



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 213291 - 2772344 - v2.0

24/01/2025

Méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premier rapport d'étape

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : KARR Guillaume - BERT VALERIE

Vérification : LETHIELLEUX LAURENCE; CHARMOILLE ARNAUD

Approbation : Document approuvé le 24/01/2025 par DUPLANTIER STEPHANE

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Nathalie Velly

L'Ineris remercie toutes les personnes interviewées pour avoir pris le temps de l'échange et pour avoir partagé leurs avis et retours d'expériences.

Table des matières

1	Introduction : contexte et objectifs	6
2	Étude des pratiques existantes	6
2.1	Réalisation d'entretiens	6
2.2	Analyse des entretiens réalisés	9
2.3	Principales conclusions issues des entretiens réalisés	21
3	Définition de termes clés	23
3.1	Renaturation : définitions législative et réglementaire	23
3.2	Sol.....	23
3.3	Désartificialisation.....	25
3.4	Restauration	26
3.5	Amélioration de la fonctionnalité des sols	28
3.6	Désimperméabilisation	33
3.7	Habitats pour les écosystèmes.....	34
3.8	Renaturation	37
4	Démarche méthodologique : premières propositions	44
4.1	Déroulé des principales étapes de la méthode	46
4.2	Milieu écologique type (MET)	53
4.3	Environnement local de référence (ELR)	54
4.4	Indicateurs de suivi	55
4.5	Interventions	57
4.6	Interactions avec les populations riveraines	59
4.7	Usage de renaturation et Plan de gestion	64
5	Typologie d'aménagements pour l'usage de renaturation.....	68
6	Développer l'usage de renaturation en France	72
6.1	Arguments en faveur du choix de l'usage de renaturation	72
6.2	Pistes pour rendre l'usage de renaturation plus attractif	77
7	Aspects à développer par la suite - quelques propositions	79
8	Conclusion.....	82
9	Acronymes.....	83
10	Références	85
11	Annexes.....	98

Résumé

Suite à la parution du décret n°2022-1588 relatif à la définition des types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués, et dans le cadre de ses missions d'appui technique auprès du ministère chargé de l'Écologie, l'Ineris a publié un guide¹ visant à préciser les caractéristiques des différents types d'usages retenus par la réglementation. Concernant l'usage de renaturation, ce guide précise qu'« *un document spécifique fournissant des outils pour atteindre un niveau de réhabilitation compatible avec cet usage est nécessaire* ». Le présent rapport constitue ce document spécifique.

Afin d'accompagner la mise en œuvre de l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués, ce rapport présente :

- une collecte et une analyse de retours d'expériences, issus de projets de terrain en lien avec la renaturation, en cours ou achevés, réalisés en France et hors contexte de recherche. Ces retours d'expériences ont été collectés sous la forme d'interviews de chefs de projets issus de différents types d'organismes. Par exemple : bureaux d'études spécialisés dans la gestion des sites et sols pollués, dans le paysage, dans l'aménagement des territoires, etc.
- une étude bibliographique visant à préciser la définition réglementaire de l'usage de renaturation ;
- une proposition de démarche méthodologique pour mener à bien un usage de renaturation. Cette démarche a été élaborée à partir de l'analyse des retours d'expériences collectés et des travaux de définition réalisés, ainsi que sur la base des résultats disponibles dans la littérature scientifique et technique.

Cette démarche inclut trois étapes clés :

- 1) choisir le milieu écologique type (MET) visé, selon une liste de référence telle que la typologie EUNIS (*European Nature Information System*), correspondant à un gain écologique pour le site considéré, en cohérence avec son contexte pédo-bioclimatique, et en tenant compte des besoins des différentes parties prenantes impliquées (gestionnaire du site, riverains, élus locaux, etc.) ;
- 2) sélectionner des indicateurs de suivi, au regard des principales caractéristiques d'intérêt du MET visé et de manière proportionnée aux enjeux ;
- 3) identifier un environnement local de référence (ELR), c'est-à-dire une déclinaison locale du MET visé, puis y mesurer les indicateurs de suivi sélectionnés : les résultats obtenus constituent alors l'objectif de la renaturation.

L'usage de renaturation est considéré comme réussi lorsque le site atteint un état résilient et se trouvant sur une trajectoire menant à l'ELR.

En complément, dans le cas particulier où des écosystèmes d'intérêt seraient initialement présents sur le site, l'usage de renaturation peut se limiter à des actions de conservation et de suivi.

Cette démarche constitue une approche générale qui peut s'adapter à tous types de sites, de contextes et d'objectifs spécifiques, permettant de mettre en cohérence les projets de renaturation et de les inscrire dans la logique du plan de gestion².

En complément, le présent rapport traite des différents types d'interactions possibles avec les populations riveraines, et notamment de l'opportunité de permettre un accès aux sites où un usage de renaturation a été retenu.

¹ Ineris. Guide sur les types d'usages définis dans le cadre des cessations d'activité des installations classées pour la protection de l'environnement et de projets d'aménagement. 2023. Réf. Ineris - 213282 - 2759342 - v3.0. <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-213282-2759342-Typologie%20d%27usage%20SSP%20v3.pdf>

² Direction générale de la Prévention des Risques (DGPR) - Bureau du Sol et du Sous-Sol. Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. Ministère chargé de l'Écologie, 2017. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites-et-sols-pollues#scroll-nav> 2

Abstract

Following the publication of Decree no. 2022-1588 on the definition of types of usage in the management of polluted sites and soils, and as part of its technical support mission for the French Ministry of Ecology, Ineris published a guide aimed at specifying the characteristics of the various types of usage retained. With regard to the “renaturation usage” (i.e., ecological restoration usage), this guide indicates that “*a specific document providing tools to achieve a level of rehabilitation compatible with this usage is required*”. The present report constitutes this specific document.

In order to guide the implementation of renaturation operations in the management of polluted sites and soils, this report presents:

- a phase of collecting and analyzing feedback from current and completed projects, both in France and outside the research context.

This feedback took the form of interviews with project managers from various types of organizations. For example: consultancies specializing in the management of polluted sites and soils, landscaping, regional planning, etc.

- a bibliographical study aimed at detailing the content of the regulatory definition of renaturation.
- a proposed methodological approach to carrying out a renaturation project.

This approach has been developed on the basis of the realized analysis of experience feedback and definition work, as well as on the results available in the scientific and technical literature.

The approach includes three key stages:

- 1) Choosing the targeted Standard Ecological Habitat (SEH), among a reference list such as the European Nature Information System (EUNIS) typology, corresponding to an ecological gain for the site considered, consistent with its soil-bioclimatic context, and taking into account the needs of the different stakeholders involved (site manager, local residents, elected representatives, etc.).
- 2) Selecting monitoring indicators, based on the SEH's characteristics of interest and in proportion to the issues at stake.
- 3) Identifying a Local Reference Habitat (LRH), i.e., a local variation of the targeted SEH, and then carry out measurements corresponding to the selected monitoring indicators: the results obtained constitute the renaturation objective.

Renaturation usage is considered successful when the site reaches a self-sustaining, resilient state and is on a trajectory leading to the LRH.

Moreover, in the particular case where ecosystems of interest were initially present on the site, renaturation may just consist of conservation and monitoring actions.

This is a general approach that can be adapted to all types of sites, contexts and specific objectives, enabling renaturation projects to be coherent and consistent with the Management Plan.

In addition, this report deals with the various types of possible interactions with the local population, and in particular with the opportunity of allowing access to the sites where a renaturation use has been selected.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premier rapport d'étape, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 213291 - v2.0, 24/01/2025.

Mots-clés :

Usage de renaturation ; gestion des sites et sols pollués ; restauration écologique ; désartificialisation ; refonctionnalisation

1 Introduction : contexte et objectifs

En 2022, dans le cadre de sa mission d'appui technique auprès du ministère chargé de l'Écologie, l'Ineris a accompagné le Bureau du sol et du sous-sol (B3S) dans la rédaction du décret n°2022-1588, relatif à la définition des types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués [1].

Faisant suite à la publication de ce décret, l'Ineris a publié un guide [2] visant notamment à apporter des précisions sur les différents types d'usages retenus. Les « enjeux liés à la protection des ressources naturelles (faune et flore) et à la biodiversité » n'y ont pas été traités car, « conformément à la méthodologie de gestion des sites et sols pollués, ces enjeux doivent faire l'objet d'une analyse spécifique. Pour conduire cette analyse, notamment pour encadrer l'usage de renaturation, un document spécifique fournissant des outils pour atteindre un niveau de réhabilitation compatible avec cet usage est nécessaire » [2]. Dans ce contexte, l'Ineris a proposé au B3S d'élaborer un document complémentaire au guide [3].

Le présent rapport constitue ce document complémentaire.

Il vise deux objectifs :

- réaliser une collecte de retours d'expériences issus de projets finalisés ou en cours de réalisation, en France, hors contexte de la recherche et dont les contenus pourraient correspondre à l'usage de renaturation ;
- proposer de premiers éléments pour une méthodologie nationale visant à encadrer l'usage de renaturation, sur la base des retours d'expériences collectés et des connaissances disponibles dans la littérature scientifique et technique.

2 Étude des pratiques existantes

2.1 Réalisation d'entretiens

Afin d'élaborer de premiers éléments de méthodologie pour l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sol pollués, l'Ineris a souhaité pouvoir s'appuyer sur les retours d'expérience de projets concrets, réalisés en France et en lien avec l'usage de renaturation, hors du cadre de la recherche, finalisés ou en cours. Dans cet objectif, l'Ineris a mené 13 entretiens avec des chefs de projets issus de différents types de structure. Par exemple : bureau d'études spécialisés dans la gestion des sites et sols pollués (SSP), dans le paysage, dans l'aménagement des territoires, etc. (Tableau 1)

Tableau 1 : Personnes interviewées et organismes associés

Organisme		Personnes interviewées	Fonction	Bureau d'études spécialisé en sites et sols pollués ?
Type	Nom			
Bureau d'études et d'ingénierie en phytomanagement et restauration des SSP	Microhumus	Gaylord Erwan Machinet (avec Alexandre Perlein)	Directeur technique	BE non SSP
Bureau d'études notamment spécialisé en SSP	TAUW France	Sébastien Kaskassian (avec Alexiane Godain et Julie Estival)	Expert SSP	BE SSP
Bureau d'études notamment spécialisé en SSP	SEMAGO Environnement	Philippe Oudin	Gérant, fondateur	BE SSP
Bureau d'études notamment spécialisé en régénération et refunctionalisation des sols	Soltis environnement	Florence Baptist	Dirigeante, fondatrice	BE non SSP
Start-up spécialisée en aménagement du territoire et en sciences du sol	Sol &co ³	Quentin Vincent	Directeur Scientifique, co-fondateur	BE non SSP
Bureau d'études notamment spécialisé en paysage et en agro-pédologie	Sol Paysage	Xavier Marié	Directeur, gérant	BE non SSP
Entreprise de valorisation agroécologique des terres de chantiers vers l'agriculture	Terra Innova	Julien Laurette	Ingénieur de recherche	BE non SSP
Bureau d'études notamment spécialisé en SSP et en réhabilitation de sols	TESORA	Benjamin Pauget	Responsable recherche et développement	BE SSP
Start-up spécialisée en réhabilitation de sols utilisant des microorganismes	Fertil'Innov Environnement	Souhir Soussou	Présidente	BE non SSP
Institut de recherche et de formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement	IFPEN - Institut Français du Pétrole Energie Nouvelles	Violaine Lamoureux-Var (avec Maira Alves, David Sebag, et Isabelle Kowalewski)	Ingénieure de recherche	BE non SSP

³ À la date de l'interview, le 19 septembre 2023 ; structure en cours d'évolution.

