvent perturbé par les activités humaines (routes, bâtiments), mais ces haies peuvent jouer un rôle important dans le maintien des sols en place et la réduction de l'érosion de sols à proximité, la filtration et l'infiltration de l'eau et la séquestration du carbone.



Milieux humides et aménagements hydrauliques :

Les milieux humides, tels que les zones riveraines des cours d'eau, les aménagements de gestion des eaux pluviales et les mares sont d'une importance capitale pour la biodiversité. Ils servent de zones de reproduction et d'alimentation pour de nombreuses espèces aquatiques et semi-aquatiques. Les aménagements hydrauliques, tels que la création de zones de rétention d'eau, la restauration de méandres de rivières et la mise en place de zones tampons végétalisées, contribuent à la régulation des crues, à l'amélioration de la qualité de l'eau et à la création de nouveaux habitats pour la faune et la flore. En milieu urbain, les jardins de pluie, les noues et les fossés participent également à la gestion durable des eaux pluviales et à la création d'îlots de fraîcheur. La préservation et la restauration de ces milieux sont essentielles pour maintenir la biodiversité et assurer la résilience des écosystèmes face aux changements climatiques.

→ Le sol dans ces milieux est souvent saturé en eau, ce qui crée des conditions particulières pour la croissance des plantes, micro-organismes et pour la faune. Il joue un rôle essentiel dans la filtration de l'eau, la régulation des nutriments et la séquestration du carbone. La rhizosphère, zone d'interaction entre les racines et les micro-organismes, joue un rôle crucial dans la régulation des échanges hydriques et nutritifs. Les processus de dénitrification et de méthanogenèse, réalisés par les micro-organismes anaérobies, influencent la composition de l'atmosphère et les cycles biogéochimiques. Il sert également d'habitat pour de nombreuses espèces aquatiques et semi-aquatiques.



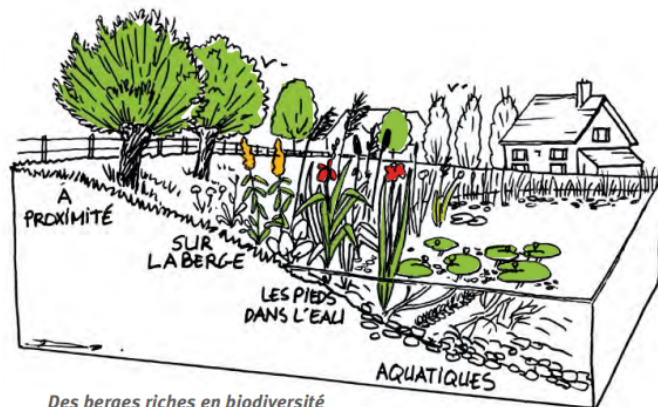
Exemple des typologies de végétation herbacée en fonction de caractéristiques pédologiques généralement observées :

Tableau 11 : Typologies de végétation herbacée en fonction de caractéristiques pédologiques généralement observées

Type d'habitat de zone humide	Caractéristiques	Conditions nécessaires
Mare	Plan d'eau peu profond, rives à pente douce, végétation aquatique et semi-aquatique, habitat pour amphibiens et insectes aquatiques.	Sols argileux, en bas de pente pour récupérer les eaux pluviales et de ruissellement.
Noue végétalisée infiltrante	Ouvrage de gestion des eaux pluviales, favorise l'infiltration, végétation résistante à l'érosion et adaptée aux variations d'eau, ralentissement des flux.	Sols perméables, entretien régulier de la végétation, pente douce.
Noue végétalisée drainante	Ouvrage de gestion des eaux pluviales, favorise l'écoulement contrôlé, végétation résistante à l'érosion et adaptée aux variations d'eau, canalisation des flux.	Sols perméables, entretien régulier de la végétation, pente prononcée.
Noue végétalisée mixte	Ouvrage de gestion des eaux pluviales combinant infiltration et drainage, végétation résistante à l'érosion et adaptée aux variations d'eau, régulation des flux.	Sols variés, entretien régulier de la végétation, pente variable.
Fossé végétalisé infiltrant	Ouvrage de gestion des eaux pluviales, favorise l'infiltration, rives en pente douce, végétation aquatique et semi-aquatique, habitat pour une faune diversifiée.	Sols drainants, gestion des flux d'eau, entretien pour éviter l'envasement.
Fossé végétalisé de rétention	Ouvrage de gestion des eaux pluviales, retient temporairement l'eau, rives en	Sols argileux ou limoneux, gestion des flux d'eau,