Organisme		Personnes interviewées	Fonction	Bureau d'études spécialisé en sites et sols pollués ?
Type	Nom			
Bureau d'études notamment spécialisé en biodiversité ⁴ des sols	Novasol Experts	Battle Karimi	Directrice scientifique	BE non SSP
Bureau d'études notamment spécialisé en ingénierie écologique	Écosphère	Cécile Larivière	Responsable pôle ingénierie écologique	BE non SSP
Start-up spécialisée en création d'écosystèmes forestiers	Treeseve (ex TreesEverywhere)	Olivier de Montety Sophie Grenier	Co-fondateurs	BE non SSP

Les entretiens ont été réalisés selon une trame systématique, incluant notamment les questions suivantes :

- Comment définissez-vous la « renaturation » ? Comment comprenez-vous la définition indiquée dans le décret n°2022-1588 ?
- Comment vos clients comprennent-ils cette notion ? À ce stade, sont-ils généralement déjà bien informés et demandeurs, ou bien est-ce plutôt vous qui êtes proactifs sur ces aspects ?
- Pourriez-vous nous décrire un ou plusieurs projet(s) que vous avez mené(s) et incluant de la renaturation ?
Pour les aspects techniques, les aspects d'intérêt incluent les techniques, les indicateurs et les objectifs (« référentiel ») retenus.
- Dans quel cadre s'inscrivent vos projets incluant de la renaturation ? Par exemple : compensation, zéro artificialisation net (ZAN), contribution à la construction de trames écologiques, etc.
- Dans vos projets, comment s'articulent les aspects sanitaires avec l'usage de renaturation ?
- D'après-vous, qu'est-ce qui pourrait favoriser la réalisation de projets de renaturation ?

Les comptes-rendus de l'ensemble des entretiens réalisés sont fournis en Annexe 1.

⁴ D'après l'Office français de la biodiversité (OFB), « la biodiversité désigne l'ensemble des êtres vivants ainsi que les écosystèmes dans lesquels ils vivent. Ce terme comprend également les interactions des espèces entre elles et avec leurs milieux » [4].

2.2 Analyse des entretiens réalisés

Le contenu de chaque entretien a été analysé (Annexe 1) en utilisant une démarche qui s'appuie sur l'identification de « forces », de « faiblesses », d'« opportunités » et de « verrous à lever » (traduction inspirée de l'anglais *Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats – SWOT* [5]) liés à l'usage de renaturation et tels que perçus par les interviewés.

Sur la base des analyses SWOT effectuées, le Tableau 2, le Tableau 3, le Tableau 4 et le Tableau 5 présentent une synthèse de l'ensemble des informations obtenues. Ces autres tableaux décrivent respectivement les quatre composantes de la logique SWOT selon différents critères : économique, réglementaire, technique, social/sociétal, environnemental, sanitaire.

Pour faciliter la lecture du tableau, les aspects cités au moins cinq fois sont **en bleu foncé** et les aspects cités au moins trois fois sont **en bleu clair**. Les aspects cités moins de trois fois sont laissés en blanc.

Tableau 2 : Forces associées à l'usage de renaturation (analyse SWOT)

Critère	Force	Type de répondant (+ nombre associé)	Nombre de répondants (/13)
Economique	Dans certains cas, la renaturation consiste à ne (presque) rien faire, ce qui est (bien pratique et) peu coûteux.	BE SSP (2) BE non SSP (3)	5
	Les techniques basées sur le vivant sont moins coûteuses que les techniques classiques de gestion des sites et sols pollués, et peuvent parfois suffire à répondre aux besoins des gestionnaires.	BE SSP (1) BE non SSP (2)	3
	Même s'il n'y a pas d'obligation réglementaire de renaturation, ce sujet intéresse de nombreux acteurs, y compris des grandes entreprises (par exemple pour des raisons de communication interne et externe).	BE non SSP (2)	2
	La séquence ERC, au sein des études d'impact, incite au développement d'actions de renaturation.	BE SSP (1)	1
	Au niveau de la zone où se trouve le site, des opérations de renaturation peuvent être un moyen d'en augmenter la valeur foncière, ainsi que de rendre cette zone plus attractive pour les populations.	BE non SSP (1)	1
Social/sociétal	Une zone sanctuarisée pour la nature, même avec des sols présentant des concentrations inacceptables pour une fréquentation humaine, pourrait être ouverte au public de manière simple, via un sentier pédestre basé sur un matériau non pollué.	BE SSP (3) BE non SSP (1)	4
	Certaines collectivités ont des objectifs avant tout environnementaux, incluant des projets de renaturation, lorsque la pollution du sol est jugée assez faible.	BE non SSP (3)	3
	Les projets de renaturation peuvent s'accompagner d'opérations de sensibilisation du grand public, portant sur les milieux écologiques en présence ou ceux recréés.	BE SSP (1) BE non SSP (1)	2
	Un engouement pour les projets de désimperméabilisation peut être observé actuellement.	BE non SSP (1)	1

Critère	Force	Type de répondant (+ nombre associé)	Nombre de répondants (/13)
Environnemental	Une zone sanctuarisée pour la nature présente une forte valeur ajoutée potentielle pour la biodiversité, d'autant plus si elle est inaccessible au public.	BE SSP (1)	1
	Le décret n°2022-1588 indique une définition de l'usage de renaturation qui est centrée sur la nature, et non centrée sur l'Humain. La nature ne se réduit pas à la fourniture de services répondant à des besoins sociétaux.	BE non SSP (1)	1
	La renaturation est une technique qui favorise l'obtention de résultats pérennes, car elle vise à s'adapter aux spécificités du site considéré.	BE non SSP (1)	1
	Un sol pollué non recouvert est souvent un sol vivant, présentant des espèces et une fonctionnalité significative.	BE non SSP (1)	1
	Le décret n°2022-1588 incite les gestionnaires publics et les clients privés à considérer l'usage de renaturation parmi les potentielles priorités, avant les techniques de gestion conventionnelles, notamment avant celles qui ne permettent pas de conserver la vie présente dans le sol.	BE non SSP (1)	1
Sanitaire	Les zones de nature sont associées à de nombreux co-bénéfices pour la santé des personnes les fréquentant. Par exemple : îlots de fraîcheur, favorisation de l'activité physique.	BE SSP (1)	1
Technique	Les phytotechnologies font déjà partie des actions possibles de renaturation.	BE SSP (1) BE non SSP (4)	5
	Des indicateurs caractérisant les espèces de surface peuvent être utiles pour caractériser indirectement l'état du sol.	BE non SSP (4)	4
	Les techniques basées sur le vivant sont aujourd'hui plus utilisées par les bureaux d'études que par le passé. Il y a eu une prise de conscience.	BE SSP (1) BE non SSP (1)	2

Critère	Force	Type de répondant (+ nombre associé)	Nombre de répondants (/13)
	Il existe quelques référentiels génériques, par exemple pour les fonctions d'infiltration d'eau ou de stockage du carbone, ou pour les aspects agronomiques.	BE non SSP (2)	2
	Les clients visant un projet de renaturation sont généralement conscients du côté assez expérimental de la démarche, qu'il est souvent difficile de garantir un résultat en amont des projets.	BE non SSP (2)	2
	Les actions de refunctionalisation peuvent être intégrées aux actions de dépollution de sols et y contribuer.	BE SSP (1)	1
	Les actions de maîtrise du développement des espèces invasives (obligation pour les aménageurs) peuvent être considérées comme s'intégrant dans une logique de renaturation.	BE SSP (1)	1

Tableau 3 : Faiblesses associées à l'usage de renaturation (analyse SWOT)

Critère	Faiblesse	Type de répondant (+ nombre associé)	Nombre de répondants (/13)
Économique	À ce stade, le marché est de faible ampleur. Les clients sont rarement demandeurs de renaturation.	BE SSP (2) BE non SSP (1)	3
	Le suivi d'un projet de renaturation porte sur plusieurs années.	BE SSP (1) BE non SSP (2)	3
	Dans un contexte de restriction budgétaire, les projets de renaturation ne font partie des priorités des acteurs de la gestion des sols.	BE non SSP (1)	1
	Au niveau des entreprises, il n'y a pas d'incitation comptable ou fiscale en faveur de projets de renaturation.	BE non SSP (1)	1
	À ce stade, les phytotechnologies sont encore peu choisies par les clients pour la gestion des sites et sols pollués, avec diverses raisons : la pollution reste sur place, les temps de dépollution sont jugés trop grands, etc.	BE SSP (1)	1
Réglementaire	Il n'existe pas d'obligation réglementaire à renaturer.	BE non SSP (3)	3
	Le décret n°2022-1588 associe la renaturation à des actions humaines visant à améliorer l'état du sol. Le « laisser faire » ne semble pas être une option.	BE SSP (1)	1
	La définition du décret n°2022-1588 inclut la restauration d'habitats. Mais uniquement restaurer des habitats ne suffit pas : il faut faire en sorte que des espèces s'y réinstallent, et suivre ce processus.	BE non SSP (1)	1
	Il n'y a pas d'espèce protégée dans la faune du sol.	BE non SSP (1)	1
	Le décret n°2022-1588 permet de considérer une action de désimperméabilisation comme de la renaturation, alors qu'il s'agit d'une étape nécessaire mais non suffisante.	BE SSP (1)	1

Critère	Faiblesse	Type de répondant (+ nombre associé)	Nombre de répondants (/13)
Technique	Il existe peu de référentiels permettant de servir d'objectifs pour les activités de renaturation et d'interpréter les résultats des indicateurs suivis.	BE non SSP (3)	3
	Il existe trop peu de retours d'expériences formalisés de projets de renaturation, qui permettraient de mieux identifier les actions qui fonctionnent bien. À ce stade, de nombreuses démarches restent assez exploratoires.	BE non SSP (3)	3
	La définition de renaturation est ambiguë et peut varier selon les acteurs.	BE non SSP (3)	3
	Reconstituer un sol est une opération complexe, qui nécessite la contribution de divers types d'experts. Par exemple : écologue, pédologue, SSP, paysagiste.	BE SSP (1) BE non SSP (1)	2
	Dans les projets de renaturation, l'attention au sol est une thématique assez nouvelle.	BE non SSP (1)	1
Environnemental	Dans les projets de renaturation actuels, les espèces qui ne sont pas protégées réglementairement ne sont pas prises en compte.	BE non SSP (1)	1
	Dans les projets de renaturation actuels, la santé d'un sol est souvent réduite à sa fertilité.	BE non SSP (1)	1

Tableau 4 : Opportunités associées à l'usage de renaturation (analyse SWOT)

Critère	Opportunité	Type de répondant (+ nombre associé)	Nombre de répondants (/13)
Technique	Des sols fonctionnels peuvent être recréés en utilisant certains matériaux issus du site ou de zones urbaines.	BE SSP (1) BE non SSP (4)	5
	Le développement de réseaux d'experts pluridisciplinaires permettrait de pouvoir monter plus facilement des équipes aux compétences transversales pour monter des projets de renaturation (complexes et pluridisciplinaires par essence).	BE SSP (3) BE non SSP (2)	5
	Il pourrait être intéressant d'identifier un socle de base d'indicateurs pour les projets de renaturation, une sélection réduite d'indicateurs assez transversaux. Les indicateurs complémentaires seraient spécifiques au site et aux objectifs fixés pour le projet de renaturation.	BE SSP (1) BE non SSP (2)	3
	Augmenter les activités de suivi permettrait de pouvoir capitaliser des retours d'expériences, ce qui est essentiel pour comprendre les systèmes complexes recréés.	BE SSP (1) BE non SSP (2)	3
	Certains indicateurs simples peuvent déjà être bien utiles. Par exemple : Turn-over de matière organique (indicateur indirect de fonctionnalité globale / dégradation de la matière organique)	BE SSP (1)	1
	Les outils permettant de caractériser la qualité (micro)biologique des sols sont aujourd'hui davantage disponibles, robustes et opérationnels.	BE non SSP (1)	1
	La prise en compte des aspects environnementaux pourrait être renforcée dans la méthodologie de gestion des sites et sols pollués.	BE SSP (1)	1
	À défaut d'environnement local pour servir d'objectif à la renaturation (on peut parler d'« environnement local de référence » (section 4.3) pour à la fois faire écho et le différencier de l'environnement local témoin (ELT) utilisé en gestion des sites et sols	BE non SSP (1)	1

Critère	Opportunité	Type de répondant (+ nombre associé)	Nombre de répondants (/13)
	pollués), les référentiels s'appuyant sur les bases de données de laboratoire d'analyses pourraient constituer une alternative intéressante à approfondir.		
Social / sociétal	Les projets de renaturation peuvent s'inscrire dans la logique Une seule santé (« One Health »)	BE SSP (2) BE non SSP (2)	4
	L'usage de renaturation pourrait permettre de sensibiliser les maîtres d'ouvrage, les collectivités et les autorités locales au fait que le sol n'est pas qu'un support géotechnique - c'est aussi un support biologique - et qu'il peut y avoir des écosystèmes intéressants sur des sites contaminés.	BE SSP (2) BE non SSP (1)	3
	Les projets de renaturation devraient pouvoir être favorisés lorsqu'ils contribuent à l'adaptation au changement climatique (synergie vertueuse entre deux enjeux phares de notre époque).	BE SSP (1) BE non SSP (1)	2
	Les enjeux sociétaux, climatiques et liés à la biodiversité devraient être pris en compte par les acteurs de l'aménagement du territoire, comme les enjeux économiques.	BE non SSP (2)	2
	Certaines collectivités ont des démarches de retour de la nature en ville, et plus généralement, sur leur territoire.	BE SSP (2)	2
	En milieu urbain, il est important que le public puisse avoir accès au site renaturé, ce qui favoriserait la promotion de l'usage de renaturation.	BE non SSP (1)	1
	Il est techniquement faisable de mesurer les effets bénéfiques des projets de renaturation sur le bien-être des habitants, et cela serait très utile pour favoriser la réalisation de projets de renaturation en ville.	BE non SSP (1)	1
Économique	Grâce à la Directive CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) et ses indicateurs de reporting non financier, la demande d'acteurs privés commence à augmenter.	BE SSP (1)	1

Critère	Opportunité	Type de répondant (+ nombre associé)	Nombre de répondants (/13)
	Mesurer les bénéfices des services écosystémiques créés permettrait de mieux valoriser les projets de renaturation dans les bilans coûts-avantages servant à comparer les différentes solutions techniques envisagées sur un site.	BE non SSP (1)	1
	S'inscrire dans la séquence ERC peut augmenter l'aspect attractif d'un projet de renaturation.	BE non SSP (1)	1
Environnemental	Les projets de renaturation pourraient contribuer au développement des trames vertes et brunes, et ainsi s'inscrire dans les dynamiques associées.	BE non SSP (1)	1
	La notion de renaturation présuppose une intention écologique : une démarche de renaturation gagnerait donc à intégrer des écologues.	BE non SSP (1)	1
	Proposer un objectif en termes de milieu écologique, plutôt qu'en termes d'espèces à planter, peut générer un plus grand attrait pour les aménageurs.	BE non SSP (1)	1
	Les fonctions considérées pour les sols pourraient inclure la fonction « rétention de polluants ».	BE non SSP (1)	1
Réglementaire	Une augmentation des obligations réglementaires visant à favoriser la biodiversité (pas seulement un nombre réduit d'espèces protégées) permettrait de favoriser la réalisation de projets de renaturation.	BE SSP (1) BE non SSP (2)	3
	Les démarches ZAN et la séquence ERC sont des cadres qui devraient favoriser l'augmentation des projets de renaturation.	BE non SSP (1)	1

Tableau 5 : Verrous à lever associés à l'usage de renaturation (analyse SWOT)

Critère	Verrou à lever	Type de répondant (+ nombre associé)	Nombre de répondants (/13)
Réglementaire	Laisser une pollution dans un sol pour ne pas détruire les écosystèmes présents est une démarche qui pose des problèmes de responsabilité.	BE SSP (1) BE non SSP (1)	2
	Les projets d'agriculture devraient être inclus dans le périmètre réglementaire de la renaturation.	BE SSP (1)	1
Technique	Il y a un manque de référentiels. Par exemple : méthode de référence pour caractériser la biodiversité d'un sol, référentiel d'indicateurs standardisé pour homogénéiser les pratiques, référentiel permettant d'interpréter les indicateurs retenus par type de milieux, référentiels pouvant constituer des objectifs pour des projets de renaturation.	BE SSP (3) BE non SSP (5)	8
	Les différents acteurs de la gestion des sols devraient être sensibilisés aux enjeux liés à la renaturation.	BE SSP (1) BE non SSP (5)	6
	Les projets de renaturation devraient inclure la contribution d'écologues.	BE non SSP (1)	1
	Le terme renaturation aurait besoin d'être défini précisément, notamment pour le différentier du concept de restauration.	BE non SSP (1)	1
	Les outils permettant de caractériser la qualité (micro)biologique des sols restent peu connus des acteurs des domaines des SSP et de l'aménagement urbain.	BE non SSP (1)	1
Économique	Les fonctions du sol et les services écosystémiques devraient être pris en compte dans le bilan coûts-avantages des projets.	BE SSP (3) BE non SSP (3)	6
	D'une manière générale, les analyses nécessaires sont assez coûteuses et proposées par un nombre réduit de laboratoires, ce qui rend les projets de renaturation peu abordables pour de nombreux acteurs.	BE SSP (2) BE non SSP (2)	4

Critère	Verrou à lever	Type de répondant (+ nombre associé)	Nombre de répondants (/13)
	L'intérêt financier à renaturer en ville est faible. Le prix d'une surface valorisée avec de la nature est bien inférieur au prix d'une même surface construite.	BE SSP (1) BE non SSP (2)	3
	À ce stade, les contextes de ZAN (Zéro Artificialisation Nette) et de compensation conduisent à peu de projets de renaturation.	BE non SSP (3)	3
	Dans les zones avec une forte pression foncière, la renaturation ne fait pas partie des priorités.	BE SSP (1) BE non SSP (1)	2
	Si des agriculteurs changent leurs pratiques de manière à créer de nouveaux services écosystémiques, des subventions pourraient leur être attribuées, notamment pour les rassurer quant aux risques de la démarche (ex : perte de rendement la première année).	BE SSP (1)	1
	Le coût des essais et analyses ont besoin de diminuer pour devenir abordables par plus d'acteurs, notamment en augmentant le nombre de laboratoires prestataires.	BE SSP (1)	1
	En France, les mécanismes de compensation carbone sont assez inadaptés aux besoins des entreprises, et en plus, ils sont orientés vers les forêts de production de bois, et non sur les forêts s'inscrivant dans une démarche de renaturation.	BE non SSP (1)	1
Social / Sociétal	Le risque sanitaire reste largement perçu comme prioritaire par rapport au risque environnemental.	BE SSP (3) BE non SSP (3)	6
	Laisser une pollution dans un sol et y mener des actions de renaturation est une démarche qui pose des problèmes d'image, notamment avec des procès d'intention du type « <i>vous avez voulu cacher la pollution sous de la végétation pour ne pas avoir à payer</i> ».	BE SSP (1)	1
	Les acteurs de l'aménagement et les associations de défense de l'environnement ont souvent des intérêts trop divergents.	BE non SSP (1)	1

Critère	Verrou à lever	Type de répondant (+ nombre associé)	Nombre de répondants (/13)
	L'acceptabilité d'un usage de renaturation dans la gestion de SSP a besoin de s'appuyer sur des actions de communication, afin de rassurer les riverains quant aux nuisances auxquelles ils peuvent être exposés.	BE SSP (1)	1

2.3 Principales conclusions issues des entretiens réalisés

Au regard du projet de proposer des premiers éléments de méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation, plusieurs conclusions peuvent être tirées du contenu des entretiens réalisés.

- Besoin de **définir plus précisément** le terme « usage de renaturation »

En particulier, l'ensemble des définitions proposées par les interviewés ont présenté une hétérogénéité significative, par exemple concernant le degré d'intervention humaine, le lien avec la végétalisation, ou encore l'articulation avec la restauration.

La section 3 documente plusieurs propositions visant à répondre à ce besoin de clarification dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués.

- Besoin de **référentiels opérationnels**

Des référentiels sont attendus notamment pour pouvoir répondre aux questions suivantes :

- Avec quelle méthode conduit-on un projet de renaturation dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués ?
- Quels indicateurs de suivi doit-on choisir ?
- Comment interpréter les résultats obtenus avec les indicateurs de suivi choisis ? En particulier, à partir de quand juge-t-on que la renaturation effectuée est « suffisante » ?

La section 4 présente des propositions pour répondre à ces questions.

- **Attrait financier** associé à un usage en **libre évolution**

Parmi les options envisageables pour les usages de renaturation, la libre évolution⁵ présente de nombreux avantages, sur les plans économiques, techniques et environnementaux. Ce type d'usage de renaturation aura donc probablement besoin d'être encadré, afin d'éviter de potentielles dérives, notamment au regard des coûts associés à certaines techniques de dépollution (ex : excavation des terres).

- Intérêt supplémentaire pour les **phytotechnologies**

Dans la gestion des sites et sol pollués, les phytotechnologies présentent de nombreux atouts [6-8]. Par exemple : réduction et stabilisation des pollutions, valorisation de terres polluées *in situ*, évitement de travaux lourds et coûteux, amélioration des fonctions du sol, séquestration de carbone, aménités paysagères, participation à la résilience face au changement climatique, etc.

Les réponses obtenues lors des interviews permettent de souligner deux autres avantages :

- il s'agit de technologies faisant partie du champ de ce nouvel usage de renaturation, et elles sont déjà maîtrisées techniquement par des bureaux d'études ;
- la végétation de surface associée peut renseigner indirectement sur certains aspects du fonctionnement du sol.

En d'autres termes, les phytotechnologies peuvent à la fois être un moyen de renaturer et un moyen de suivre l'évolution de cette renaturation.

- Importance de **considérer la possibilité d'une présence humaine**, même dans le cadre d'un usage de renaturation

⁵ Quelques expressions couramment rencontrées s'y rapportent. Par exemple : « *Clôturer le site et ne rien faire.* », « *Redonner tous ses droits à la nature.* », « *Préserver la nature de la maladie de la gestion.* », etc.

S'inscrivant dans la logique Une seule santé (« One Health »), cet aspect est important notamment pour :

- les élus locaux, dont une des motivations premières est souvent que les populations locales puissent se réapproprier un site anciennement industriel, une fois renaturé ;
- augmenter l'acceptabilité sociale du projet ;
- permettre des opérations de sensibilisation de la population locale aux enjeux liés à la présence de nature, en soi et au regard des services écosystémiques associés.

En particulier, un chemin balisé et constitué de matériaux non pollués, visant à éviter le contact avec le sol, pourrait permettre un accès au public, même en cas de sols sous-jacents présentant des concentrations diffuses en polluants trop fortes pour d'autres usages incluant une fréquentation humaine [2]. En cas de besoin, l'accès à certaines zones du site peut être interdit.

- besoin d'**encadrer les indicateurs à utiliser** et de rendre leurs **coûts plus abordables**

Certains interviewés ont mentionné :

- des études et des outils qui ont visé à proposer des sélections d'indicateurs pertinents (ex : TRIADE [9, 10], RECORD [11]) ;
- que le coût relativement élevé des analyses à effectuer est notamment lié au faible nombre de laboratoires qui les réalisent en routine.

- Importance de considérer la possibilité de réutiliser certains matériaux issus du site ou de sites proches

Ces matériaux peuvent participer à la reconstruction d'un sol fonctionnel, dans une logique de sobriété, d'économie circulaire locale et de « petit cycle des terres ».

- Besoin de développer des **réseaux d'experts pluridisciplinaires**

Ces réseaux permettraient de faciliter la constitution d'une équipe regroupant les compétences utiles pour des projets de renaturation. Par exemple : écologues, pédologues, évaluateurs de risques, aménageurs, naturalistes, spécialistes de la dépollution des sols, etc.