Type d'habitat de zone humide	Caractéristiques	Conditions nécessaires
	pente raide, végétation aquatique et semi-aquatique, habitat pour une faune diversifiée.	entretien pour éviter l'envasement.
Roselière	Zone humide dominée par les roseaux, filtration de l'eau, habitat pour une faune diversifiée.	Sols humides, présence d'eau stagnante ou à faible courant, ensoleillement.
Prairie humide	Prairie inondable de façon saisonnière, flore adaptée à l'humidité, habitat pour oiseaux et insectes.	Sols humides, présence d'une nappe phréatique proche de la surface ou topographie favorable gestion des fauches.
Zone riveraine (berges de cours d'eau)	Bande de végétation bordant un cours d'eau, stabilisation des berges, filtration de l'eau, habitat pour de nombreuses espèces.	Sols variés, présence d'un cours d'eau, gestion de la végétation.

Pour des berges écologiquement fonctionnelles, aménagez un gradient d'humidité avec des paliers et des pentes variées, optimisant ainsi les niches écologiques pour la végétation. Sélectionnez des plantes adaptées à chaque zone (aquatiques, hygrophiles, terrestres), favorisant la biodiversité locale.



Des berges riches en biodiversité

À proximité : Aulne glutineux, Bouleau pubescent,

Osier des vanniers, Saule blanc, Saule marsault

Sur la berge : Benoîte des ruisseaux, Bugle rampante,

Cardamine des prés, Lysimaque nummulaire, Populage des marais,

Reine des prés, Salicaire commune, Valériane officinale

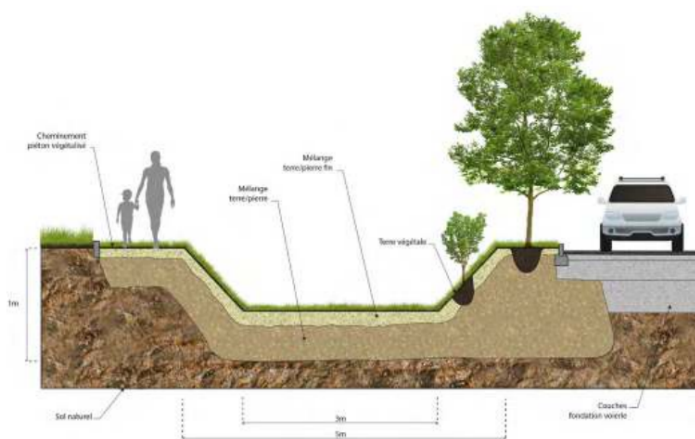
Les pieds dans l'eau : Iris des marais, Nénuphar blanc, Sagittaire, Salicaire

Aquatiques : Butome en ombrelle, Nénuphar commun, Nénuphar blanc,

Potamogeton natant, Sagittaire



Figure 33 : SEQ Figure * ARABIC 40 : Guide éco-jardin ©PNR de la Haute Vallée de Chevreuse



Pour compléter ces milieux et renforcer l'accueil de la biodiversité, divers aménagements peuvent être installés afin d'offrir des refuges aux espèces locales :

- Nichoirs pour oiseaux et chauves-souris.
- Micro-habitats favorables aux insectes et aux petits mammifères.
- Tas de bois et souches pour abriter les insectes xylophages et les amphibiens.
- Rochers et murets de pierre sèche pour créer des zones de refuge pour les reptiles et certains invertébrés.

Ces éléments, intégrés de manière harmonieuse aux milieux naturels, contribuent à diversifier les habitats et à renforcer les fonctionnalités écologiques du projet de renaturation urbaine.



Pour aller plus loin :

- **Fiches techniques sur la prise en compte de la biodiversité dans l'aménagement :** Biodiversité et paysage urbain - LPO ([Biodiversité et Paysage urbain - LPO \(Ligue pour la Protection des Oiseaux\) - Agir pour la biodiversité](#))
- **Préconisations pour les ouvrages de gestion des eaux pluviales :** Gestion des eaux pluviales et biodiversité – ARB idF ([ouvrages eaux pluviales biodiversite arbidf.pdf](#))
- **OASIS : Outil d'aide à la décision au dimensionnement des systèmes d'infiltration des pluies courantes** – Cerema ([Guide utilisateur d'Oasis](#), [Gestion des eaux pluviales : OASIS, l'Outil d'Aide au dimensionnement des Systèmes d'Infiltration des pluies courantes | Cerema](#))
- [Jardiner avec la nature | Parc Naturel de la Haute Vallée de Chevreuse](#)
- **Connectivité et réseaux écologiques** - <https://www.trameverteetbleue.fr/>
- **DESIVILLE : où et comment désimperméabiliser les sols urbains ?** – [BRGM](#), [Cerema](#), [oteis](#), [NANTES métropole](#), [IRTSV](#)



III - Évaluer son projet de renaturation

III. Évaluer son projet de renaturation

III.1 Évaluer les fonctions des sols

EN BREF

Qui ? #MOA #MOE #Paysagiste #Pédologue #Gestionnaire

Quelle phase de projet ? #Etudes préalables #Réception #Suivi post-livraison

Objectif : Evaluer les fonctions des sols en choisissant les paramètres adaptés : à l'état zéro, en cours de projet (chantier), à la réception puis en suivi après livraison.

Les **paramètres** et **indicateurs** du sol sont des mesures **qualitatives et/ou quantitatives** qui permettent d'évaluer l'état des fonctions des sols à un instant donné et leurs variations dans le temps. Les démarches d'évaluation des fonctions et des services des sols reposent généralement sur la mesure ou l'observation de paramètres (propriétés et/ou processus du sol) qui sont reliés de manière qualitative ou quantitative aux fonctions (Calvaruso et al., 2019).

Les paramètres du sol peuvent être appréhendés à partir de mesures ou d'observations directes du sol (Baize et Jabiol, 2011). Les fonctions du sol peuvent ensuite être évaluées par la mesure ou l'observation directe d'un ou plusieurs paramètres (agrégation) (Schindelbeck et al., 2008).

Pour **évaluer les fonctions des sols**, des paramètres physiques, chimiques et biologiques peuvent être mesurés ou observés dans un profil de sol par un expert pédologue. Le tableau 10 regroupe les indicateurs/paramètres mesurables par fonction du sol. Chaque indicateur peut être observé sur le terrain par un pédologue et/ou analysé en laboratoire à partir d'un échantillon. Pour faciliter cette lecture, la figure 42 répertorie les paramètres principaux à analyser en fonction des objectifs de renaturation prioritaires sur le projet (voir 1.3.3). Cette répartition permet de prioriser les mesures à effectuer sur les sols, à chaque étape, pour une meilleure maîtrise des coûts et une approche adaptée au projet de refonctionnalisation.



Le présent référentiel n'a pas vocation à proposer une méthodologie préconçue d'évaluation des fonctions des sols avec une liste d'indicateurs et des valeurs seuils associées. L'objectif est de donner des grandes orientations pour accompagner les porteurs de projet à mieux comprendre l'intérêt des diagnostics de sol. En outre, la priorisation des paramètres à mesurer peut aider les porteurs de projets à mieux cerner leur besoin, dimensionner leurs appels d'offres et faire appel aux bonnes expertises pour les diagnostics de sols.

Pour une évaluation précise et adaptée à votre projet, il convient de faire appel à un bureau d'études spécialisé.



FOCUS : VALEURS DE REFERENCE

À ce jour, il n'existe pas de consensus établi sur des valeurs seuils à atteindre, indicateur par indicateur, pour garantir un niveau de fonctionnalité des sols en contexte urbanisé. Les rares référentiels existants sont majoritairement centrés sur les sols agricoles, ce qui se justifie par la plus grande stabilité des usages et des objectifs de production. En milieu urbain ou renaturé, la définition de valeurs cibles s'avère plus complexe, car ces seuils dépendent de nombreux facteurs : contexte pédoclimatique, usage visé (loisir, support végétalisé, support d'habitat écologique...), ou encore type d'écosystème de référence.