- Besoin de **compléter le bilan coûts-avantages** de la méthodologie des sites et sols pollués

Un usage de renaturation conduit notamment à créer et à augmenter des services écosystémiques, qui peuvent être valorisés d'un point de vue économique et donc figurer dans le bilan coûts-avantages du plan de gestion.

Au regard de certains enjeux clés identifiés avec ces entretiens :

- la section 3 propose des définitions pour chaque terme clé issu de la définition de l'usage de renaturation indiquée dans le décret n°2022-1588 ;
- la section 4 propose de premiers éléments de méthodologie pour l'usage de renaturation dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués, visant notamment à répondre au besoin de référentiels opérationnels et intégrant la possibilité d'une présence humaine.

3 Définition de termes clés

3.1 Renaturation : définitions législative et réglementaire

D'après l'article 192 de la loi n°2021-1104 [12] dite « loi climat et résilience » [13], codifié à l'article 101-2-1 du Code de l'urbanisme, la renaturation d'un sol « *consiste en des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé.* ». En particulier, la renaturation d'un sol y est explicitement présentée comme synonyme de « *désartificialisation* » [12].

Pour mémoire, en application de la Loi climat et résilience, le Décret n°2022-1588 du 19 décembre 2022 définit les types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués. Ces types d'usage incluent « *l'usage de renaturation, impliquant une désartificialisation ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité des sols, notamment des opérations de désimperméabilisation, à des fins de développement d'habitats pour les écosystèmes* » [1].

La présente section 2 vise à préciser ce qu'est l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués, en décrivant les notions associées aux différentes composantes de la définition retenue par le décret ci-dessus : désartificialisation, restauration, amélioration de la fonctionnalité des sols, désimperméabilisation et développement d'habitats pour les écosystèmes. La notion de « sol » est également décrite en préalable.

3.2 Sol

3.2.1 Collecte d'éléments de définition

D'après le glossaire disponible sur le site Infoterre [14], il s'agit de la « *couche supérieure de la croûte terrestre, transformée par des processus climatiques, physico-chimiques et biologiques, et composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes vivants, organisée en horizons génériques. Elle est composée d'un sol de surface et le cas échéant d'un sol profond sous-jacent. Le sol comprend l'ensemble des horizons situés au-dessus du sous-sol* » [14], reprenant la définition de la Norme NF ISO 11074 [15].

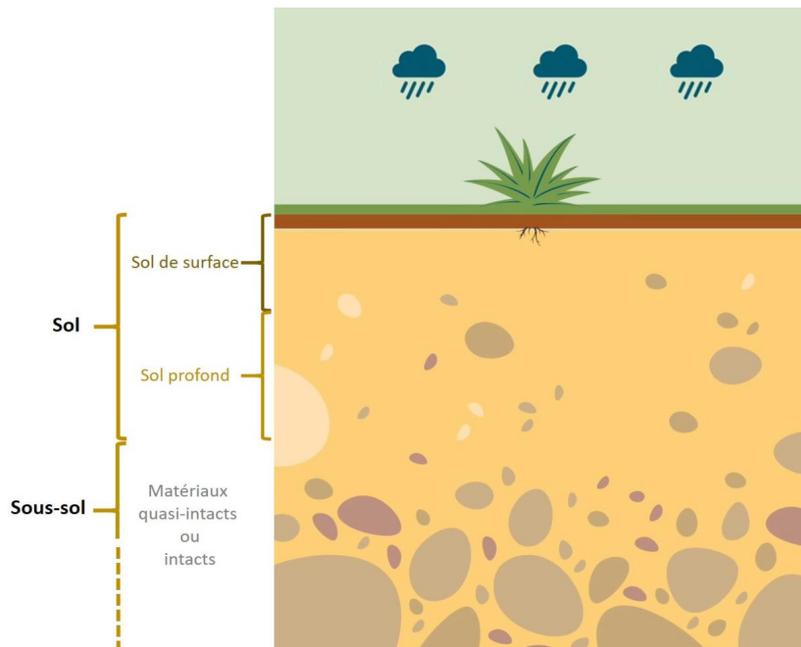


Figure 1 : Schéma simplifié illustrant les notions de sol et sous-sol utilisées en gestion des sites et sols pollués

(Source : Animation Tout comprendre sur les sites et sols pollués - Origine des sols et des eaux souterraines) © Ministère chargé de l'Écologie, BRGM [14]

Dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués [16], certaines propriétés spécifiques du sol sont rappelées : « *Le sol est un milieu poreux, constitué d'une matrice solide et d'interstices dans lesquels les fluides (liquide ou gazeux) peuvent circuler. Les propriétés du sol et du sous sol (porosité, perméabilité, minéralogie, microflore...) contrôlent le comportement des polluants et leur migration. Le pH du sol, sa teneur en matière organique, sa teneur en eau, la présence de bactéries, sont autant de paramètres spécifiques susceptibles d'influencer le comportement des polluants dans le milieu (via notamment des phénomènes de solubilisation, adsorption, biodégradation, volatilisation, bioaccumulation) ainsi que l'importance du transfert notamment vers les gaz du sol, les eaux souterraines, l'air et/ou les végétaux. Il convient de rappeler que dans de nombreux cas, les sols, au droit du site étudié, sont souvent constitués des sols restés en place mais aussi de matériaux d'apports qui ne présentent donc pas les mêmes caractéristiques* ».

D'après l'article 3 de la proposition de directive européenne sur la surveillance des sols [17], le sol est défini comme « *la couche superficielle de la croûte terrestre située entre le substrat rocheux et la surface terrestre, constituée de particules minérales, de matières organiques, d'eau, d'air et d'organismes vivants* ».

D'après l'Association française pour l'étude des sols (AFES), le sol est « *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 pédogenèse. L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus* » [18]. Cette définition est reprise par l'Abécédaire de la renaturation (FNAU, ADEME, OFB) [19].

3.2.2 Définition retenue dans le cadre de ce rapport

Le sol est la couche superficielle de la croûte terrestre, située entre le substrat rocheux et la surface terrestre, transformée par des processus climatiques, physico-chimiques et biologiques, et composée de particules minérales, de matières organiques, d'eau, d'air et d'organismes vivants.

En particulier, la profondeur de sol d'intérêt pour l'usage de renaturation correspond à celle qui peut présenter les propriétés nécessaires pour accueillir la vie.

3.3 Désartificialisation

3.3.1 Collecte d'éléments de définition

Le terme « désartificialisation », en tant que tel, n'est pas présent dans les dictionnaires de français en ligne Le Robert [20] et Larousse [21]. Néanmoins :

- les préfixes dé-/des-/dés- expriment « *la cessation d'un état ou d'une action, ou l'état, l'action inverses* » [21]
- pour « *artificialisation* », le dictionnaire Larousse indique l'idée générique « *Modification du milieu (sol, climat) ou des plantes, provoquée par l'homme* », en la restreignant à un contexte et à un objectif particuliers : « *en vue d'améliorer les conditions d'une production agricole* » [21].

La loi Climat et résilience [12] précise le contenu associé à cette « *modification* » dans le cas d'un sol : « *L'artificialisation est définie comme l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage.* ». Cette définition est reprise par différents types d'organismes publics et privés [19, 22-28]. En parallèle, la désartificialisation « *consiste en des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé* ».

Ces deux dernières notions, « *sol artificialisé* » et « *sol non artificialisé* », sont précisées dans la définition de la notion d'« *artificialisation nette des sols* ». Ainsi, est considérée « *comme : a) Artificialisée une surface dont les sols sont soit imperméabilisés en raison du bâti ou d'un revêtement, soit stabilisés et compactés, soit constitués de matériaux composites ; b) Non artificialisée une surface soit naturelle, nue ou couverte d'eau, soit végétalisée, constituant un habitat naturel ou utilisée à usage de cultures* ». Ces définitions ont été complétées dans un décret d'application [29], qui mentionne une nomenclature classant des « *types d'espaces* » [23] en « *surfaces artificialisées* » ou en « *non-artificialisé* », permettant notamment d'établir des correspondances avec la nomenclature de l'Occupation du sol à grande échelle (OCS GE) [23]. Néanmoins, l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France (ARB ÎdF) fait une recommandation pour l'application de la nomenclature de l'artificialisation des sols : « *il est important de rappeler que tous les espaces de pleine terre, végétalisés ou non, sont précieux en ville et ne doivent pas être considérés comme artificialisés dans les documents d'urbanisme, au risque d'accroître la pression immobilière sur ces derniers* » [28].

De plus, d'après le ministère chargé de l'Écologie [30], l'artificialisation des sols « *consiste à transformer un sol naturel, agricole ou forestier, par des opérations d'aménagement pouvant entraîner une imperméabilisation partielle ou totale, afin de les affecter notamment à des fonctions urbaines ou de transport (habitat, activités, commerces, infrastructures, équipements publics...)* ».

En outre, d'après l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), l'artificialisation « *peut être définie comme l'augmentation de zones artificielles au fil du temps* ». Ces zones artificielles incluent : « *le tissu urbain (continu et discontinu) ; [...] les zones industrielles, commerciales et de transport ; [...] les mines, les décharges et les chantiers de construction ; [...] les zones de végétation artificielle non agricole (parcs de loisirs urbains, installations sportives et de loisirs)* » [31].

Par ailleurs, selon la Mission Économie de la Biodiversité (MEB), « *des sols vivants, en permettant la réalisation des échanges d'eau, d'énergie et de matière, réalisent plusieurs fonctions : production de biomasse, infiltration des eaux, habitats des êtres vivants... L'artificialisation, qui peut prendre plusieurs formes (imperméabilisation, compaction des sols, pollution), a un impact négatif sur ces fonctions, plus ou moins fort et plus ou moins réversible. L'artificialisation joue également un rôle dans l'amplification de certains processus de dégradation des sols comme l'érosion ou les glissements de terrain [...]* ».

L'artificialisation entraîne ainsi une perte de fonctionnalités des sols qui impacte leur capacité à réaliser les services écosystémiques sur lesquels reposent nos sociétés humaines » [25].

Enfin, d'après l'ARB ÎdF, « *l'artificialisation est le résultat du processus d'anthropisation dont le stade ultime est l'imperméabilisation* » [28]. En complément, l'agence précise que « *donner une définition de l'artificialisation s'avère complexe et nécessite de prendre en compte de nombreuses dimensions dont l'état des sols, la biodiversité, le paysage.* »

Compte tenu des différents éléments collectés dans la présente section, une définition est proposée dans la section suivante, pour le cadre du présent rapport méthodologique.

3.3.2 Définition retenue dans le cadre de ce rapport

La désartificialisation désigne des processus qui s'inscrivent dans la dynamique inverse de l'artificialisation.

Ce terme peut également désigner le résultat de ces processus.

L'artificialisation d'un sol (cf. section précédente) désigne l'ensemble des impacts des activités humaines sur ce sol, qui peuvent être de plusieurs types. Notamment :

- chimique. Par exemple : introduction de substances toxiques et écotoxiques ;
- physique. Par exemple : compaction, imperméabilisation, couverture par des matériaux minéraux ;
- biologique et écologique. Par exemple : introduction d'espèces vivantes exotiques envahissantes, modification ou perte d'espèces présentes dans un état précédent du sol.

La désartificialisation d'un sol vise à réduire les impacts sur les fonctions de ce sol et sur les services écosystémiques associés, ce qui peut conduire à une amélioration de la fonctionnalité de ce sol (cf. section 3.5), sans forcément viser un retour à un état antérieur (cf. notion de restauration, décrite à la section 3.4).

3.4 Restauration

3.4.1 Collecte d'éléments de définition

Selon le dictionnaire de français en ligne Le Robert [20], le terme « *restauration* » désigne l'action de restaurer, qui peut signifier :

- « *rétablir en son état ancien ou en sa forme première* » ;
- « *réparer (une œuvre d'art, un monument) en respectant l'état primitif, le style* ; »
- « *restaurer un quartier ancien ; réhabiliter* ».