Dans ce cadre, et comme discuté lors des travaux préparatoires du référentiel, il a été choisi de ne pas proposer de seuils génériques, mais plutôt d'encourager l'identification de **sols de référence** adaptés au projet. Il est possible de relever certains paramètres sur un **site témoin, à proximité, jugé fonctionnel** (conformément aux objectifs de refonctionnalisation visés) et d'en déduire des valeurs cibles. Celles-ci peuvent alors guider les étapes du projet : formulation d'un sol reconstitué, suivi de chantier, puis évaluation post-travaux. Cette réflexion peut s'appliquer par exemple à la reconstitution d'un habitat écologique régional (prairie mésophile, pelouse xérophile, etc.), à la création d'espaces d'agriculture urbaine en s'inspirant de potagers urbains à proximité ou encore à la création d'ouvrage de gestion des eaux pluviales. Cette réflexion de milieu de référence s'applique tout autant au **choix de la végétation**.

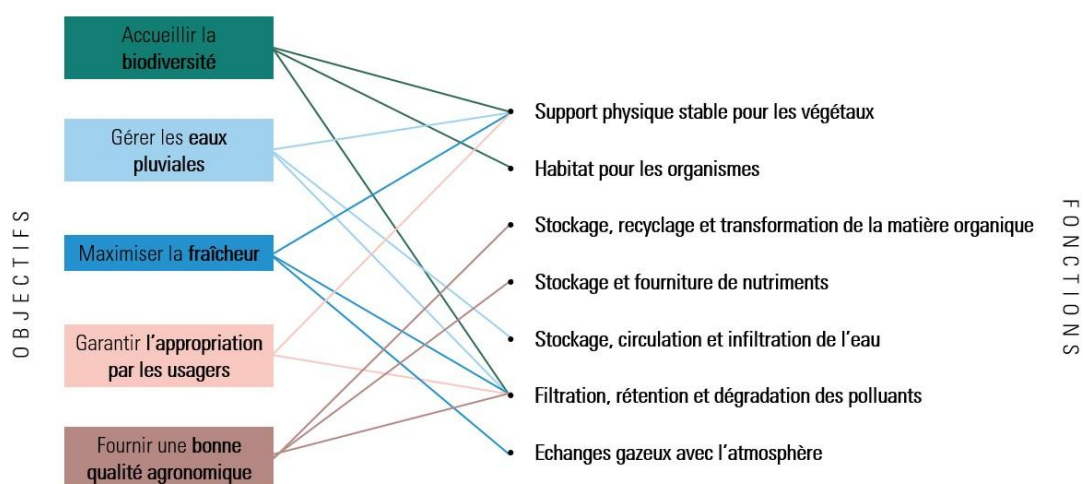


Figure 34 : Lien entre objectifs de refonctionnalisation et fonctions des sols ©ARP Astrance

Accueillir la biodiversité	Gérer les eaux pluviales	Maximiser la fraîcheur
Masse volumique apparente sèche Macroporosité Réserve utile en eau Profondeur / épaisseur Texture Pierrosité Structure des agrégats Traces / signes d'érosion Profondeur d'enracinement Description du couvert végétal Enracinement Respiration basale du sol Abondance et diversité des vers de terre, des nématodes (microfaune), de la mésofaune (enchytréides, microarthropodes) Activité microbienne Mesure de l'activité biologique	Masse volumique apparente sèche Macroporosité Réserve utile en eau Profondeur / épaisseur Texture Pierrosité Structure des agrégats Traces / signes d'érosion Vitesse d'infiltration / perméabilité Profondeur d'enracinement Respiration basale du sol Plantes hygrophiles	Masse volumique apparente sèche Macroporosité Réserve utile en eau Profondeur / épaisseur Texture Pierrosité Structure des agrégats Traces / signes d'érosion Teneur en eau Profondeur d'enracinement Respiration basale du sol Activité microbienne Type de végétation Stock de C et évolution % de MO Teneur en CaCO3 Rapport C/N pH

Garantir l' appropriation par les usagers	Fournir une bonne qualité agronomique
Masse volumique apparente sèche Macroporosité Réserve utile en eau Profondeur / épaisseur Texture Pierrosité Structure des agrégats Traces / signes d'érosion Profondeur d'enracinement Respiration basale du sol	Activité microbienne Phytostabilisation / dégradation des polluants % de MO Rapport C/N Teneur en N total pH Phosphore assimilable CEC Concentration en CaCO3 Teneur en éléments assimilables (micronutriments) Teneur en polluants (HAP, PCB, organiques) Disponibilité des ETM

Figure 35 : Indicateurs à prioriser selon les objectifs de refonctionnalisation ©ARP Astrance

Pour rappel, les objectifs de renaturation établis dans le présent référentiel s'appuient sur les fonctions du sol définies par l'Association Française pour l'étude des sols (AFES), et représentées dans la figure 34.

Après livraison du projet et des sols renaturés, il est essentiel d'assurer un suivi efficace et une transmission claire des bonnes pratiques aux acteurs impliqués. Pour cela il existe plusieurs leviers :

- Intégrer des suivis simples, réalisables par l'entreprise dans les deux ans de garantie de reprise, afin d'évaluer l'efficacité des actions mises en place et d'anticiper d'éventuels ajustements.

- Impliquer le plus tôt possible, l'entreprise, le futur gestionnaire ou le service de la collectivité responsable des futurs espaces verts. Cette anticipation garantit une cohérence dans la gestion future et facilite l'appropriation des bonnes pratiques.
- Fournir un carnet d'entretien et de suivis préconisés au futur gestionnaire, détaillant les actions à mettre en œuvre pour assurer la pérennité de la renaturation.

L'évolution du sol, notamment en ce qui concerne la biologie et les organismes, est un processus long. Certains indicateurs ne sont donc pas pertinents à mesurer immédiatement après les travaux, car aucun résultat ne sera observable. Ainsi, certains indicateurs sont mesurables dès la livraison, tandis que d'autres pourront être mesurés plus tard (environ 2 ans). Il est également important de distinguer les indicateurs stables (propriétés inhérentes au sol) des indicateurs dynamiques, qui dépendent de facteurs environnementaux au moment du relevé. Deux mesures effectuées à quelques jours d'intervalle peuvent différer significativement, rendant leur évaluation à la livraison peu recommandée (voir tableau 10).

Le projet DESSERT ([Guide P C desimpermeabilisation V4.pdf](#)) a identifié des relevés de suivi simples à mesurer :

- Thermomètre portatif pour mesurer les températures
- Instrument de mesure de l'humidité et de la perméabilité d'un sol
- Suivi de l'évolution de la végétation (apparition/disparition des espèces plantées ou spontanées, couverture végétale et indicateurs de stress des végétaux)

Tableau 12 : Paramètres du sol (physiques (bleu), chimiques (rose), biologiques (vert)) par fonction et indications sur les méthodes de mesure. Indiquasol et Calvaruso & al, 2019 ©ARP Astrance

FONCTION DU SOL	PARAMÈTRES DU SOL	Etat de l'indicateur	Temporalité	Terrain/Labo ?
Support physique stable pour le vivant	Masse volumique apparente sèche	Stable	dès la livraison	Laboratoire
	Macro-porosité	Stable	dès la livraison	Terrain
	Réserve utile en eau	Stable	dès la livraison	Laboratoire
	Profondeur / épaisseur	Stable	dès la livraison	Terrain
	Texture	Stable	dès la livraison	Évaluée sur le terrain mais confirmée en labo
	Pierrosité	Stable	dès la livraison	Terrain
	Structure des agrégats	Stable	dès la livraison	Terrain
	Traces / signes d'érosion	Dynamique	plus tard	Terrain
	Profondeur d'enracinement	Stable	plus tard	Terrain
	Respiration basale du sol	Dynamique	plus tard	Laboratoire
Habitat pour les organismes et support de biodiversité	Abondance et diversité des vers de terre	Dynamique	plus tard	Terrain
	Nématode (microfaune)	Dynamique	plus tard	Laboratoire
	Activité microbienne	Dynamique	plus tard	Laboratoire
	Diversité et abondance mésofaune (enchytréides, microarthropodes, etc)	Dynamique	plus tard	Laboratoire
	Description du couvert végétal	Dynamique	dès la livraison	Terrain
	Enracinement	Dynamique	plus tard	Terrain
	Respiration basale du sol	Dynamique	plus tard	Laboratoire
	Mesure de l'activité biologique (méthode du litter bag)	Dynamique	plus tard	Terrain
	%MO (Matière organique)	Dynamique	dès la livraison	Laboratoire