Selon le dictionnaire de français en ligne Larousse [21], le terme « *restauration* » peut désigner :

- « *remise en état, réfection* » ;
- « *rétablissement, nouvelle vigueur donnée à quelque chose* ».

À l'occasion d'un cycle de webinaires daté de 2023 et intitulé La renaturation en Île-de-France, l'ARB ÎdF indique que la renaturation est « *synonyme de restauration écologique [...] qui se définit comme le fait d'aider un écosystème à se rétablir, après qu'il a été dégradé, endommagé ou détruit par les activités humaines. On parle aussi de ramener un écosystème dans un état proche de ce qu'il était avant une perturbation* » [32], ce qui présuppose que cet état antérieur est connu.

Toujours d'après l'ARB ÎdF [28], l'« *écologie de la restauration* » est une discipline qui « *s'est formalisée au début des années 1980 avec la création de la Society for Ecological Restoration [SER] aux États-*

Unis. Ce corpus de scientifiques définit la restauration écologique comme « le processus visant à assister la régénération des écosystèmes qui ont été dégradés, endommagés ou détruits » en vue de « rétablir l'écosystème antérieur par rapport à sa composition spécifique, son fonctionnement écologique, la capacité de l'environnement physique à supporter les organismes vivants et sa connectivité avec le paysage ambiant » » [33]. Plus récemment, la SER définit « la restauration écologique » comme « le processus qui assiste le rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit » [34], définition reprise par la Stratégie Nationale Biodiversité 2030 [26].

De plus, selon l'Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES - Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques), « la « RESTAURATION » est définie comme toute activité intentionnelle qui amorce ou accélère le rétablissement d'un écosystème à partir d'un état dégradé. Le terme « RÉHABILITATION » est utilisé pour désigner les activités de restauration qui peuvent ne pas complètement rétablir la communauté biotique à son état d'avant dégradation » [35].

Dans son glossaire en ligne, l'IPBES donne des compléments de définition pour le terme restauration : « La restauration active comprend une série d'interventions humaines visant à influencer et à accélérer les processus de succession naturelle afin de rétablir la biodiversité et la fourniture de services écosystémiques. La restauration passive consiste à s'appuyer principalement sur les processus naturels de succession écologique pour restaurer les écosystèmes dégradés, mais peut inclure des mesures visant à protéger un site contre les processus qui empêchent actuellement la régénération naturelle (par exemple, la protection des forêts dégradées contre le surpâturage par le bétail ou les incendies involontaires provoqués par l'homme) » [36].

Également, le Conseil national de recherche américain (NRC, de l'anglais National Research Council) a proposé en 1992 de définir la restauration comme un processus visant « le retour d'un écosystème à un état et des conditions proches de ceux dans lesquels ils se trouvaient avant une perturbation. La structure (composition spécifique) et les fonctions de l'écosystème sont recrées. Le but est de parvenir à un système naturel fonctionnel et capable de s'autoréguler » [37].

En outre, dans son programme d'apprentissage en ligne Learning for Nature [38], le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) définit la restauration des écosystèmes comme le « processus d'inversion de la dégradation des écosystèmes, afin de retrouver leur fonctionnalité écologique et d'améliorer leur productivité et leur capacité à répondre aux besoins de la société ». Cette définition est reprise dans un dossier « Biodiversité et sites pollués », inclus dans un UPDS Mag daté de 2022 [39], publié par l'Union des professionnels de la dépollution des sols (UPDS).

Par ailleurs, dans son guide méthodologique *Intégrer les friches à risque de pollution dans les démarches de planification territoriale*, l'Agence de la transition écologique (ADEME) indique que « les friches à risque de pollution peuvent apporter une contribution positive au territoire, [notamment avec des] rôles possibles [incluant] des zones de restauration de la qualité écologique des milieux naturels ».

En outre, dans la proposition de directive européenne sur la surveillance des sols [17], la restauration est reliée à la notion de « santé du sol » (section 3.8.4) : elle est définie comme une « action intentionnelle visant à ramener les sols d'un état dégradé à un état sain ».

Enfin, d'après les Lignes directrices nationales sur la séquence éviter, réduire et compenser (ERC) les impacts sur les milieux naturels, dans la fiche n°13 intitulée Définir les modalités d'une mesure compensatoire, le terme « Restauration (écologique) ou réhabilitation » désigne des « actions mises en œuvre sur un milieu dégradé et visant à faire évoluer le milieu vers un état plus favorable à son fonctionnement, ou à sa biodiversité. Interventions faisant appel à des travaux (terrassment, travaux hydrauliques, génie écologique, etc.) » [40]. Cette définition est reprise dans le Guide pour l'élaboration d'un site naturel de compensation [41] du ministère chargé de l'Écologie.

Compte tenu des différents éléments collectés dans la présente section, une définition est proposée dans la section suivante, pour le cadre du présent rapport méthodologique.

3.4.2 Définition retenue dans le cadre de ce rapport

La restauration d'un sol désigne des processus visant à rétablir ce sol en un précédent état de référence, à réparer ou à régénérer ce qui a été endommagé ou détruit, à aider le sol à retrouver certaines caractéristiques qui définissent cet état de référence, notamment sa composition (section 3.2) et ses fonctions (section 3.5).

Ce terme peut également désigner le résultat de ces processus.

3.5 Amélioration de la fonctionnalité des sols

3.5.1 Collecte d'éléments de définition

Dans le dictionnaire de français en ligne Le Robert [20], le terme « *fonctionnalité* » est défini comme le « *caractère de ce qui est fonctionnel, pratique* », fonctionnel étant lui-même défini comme « *qui remplit une fonction pratique ; qui est adapté à sa fonction* », fonction étant elle-même définie comme un « *ensemble des propriétés actives concourant à un but* ».

Dans le dictionnaire de français en ligne Larousse [21], le terme « *fonctionnalité* » est défini comme le « *caractère de ce qui est fonctionnel, de ce qui répond à une fonction déterminée* » fonction étant elle-même définie comme un « *rôle joué par un élément dans un ensemble, [...] activité, rôle* ».

Selon le ministère chargé de l'Écologie, dans le rapport de la première phase de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (Efese) [42], la « *fonction d'un écosystème* » désigne la « *capacité d'un écosystème à fournir des biens et des services* ».

Selon le rapport de l'étude TIPOMO pilotée par l'Ineris [43], les « *fonctions écologiques des sols* » désignent des « *phénomènes propres à l'écosystème qui résultent de la combinaison de l'état des écosystèmes, des structures et des processus écologiques et qui se déroulent avec ou sans la présence de l'Homme. Il s'agit notamment des fonctions de base et d'entretien de la fonctionnalité des écosystèmes (cycle des nutriments, formation des sols, production primaire, etc.)* ».

Selon Bispo *et al.* [44], « *le terme « fonction » des sols est polysémique, puisqu'il est utilisé dans le langage courant comme synonyme de rôle mais correspond également aux processus naturels internes au sol, issus des interactions entre les composantes biotiques et abiotiques, tels que par exemple l'infiltration, la biodégradation, etc.* »

Les définitions des notions de « fonctions » et de « services » peuvent également être variables selon les auteurs, et parfois être très proches [45, 46]. Dans ce contexte, Bispo *et al.* précisent les relations suivantes entre processus, fonctions et services (Figure 2) : « *Les écosystèmes et leurs composantes (par ex., les sols présents sur un bassin versant) sont le lieu de processus et de fonctions (l'infiltration de l'eau) qui déterminent les services (la régulation des inondations) et les bénéfices qu'en retirent les humains (recharge des nappes phréatiques, épuration de l'eau, sécurité, absence de dégradation des ouvrages, etc.)*. »

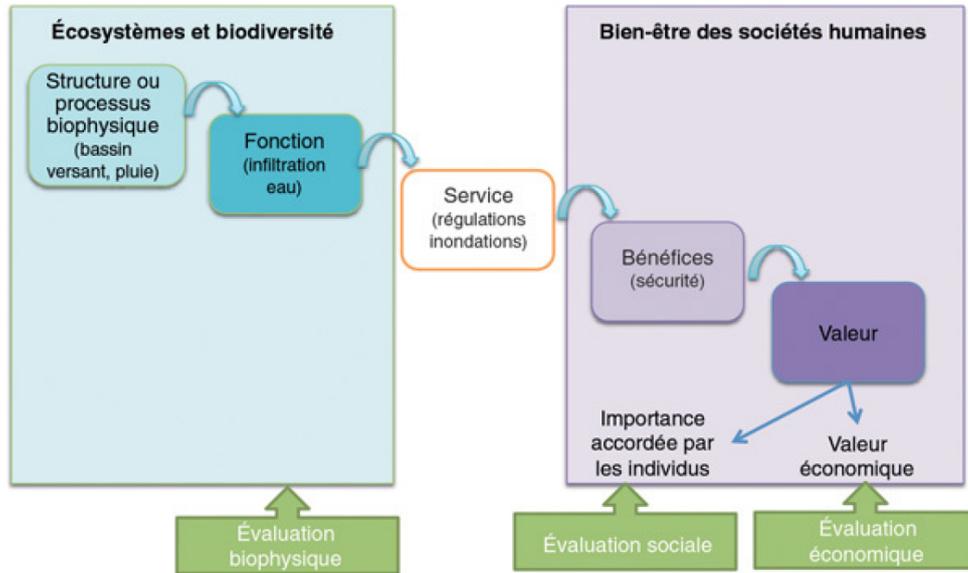


Figure 2 : « Fonctions et services écosystémiques » [44]

Cette approche dite « en cascade » [47] est étayée de nombreux exemples par Grenier *et al.* [48].

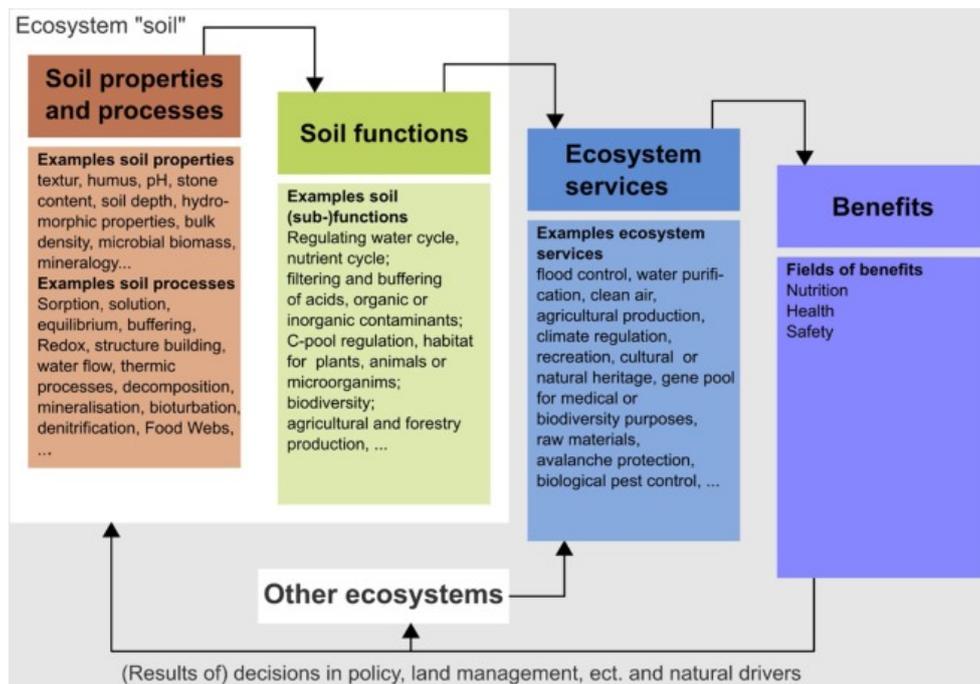


Figure 3 : « Évaluation de la contribution des fonctions du sol aux services écosystémiques » [48]

L'Office français de la biodiversité (OFB) et CDC Biodiversité proposent plusieurs exemples de fonctionnalités des sols [25] : « Production d'aliments et de biomasse [;] Stockage, infiltration et épuration des eaux [;] Habitats pour les organismes vivants et les patrimoines génétiques [;] Stockage du Carbone [;] Environnement physique, culturel et historique [;] Support de construction et production de matières premières ».