Stockage, recyclage et transformation de la matière organique	Teneur en N total	Dynamique	dès la livraison	Laboratoire
	Rapport C/N	Dynamique	dès la livraison	Laboratoire
Stockage, circulation et infiltration de l'eau	Traces d'hydromorphie	Dynamique	plus tard	Terrain
	Vitesse d'infiltration / perméabilité	Dynamique	dès la livraison	Terrain
	Texture	Stable	dès la livraison	Évaluée sur le terrain mais confirmée en labo
	Plantes hygrophiles	Dynamique	plus tard	Terrain
Stockage et fourniture de nutriments	pH	Stable	dès la livraison	Terrain ou labo
	Phosphore assimilable (P Olsen)	Stable	dès la livraison	Laboratoire
	CEC (Capacité d'Échange Cationique)	Stable	dès la livraison	Laboratoire
	Concentration en CaCO3	Stable	dès la livraison	Laboratoire
	Teneurs en éléments assimilables (micronutriments)	Stable	dès la livraison	Laboratoire
Filtration, rétention et dégradation des polluants	Teneur en polluants (HAP, PCB, organiques)	Stable	dès la livraison	Laboratoire
	Disponibilité des ETM (Éléments Traces Métalliques)	Stable	dès la livraison	Laboratoire
	Activité microbienne	Dynamique	plus tard	Laboratoire
	Phytostabilisation / dégradation des polluants	Dynamique	plus tard	Laboratoire
Échanges gazeux avec l'atmosphère	Stock de C et évolution	Dynamique	plus tard	Laboratoire
	%MO	Dynamique	dès la livraison	Laboratoire
	Activité microbienne	Dynamique	plus tard	Laboratoire
	Teneur en CaCO3	Stable	dès la livraison	Laboratoire
	Rapport C/N	Dynamique	dès la livraison	Laboratoire
	Type de végétation	Dynamique	plus tard	Terrain
	Teneur en eau	Dynamique	dès la livraison	Laboratoire
	Traces / signes d'érosion	Dynamique	plus tard	Terrain

	pH	Stable	dès la livraison	Terrain ou labo
--	----	--------	------------------	-----------------



Pour aller plus loin :

- **Connaître, choisir et étudier les indicateurs de qualité des sols, projet INDIQUASOL :**

Cousin I. (coord.), Desrousseaux M. (coord.), Angers D. et al. (2025). **Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs**. Rapport d'étude, INRAE (France). 780 pages - DOI [10.17180/qnpx-x742](https://doi.org/10.17180/qnpx-x742)

Cousin I. (coord.), Desrousseaux M. (coord.), Leenhardt S. (coord.) et al. (2024). **Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs**. Synthèse du rapport d'étude, INRAE (France). 126 p. DOI [10.17180/k4j0-m162](https://doi.org/10.17180/k4j0-m162) - Version feuilletable [ici](#)

Cousin I., Desrousseaux M. et Leenhardt S. (2024). **Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs**. Résumé du rapport d'étude. INRAE (France). 10 p. DOI [10.17180/h37a-4n09](https://doi.org/10.17180/h37a-4n09) - [Résumé IndiQuaSolspdf - 4.84 MB](#)

- **Les bio-indicateurs de l'état des sols, principes et exemples d'utilisation – ADEME** ([Bio-indicateurs.pdf](#))
- **Aide à la décision pour la gestion et valorisation des sols dans un projet :** [DESTISOL : Les sols, une opportunité pour un aménagement urbain durable - La librairie ADEME](#)
- **Analyse des bioindicateurs :** [Guide d'interprétation Microbioterre](#)
- **Vincent Q., Blanchart A** (2023) Faciliter le transfert des résultats de la recherche en outils opérationnels - Thématique de la multifonctionnalité des sols. 97 pages. [Bilan de la recherche sur la multifonctionnalité des sols](#)

III.2 Assurer le maintien et la gestion des fonctions du sol

Après livraison des sols refunctionalisés, il convient d'adapter les modes de gestion pour assurer un maintien et/ou une amélioration continue de leurs fonctions. L'application d'une gestion écologique est alors indispensable pour assurer une recolonisation spontanée efficace par les organismes du sol et la végétation surplombante.