D'après le rapport du projet Intégrer la multifonctionnalité des sols dans l'élaboration des documents d'urbanisme (projet MUSE) [49], le terme « multifonctionnalité » peut désigner « l'ensemble des fonctions que peut exercer un sol. La Commission Européenne précisait ainsi en 2006 que le sol « sert de plate-forme pour les activités humaines, constitue un élément du paysage et du patrimoine culturel et joue un rôle central en tant qu'habitat et pool génique. Il assure des fonctions de stockage, de filtration et de transformation de nombreuses substances, y compris l'eau, les nutriments et le carbone » » [50]. Une figure intitulée « Les fonctions exercées par les sols, focus sur le milieu urbain » présente les exemples suivants : « Infiltration et stockage des eaux pluviales [;] dépollution de l'eau [;] production végétale [;] habitat pour la biodiversité [;] réservoir de carbone [;] rafraîchissement de l'air » (avec l'évapotranspiration du sol et des plantes).

Dans le cadre de ce projet, les fonctions écologiques - « celles permettant à l'écosystème de fonctionner sans prendre en compte les usages qu'en fait l'homme et les enjeux/contraintes liées à ces usages » - sont distinguées des fonctions anthropiques. Le rapport indique quelques exemples de fonctions écologiques (« production d'aliments et de biomasse, régulation du cycle de l'eau, stockage, filtration et transformation des nutriments, réservoir de biodiversité du sol, réservoir de carbone ») et quelques exemples de fonctions anthropiques (« stockage, filtration et transformation des polluants, support (physique d'activités humaines et culturelles), source de matière première ») ; Auzet et al. mentionnent également les fonctions alimentaires, thérapeutiques et récréatives [44].

Néanmoins, le rapport du projet MUSE souligne que « la distinction entre ces deux notions reste complexe, certaines fonctions qui bénéficient aux écosystèmes bénéficient aussi à l'Homme (exemple : la fonction régulation du cycle de l'eau, la source de biomasse) » [49].

Le BRGM identifie quatre familles de fonctions assurées par les sols [51] :

- « Fonctions biologiques : habitat d'espèces, connectivité écologique » ;
- « Fonctions bio-géochimiques : épuration, capacité à dégrader de la MO (fertilité), stock carbone, dégradation ou rétention de polluants » ;
- « Fonctions hydro-géomorphologiques : ralentissement des ruissellements, recharge des nappes » ;
- « Fonctions support géotechnique ».

De plus, reprenant les catégories utilisées par l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire réalisée à la demande des Nations Unies [52, 53], le BRGM présente ainsi les « services rendus en lien avec les sols » [54] :

- « Services culturels : paysage et esthétique [;] loisir et récréatif [;] préservation du patrimoine naturel et architectural » ;
- « Services d'approvisionnement : en aliments [;] en biomasse non alimentaire [;] en eau potable [;] en énergie [;] en ressources minérales [;] en support physique » ;
- « Services de régulation : protection contre les inondations [;] protection contre l'érosion [;] régulation du climat global [;] régulation du climat local [;] qualité de l'eau et des sols ».

Une revue de littérature scientifique datée de 2016 [55] propose un diagramme représentant les liens entre les propriétés du sol et le bien-être humain, par l'intermédiaire des fonctions du sol et des services écosystémiques (Figure 4). Une adaptation, en français, a également été proposée en 2018 [56] (Figure 5) et une version a été incluse dans la fresque du sol (Figure 6), élaborée par l'ADEME et l'AFES [57].

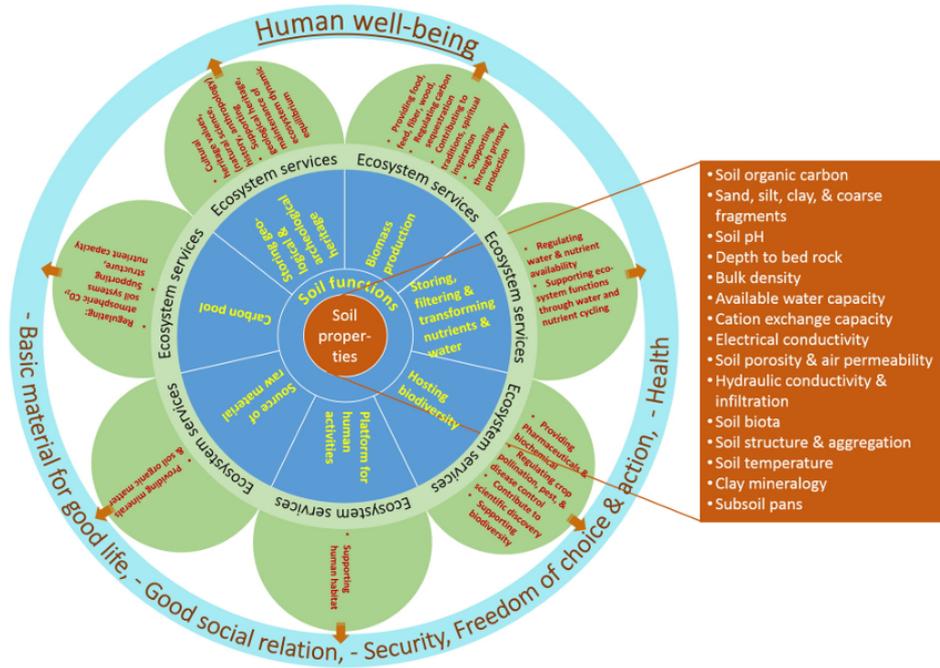


Figure 4 : « Diagramme conceptuel reliant les propriétés clés du sol aux services écosystémiques par l'intermédiaire des fonctions du sol pour le bien-être de l'Homme » [55]

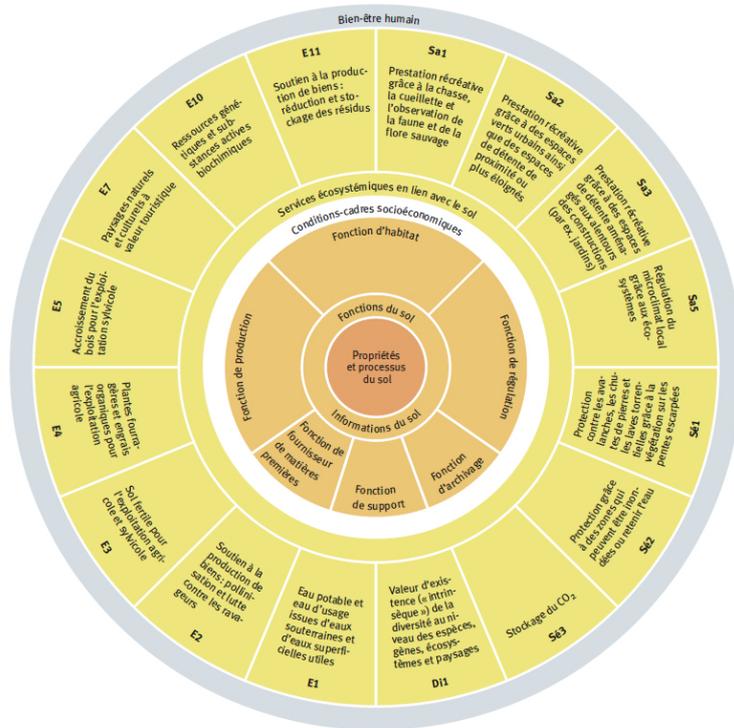


Figure 5 : « Le sol dans sa globalité »

« Les propriétés du sol et les processus qui s'y déroulent permettent conjointement à la ressource sol de fournir les fonctions et les services pertinents pour la société et l'écosystème » [56]

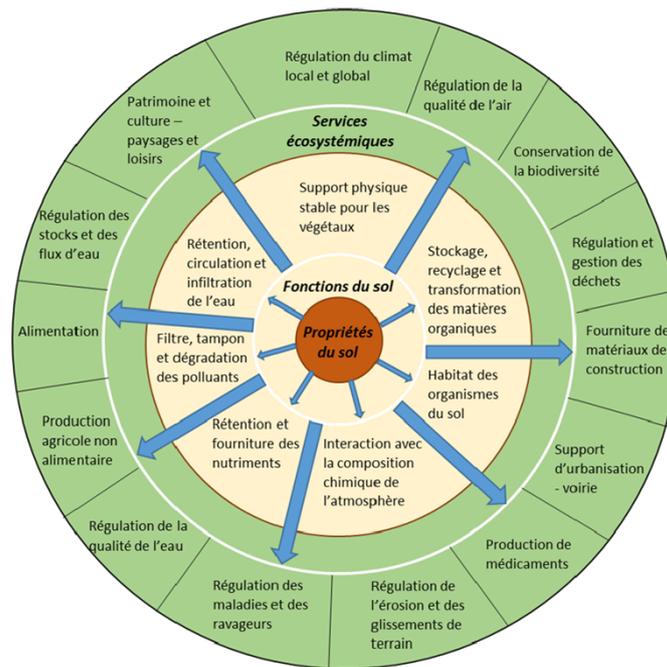


Figure 6 : « Relation fonctions et services écosystémiques »

« Les 7 fonctions écologiques et les 14 services écosystémiques rendus par les sols. Il faut plusieurs fonctions pour assurer un service, et une même fonction alimente plusieurs services » [57]

Compte tenu des différents éléments collectés dans la présente section, une définition est proposée dans la section suivante, pour le cadre du présent rapport méthodologique.

3.5.2 Définitions retenues dans le cadre de ce rapport

La fonctionnalité d'un sol désigne sa capacité à assurer ses fonctions (on parle aussi de « multifonctionnalité » d'un sol).

Une fonction désigne un des rôles spécifiques des sols au sein des écosystèmes, un rôle que les sols peuvent remplir à partir de leurs caractéristiques et des processus qui s'y déroulent. Par exemple : régulation du cycle de l'eau, incluant son infiltration et son stockage.

Les fonctions du sol permettent la fourniture de certains services écosystémiques, conduisant à des bénéfices pour les humains et pour les écosystèmes en présence. Par exemple : prévention des inondations.

L'amélioration de la fonctionnalité d'un sol - dont le terme « refunctionalisation » sera considéré comme synonyme en première approche - désigne des processus visant le renforcement, la création ou le rétablissement de la fonctionnalité de ce sol.

Cette amélioration pourrait notamment consister à réduire les impacts de différents types de dégradation des sols sur les fonctions de ces sols. Par exemple [50, 51] : diminution du carbone, érosion, tassement, imperméabilisation, salinisation, acidification, perte de biodiversité, désertification, glissements de terrain et contamination des sols.

3.6 Désimperméabilisation

3.6.1 Collecte d'éléments de définition

Les termes « *désimperméabilisation* » et « *désimperméabiliser* » ne figurent pas dans le dictionnaire de français en ligne Le Robert [20]. Néanmoins, « *imperméabiliser* » y est défini comme « *rendre imperméable* », adjectif lui-même défini comme « *qui ne se laisse pas traverser par un liquide, notamment par l'eau* ».

Les termes « *désimperméabilisation* » et « *désimperméabiliser* » ne figure pas non plus dans le dictionnaire de français en ligne Larousse [21]. Néanmoins, « *imperméabiliser* » est défini comme « *rendre quelque chose, une matière imperméable* », adjectif lui-même défini comme « *qui par nature ou par traitement n'est pas perméable, ne se laisse pas pénétrer, imprégner par l'eau ou par un fluide* ».

Selon CDC Biodiversité [58], « *la désimperméabilisation peut être définie comme une action ou le résultat d'une action consistant à découvrir totalement ou partiellement un sol couvert par un revêtement ou une construction qui perturbe le cycle de l'eau* ». Pour CDC Biodiversité, la désimperméabilisation fait partie des mesures de désartificialisation.

De plus, selon la MEB, la désimperméabilisation est un des « *processus* » menés « *pour renaturer des sols* », qui consiste en une « *suppression du revêtement imperméable situé sur tout type de surface afin de rétablir le fonctionnement hydraulique du site* » [25].

Selon l'Abécédaire de la renaturation, élaboré par la Fédération nationale des agences d'urbanisme (FNAU), l'ADEME et l'OFB, « *les sols sont imperméabilisés lorsque l'eau ne peut pas s'y infiltrer. C'est le recouvrement par un matériau imperméable (comme de l'enrobé ou du béton qui réduit le plus souvent la capacité d'infiltration de l'eau dans un sol. [...]) Les sols sont désimperméabilisés lorsqu'ils retrouvent leur capacité à assurer une fonction hydrique* » [19].

En outre, selon le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) [59], « *l'imperméabilisation des sols correspond au recouvrement d'un sol par un matériau imperméable (tel que l'enrobé ou le béton), qui réduit la capacité d'infiltration de l'eau. [...]) Le concept de désimperméabilisation consiste, d'une part, à remplacer des surfaces imperméables par des surfaces plus perméables et, d'autre part, à déconnecter le rejet des eaux pluviales du réseau public* ».

Enfin, selon un rapport conjoint de l'Observatoire régional de santé Île-de-France (ORS Île-de-France) et de l'ARB ÎdF [60], reprenant un extrait du guide *Renaturer les villes* [28], « *la renaturation est parfois confondue avec la désimperméabilisation, qui consiste uniquement à redonner une perméabilité à la couche superficielle du sol, souvent grâce au recours à des revêtements poreux et drainants. Elle est un préalable indispensable mais insuffisant à la restauration des fonctions écologiques du sol* ». En complément, le guide propose une définition plus formelle : « *Action qui consiste à rendre perméable à l'eau, à ne plus imperméabiliser. La désimperméabilisation renvoie au domaine de la gestion alternative des eaux pluviales et aux techniques visant à favoriser une infiltration ou un stockage des eaux pluviales à la source. La désimperméabilisation consiste à redonner une perméabilité à la couche superficielle du sol* » [28].

Compte tenu des différents éléments collectés dans la présente section, une définition est proposée dans la section suivante, pour le cadre du présent rapport méthodologique.

3.6.2 Définition retenue dans le cadre de ce rapport

La désimperméabilisation d'un sol désigne les processus visant à rendre sa couche superficielle plus perméable, à permettre à l'eau de pluie de s'infiltrer, notamment en enlevant des matériaux imperméables qui recouvrent ce sol.

Ce terme peut également désigner le résultat de ces processus.

3.7 Habitats pour les écosystèmes

3.7.1 Habitat

3.7.1.1 Collecte d'éléments de définition

Nature France indique la définition suivante [61] : « *Les habitats sont composés d'un milieu (le biotope) et d'êtres vivants qui interagissent entre eux et avec le milieu (la biocénose). Au sein d'un écosystème, différents habitats regroupent des êtres vivants ainsi que toutes les ressources et conditions nécessaires pour répondre à leurs besoins vitaux. Il peut s'agir par exemple de tourbières, prairies, forêts, landes, dunes, etc.* ». France Nature rappelle aussi son « *sens technique* » selon la Commission européenne : « *Milieu défini par des facteurs abiotiques et biotiques spécifiques où vit une espèce à l'un des stades de son cycle biologique. Un habitat naturel se distingue par des caractéristiques géographiques, abiotiques et biotiques entièrement naturelles ou semi-naturelles* » [62].

La directive européenne Habitats Faune Flore (DHFF) définit les habitats naturels comme des « *zones terrestres ou aquatiques se distinguant par leurs caractéristiques géographiques, abiotiques et biotiques, qu'elles soient entièrement naturelles ou semi-naturelles* » [63]. Cette définition est reprise par le ministère chargé de l'Écologie dans le rapport de première phase d'Efese [42].

Selon l'OFB, les habitats naturels sont des « *milieux et environnements dans lesquels des espèces vivent et interagissent* » [64].

D'après les Cahiers d'habitats Natura 2000, coordonnés par le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) [65], « *L'habitat est un ensemble non dissociable constitué :*

- *d'un compartiment stationnel (conditions climatiques régionales et locales, matériau parental et sol, géomorphologie et leurs propriétés physiques et chimiques) ;*
- *d'une végétation ;*
- *d'une faune associée (avec des espèces inféodées à une espèce végétale, à la végétation, ou utilisant un territoire plus grand que l'habitat considéré).* »

Le MNHN ajoute qu'« *un habitat naturel (ou semi-naturel) est donc défini comme un ensemble reconnaissable, formé par des conditions stationnelles (climat, sol, relief) et par une biocénose caractéristique aussi bien végétale qu'animale* » [66].

Dans le glossaire de l'Inventaire national du patrimoine naturel (INPN), un habitat est défini comme [67] « *un ensemble indissociable avec :*

- *une faune, avec des espèces ayant tout ou partie de leurs diverses activités vitales sur l'espace considéré ;*
- *une végétation (herbacée, arbustive et arborescente) ;*
- *un compartiment stationnel (conditions climatiques, sols et matériau parental et leurs propriétés physico-chimiques).*

Un habitat ne se réduit pas à la seule végétation. Mais celle-ci, par son caractère intégrateur (synthétisant les conditions de milieu et de fonctionnement du système) est considérée comme un bon indicateur et permet de déterminer l'habitat ».

Ce glossaire complète cette définition avec la notion d'« *habitat d'espèce* » : « *un habitat d'espèce correspond au milieu de vie de l'espèce (zone de reproduction, zone d'alimentation, zone de chasse...). Il peut comprendre plusieurs habitats naturels* » [67].

Selon l'IPBES [36], un habitat est « *un lieu ou un type de site où un organisme ou une population se trouve naturellement. Également utilisé pour désigner les attributs environnementaux requis par une espèce particulière ou sa niche écologique* ».

L'Atlas européen de la biodiversité du sol souligne que « *beaucoup [de] groupes d'organismes ont le sol pour habitat* » [68] et que le profil des organismes en présence varie notamment avec la profondeur du sol (Figure 7). De plus, « *les sols de textures et structures différentes interagissent différemment avec l'eau (drainage, remontée capillaire, gonflement retrait, soulèvement par le gel), fixent différemment les nutriments (types, quantité, disponibilité pour les plantes) et apportent des habitats différents pour les racines et les organismes du sol. D'un point de vue biologique, c'est la structure de l'espace poral qui est l'aspect le plus important dans la structure du sol, car c'est là que la vie trouve son habitat* ».

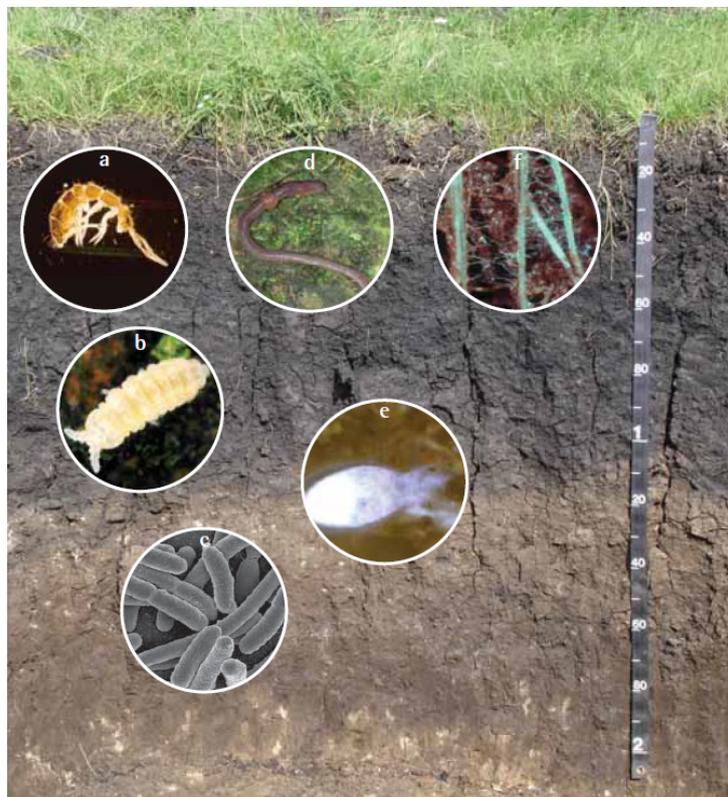


Figure 7 : « Schéma très simplifié » [68] de la distribution verticale des organismes présents dans un profil de sol

a, b : deux espèces de collembolles ; c : bactéries ; d : vers de terre ; e : protozoaires ; f : champignons.

À noter que les notions d'habitat et de biotope peuvent aussi être considérées comme très proches. Par exemple, selon la Direction Générale Opérationnelle belge Agriculture, Ressources naturelles et Environnement (DGARNE), « *les deux termes sont souvent employés de manière similaire. Par exemple, la Directive européenne "Habitats" ne fait pas la différence entre les deux expressions car biotope et habitat se traduisent en anglais par le même terme « habitat* » » [69].

La nomenclature de la typologie EUNIS (*European Nature Information System*), reprise dans un rapport d'expertise du commissariat général au développement durable (CGDD), daté de 2018 et portant sur la réparation des dommages écologiques [70], indique la définition suivante : « *Espace où des animaux ou plantes vivent, caractérisé premièrement par ses particularités physiques (topographie, physiologie des plantes ou animaux, caractéristiques du sol, climat, qualité de l'eau, etc.) et secondairement par les espèces de plantes et d'animaux qui y vivent* », le rapport précisant « *Synonyme : milieux* ».

Le MNHN oriente aussi vers le terme « milieu » pour désigner la notion d'habitat à grande échelle : « *Le terme « habitat » est parfois également utilisé dans un sens plus large qui ne fait pas strictement référence à des habitats d'espèces ni à des habitats naturels. Le terme habitat est ainsi parfois employé pour décrire des entités plus « macro », comme la forêt ou les bocages. Pris dans ce sens, la notion d'habitat fait davantage référence à la notion de « milieu » qui lui est alors préférable car, plus englobante, elle inclut à la fois des habitats et des espèces mais aussi des caractéristiques physiques telles que des conditions topographiques, pédologiques ou climatiques* » [66].

Compte tenu des différents éléments collectés dans la présente section, une définition est proposée dans la section suivante, pour le cadre du présent rapport méthodologique.

3.7.1.2 Définition retenue dans le cadre de ce rapport

En fonction de l'échelle considérée, la notion d'habitat peut recouvrir deux significations :

- au niveau de la (macro)faune du sol, c'est-à-dire à l'échelle de quelques centimètres, un habitat est une zone du sol dans laquelle des espèces peuvent vivre et interagir. Par exemple : zones présentant de la litière, des roches, des racines, une rhizosphère, etc.
En cas de besoin de distinguer cette signification, le terme « micro-habitat » peut être utilisé ;
- à plus grande échelle (ex : site, paysage...), un habitat est un espace où des espèces peuvent vivre et interagir, caractérisé premièrement par ses particularités physiques (topographie, physiologie des plantes ou animaux, caractéristiques du sol, climat, etc.) et secondairement par les espèces de plantes et d'animaux qui y vivent.
En cas de besoin de distinguer cette signification, le terme « milieu » peut être utilisé.

Pour mémoire, le Décret n°2022-1588 mentionne un « *développement d'habitats* » [1], qui peut ici être compris comme la préservation d'habitats existants et la création de nouveaux habitats.