- **Gestion de la matière organique :**

- Privilégier les apports de compost mûr, de broyat de végétaux ou de fumier, en adaptant les quantités aux besoins du sol et des plantes.
- Eviter les sols à nu en favorisant le recouvrement par le végétal, tolérer la flore spontanée (tout en restant vigilant concernant la flore envahissante – voir 2.2.4). Si l'usage ne permet pas le maintien d'un couvert végétal, il est possible de pratiquer le paillage avec des matériaux organiques variés (feuilles mortes, paille, etc.) pour protéger le sol, maintenir l'humidité et favoriser la décomposition.
- Mettre en place des techniques de compostage sur site pour valoriser les déchets organiques. Le compost peut être utilisé dans les massifs d'ornement, en pieds de haie ou encore dans les espaces d'agriculture urbaine. Néanmoins les habitats de type prairie ne doivent pas faire l'objet d'amendement ou fertilisation (voir partie 2.4.2)

- **Préservation de la biodiversité du sol :**

- Proscrire l'utilisation de pesticides et d'engrais chimiques de synthèse, qui perturbent les équilibres biologiques du sol.
- Favoriser la présence d'organismes du sol tels que les vers de terre, les insectes et les micro-organismes en maintenant une couverture végétale diversifiée et en adoptant une gestion douce des sols.
- Installer des refuges pour la faune auxiliaire (tas de bois mort, pierrier, feuilles mortes, tas de sable, etc.).
- Favoriser les continuités entre les sols du site et les sols fonctionnels attenants. Installer au besoin des lombriducs – petit ouvrage constitué de sol fonctionnel permettant aux vers de terres (et autres organismes du sol) de traverser un obstacle (route, cheminement stabilisé, clôture, etc.)



Figure 36 : Lombriduc installé à Nancy sur un sol stabilisé ©L'Est Républicain

- **Gestion de l'eau :**

- Améliorer la capacité de rétention en eau du sol par des apports de matière organique et des techniques de travail du sol adaptées.
- Mettre en place des systèmes de récupération d'eau de pluie pour l'arrosage, voire d'eau grise si le projet le permet.
- Adapter les techniques d'arrosage aux besoins des plantes et aux conditions climatiques. Privilégier des pratiques d'arrosage au goutte à goutte, voire des systèmes innovants intégrés.

- **Travail du sol :**

- Limiter le travail du sol, en privilégiant les techniques de travail superficiel ou de non-travail du sol.
- Utiliser des outils de travail du sol adaptés pour ne pas perturber la structure du sol.
- Éviter le tassement du sol en limitant le passage d'engins lourds, en restreignant les circulations sur certaines zones précises (notamment sur les sites avec une forte affluence)



Pour aller plus loin :

- **Labelliser la gestion de son site :** [Label Ecojardin](#) - Plante & Cité, [BiodiverCity Life](#) - CIBI
- **Approfondir le sujet de la gestion écologique :** [Guide de gestion écologique des espaces collectifs publics et privés](#) - ARB

Bibliographie

- ADEME, *Démarche Triade : guide technique d'application* (2025)
- ADEME, *Méthodologies d'évaluation des fonctions et services écosystémiques rendus par les sols* (2019)
- AFES, *Pédogénèse (formation du sol)*, France, 2023
- AFES, *Définition et enjeux* (2018)
- AFES, *Services écosystémiques* (2023)
- AFES, *Référentiel Pédologique* (2008)
- BDSolU, *Base de données des analyses de sol urbain* (2025)
- BRGM, *Glossaire*, (2025)
- CNRS, *Les sols anthropisés : des sols encore mal connus mais avec du potentiel* (2022)
- FAO, *World reference base for soil resources* (2014)
- Plante & Cité, *Désimperméabiliser les villes. Guide opérationnel pour (re)découvrir les sols urbains* (2024)
- Philippe Duchaufour, *Pédologie Tome I - Pédogénèse et Classification* (1983)
- Union Professionnelle du Génie Écologique, *Les métiers de la filière du génie écologique* (2024)