3.7.2 Écosystème

3.7.2.1 Collecte d'éléments de définition

Selon l'Évaluation des écosystèmes pour le Millénaire réalisée à la demande des Nations Unies [52], un écosystème est « *un complexe dynamique composé de plantes, d'animaux, de micro-organismes, et de la nature morte environnante agissant en interaction en tant qu'unité fonctionnelle. [...] La gamme complète des écosystèmes [va de] ceux relativement intacts, tels que les forêts naturelles, aux paysages caractérisés par des témoins variés de l'exploitation d'origine humaine, jusqu'aux écosystèmes sous contrôle intensif de l'Homme et subissant des modifications dues à son action, tels que les terres agricoles et les trames urbaines* ».

D'après l'IPBES, un écosystème est « *une communauté d'organismes vivants (plantes, animaux, champignons et microbes variés) en liaison avec les composantes non-vivantes de leur environnement (telles que l'énergie, l'air, l'eau et le sol minéral), tous interagissant en tant que système* » [36].

Selon le programme d'apprentissage en ligne Learning Nature du PNUD, un écosystème est un « *assemblage de composants biotiques et abiotiques dans les masses d'eau ou sur terre, dans lequel les composants interagissent pour former des réseaux alimentaires complexes, des cycles de nutriments et des flux d'énergie* » [38].

Selon le ministère chargé de l'Écologie, dans le rapport de première phase du projet Efese [42], un écosystème est un « *complexe dynamique de populations végétales, animales et de microorganismes (biocénose), associées à leur milieu non-vivant (biotope) et interagissant en tant qu'unité fonctionnelle* ».

D'après le Livret sur l'environnement de l'Académie des sciences [71], un écosystème est « *un assemblage d'animaux, de végétaux et de micro-organismes en interaction les uns avec les autres, ainsi qu'avec leur milieu. Ces interactions se développent dans le cadre de systèmes plus ou moins naturels : forestiers, lacustres, agricoles, urbains...* ».

Selon l'article 3 de la proposition de directive européenne sur la surveillance des sols [17], un écosystème est « *un complexe dynamique formé de communautés de plantes, d'animaux et de microorganismes et de leur environnement non vivant qui, par leur interaction, forment une unité fonctionnelle* ».

Compte tenu des différents éléments collectés dans la présente section, une définition est proposée dans la section suivante, pour le cadre du présent rapport méthodologique.

3.7.2.2 Définition retenue dans le cadre de ce rapport

Un écosystème est un ensemble d'êtres vivants (plantes, animaux et microorganismes) qui vivent au sein d'un environnement non vivant, interagissant entre eux et avec cet environnement.

3.8 Renaturation

3.8.1 Synthèse issue des sections de définition précédentes

Pour mémoire, le Décret n°2022-1588 mentionne un « *usage de renaturation, impliquant une désartificialisation ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité des sols, notamment des opérations de désimperméabilisation, à des fins de développement d'habitats pour les écosystèmes* » [1].

Dans l'objectif de préciser le contenu associé à cet usage de renaturation, les sections précédentes ont visé à décrire et à préciser les différentes notions que le décret inclut dans sa définition (Tableau 6).

Tableau 6 : Définitions retenues dans le cadre de ce rapport méthodologique, visant à préciser le contenu associé à l'usage de renaturation

Notions mentionnées dans le Décret n°2022-1588	Définitions retenues dans le cadre de ce rapport, issues des sections 3.2 à 3.7
Sol	<p>Le sol est la couche superficielle de la croûte terrestre, située entre le substrat rocheux et la surface terrestre, transformée par des processus climatiques, physico-chimiques et biologiques, et composée de particules minérales, de matières organiques, d'eau, d'air et d'organismes vivants.</p> <p>En particulier, la profondeur de sol d'intérêt pour l'usage de renaturation correspond à celle qui peut présenter les propriétés nécessaires pour accueillir la vie.</p>
Désartificialisation	<p>La désartificialisation désigne des processus⁶ qui s'inscrivent dans la dynamique inverse de l'artificialisation.</p> <p>L'artificialisation d'un sol désigne l'ensemble des impacts des activités humaines sur ce sol. Ces impacts peuvent être de plusieurs types : chimique, physique, biologique, écologique...</p> <p>La désartificialisation d'un sol vise à réduire les impacts sur les fonctions de ce sol et sur les services écosystémiques associés, ce qui peut conduire à une amélioration de la fonctionnalité de ce sol.</p>
Restauration	<p>La restauration d'un sol désigne des processus⁶ visant à rétablir ce sol en un précédent état écologique de référence, à réparer ou à régénérer ce qui a été endommagé ou détruit, à aider le sol à retrouver certaines caractéristiques qui définissent cet état de référence, notamment sa composition et ses fonctions.</p>
Amélioration de la fonctionnalité des sols	<p>La fonctionnalité d'un sol désigne sa capacité à assurer ses fonctions (on parle aussi de « multifonctionnalité » d'un sol).</p> <p>Une fonction désigne un des rôles spécifiques des sols au sein des écosystèmes, un rôle que les sols remplissent à partir de leurs caractéristiques et des processus qui s'y déroulent. Par exemple : régulation du cycle de l'eau, incluant son infiltration et son stockage.</p> <p>Les fonctions du sol permettent la fourniture de certains services écosystémiques, conduisant à des bénéfices pour les humains et pour les écosystèmes en présence. Par exemple : prévention des inondations.</p> <p>L'amélioration de la fonctionnalité d'un sol désigne des processus visant le renforcement, la création ou le rétablissement de la fonctionnalité de ce sol.</p>
Désimperméabilisation	<p>La désimperméabilisation d'un sol désigne les processus⁶ visant à rendre sa couche superficielle plus perméable, à permettre à l'eau de pluie de s'infiltrer, notamment en enlevant des matériaux imperméables qui recouvrent ce sol.</p>
Habitat	<p>En fonction de l'échelle considérée, la notion d'habitat peut recouvrir deux significations :</p> <ul style="list-style-type: none"> • au niveau de la (macro)faune du sol, c'est-à-dire à l'échelle de quelques centimètres, un habitat est une zone du sol dans laquelle des espèces peuvent vivre et interagir. Par exemple : zones présentant de la litière, des roches, des racines, une rhizosphère, etc. En cas de besoin de distinguer cette signification, le terme « micro-habitat » peut être utilisé ; • à plus grande échelle (ex : site, paysage...), un habitat est un espace où des espèces peuvent vivre et interagir, caractérisé premièrement par ses particularités physiques (topographie, physiologie des plantes ou animaux, caractéristiques du sol, climat, etc.) et secondairement par les espèces de plantes et d'animaux qui y vivent. En cas de besoin de distinguer cette signification, le terme « milieu » peut être utilisé.
Écosystème	<p>Un écosystème est un ensemble d'êtres vivants (plantes, animaux et microorganismes) qui vivent au sein d'un environnement non vivant, interagissant entre eux et avec cet environnement.</p>

⁶ Ce terme peut également désigner le résultat de ces processus.

3.8.2 Collecte d'éléments de définition supplémentaires, spécifiques à « renaturation »

Nature

Étymologiquement, « renaturation » se base sur le préfixe « re » (idée de retourner, de revenir, de retrouver, etc.) et sur « nature ».

Comme de nombreux concepts de base (le temps, le vivant...), le concept de nature est difficile à définir précisément et de manière consensuelle [72-74]. En particulier, la nature renvoie à des significations différentes selon les cultures et selon les époques [75, 76]. Ces aspects dépassent le champ du présent rapport.

Le dictionnaire en ligne Le Robert donne la définition suivante : « *Tout ce qui existe dans l'univers hors de l'être humain et de son action* » [20]. En complément, le Dictionnaire Larousse [21] propose deux autres définitions, incluant d'autres notions qui peuvent être utiles ici :

- « *Ensemble des principes, des forces, en particulier de la vie, par opposition à l'action de l'homme* ». Par exemple : « *Elle faisait plus confiance à la nature qu'aux médecins.* »
- « *Ensemble de ce qui, dans le monde physique, n'apparaît pas comme (trop) transformé par l'homme* ». Par exemple : « *Partir en vacances en pleine nature.* »

Ainsi, ces deux définitions indiquent que la notion de nature peut être associée à la notion de vie, en particulier la vie hors de l'Humain, ainsi qu'à la notion de moindre degré de transformation par l'Humain, ce qui renvoie à la notion d'artificialisation (section 3.3). Ceci présuppose notamment une notion de frontière, entre ce qui est Humain ou influencé par l'Humain et ce qui ne l'est pas, cette frontière pouvant parfois aussi être difficile à définir précisément.

Dans certains domaines, des réglementations peuvent fournir de premiers éléments de définition. C'est par exemple le cas avec la proposition de directive européenne sur la surveillance des sols [17], qui propose dans son article 3 les définitions suivantes :

- « *« terres naturelles » : un espace dont les principales fonctions écologiques et la composition des espèces n'ont pas été sensiblement modifiées par les activités humaines ;*
- « *terres semi-naturelles* » : *un espace dont les assemblages écologiques ont été sensiblement modifiés quant à leur composition, leur équilibre ou leur fonction par les activités humaines, mais qui conserve une valeur potentiellement élevée du point de vue de sa biodiversité et des services écosystémiques qu'il fournit ;*
- « *terres artificialisées* » : *les terres utilisées en tant que supports de bâti et d'infrastructures, comme sources directes de matières premières ou en tant qu'archives du patrimoine historique, au détriment de la capacité des sols à fournir d'autres services écosystémiques ;*
- « *artificialisation* » : *la conversion de terres naturelles et semi-naturelles en terres artificialisée* ».

La proposition de directive reprend l'idée d'une faible influence de l'Humain, et précise que cette faible influence porte sur « *les principales fonctions écologiques* » et « *la composition des espèces* ».

Pour conclure sur ces aspects, en première approche et dans le cadre de ce rapport méthodologique, il est retenu que le concept de nature renvoie à un sol qui inclut des êtres vivants (hors l'Humain), et dont la composition des espèces et les principales fonctions écologiques n'ont pas été significativement transformées par des activités humaines.

Renaturation

Pour mémoire, d'après la Loi climat et résilience, la renaturation d'un sol « *consiste en des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé* » [12]. De plus, la renaturation y est explicitement présentée comme synonyme de « *désartificialisation* » [12, 13].

Ainsi, dans le cadre du bilan du ZAN et de la nomenclature des surfaces artificialisées et non-artificialisées (article R. 101-1 du Code de l'urbanisme), « *la renaturation consiste en un processus ou*

une démarche permettant à une surface considérée comme artificialisée ou dégradée (cat. 1 à 5) d'être désartificialisée (cat. 6 à 10) » [77].

D'après la MEB, « le concept de renaturation est [...] protéiforme : pour certains, il s'agit de favoriser le "retour de la nature en ville" (grâce aux toitures végétalisées par exemple), pour d'autres il désigne les processus par lesquels les espèces vivantes recolonisent spontanément, avec une intervention humaine ou non, un milieu ayant subi des perturbations écologiques, se rapprochant ainsi de la restauration écologique (reforestation, reméandrage de cours d'eau, restauration de milieux humides ...) » [25]. Ce constat d'un manque de définition consensuelle est partagé par d'autres auteurs [28, 77-81].

Sur la base de la définition indiquée dans la Loi climat et résilience pour la mise en œuvre de l'objectif ZAN, la MEB précise que « la renaturation des sols, "en miroir" de leur artificialisation, bénéficie d'une définition fonctionnelle qui s'applique à l'échelle des projets et d'une définition spécifique pour le suivi du ZAN dans les documents de planification. Cette double définition suppose d'instaurer une forme de dialogue entre l'échelle du projet et celle de la planification. L'échelle du projet renvoie à la mise en œuvre de la séquence « Éviter-réduire-compenser » (ERC) » [25].

La mise en regard avec l'artificialisation des sols apporte également un éclairage sur l'objectif de la renaturation : « Par opposition à l'artificialisation des sols, leur renaturation doit permettre de restaurer ou d'améliorer les fonctionnalités des sols, et par là les services écosystémiques qu'ils procurent. Ainsi, les actions de végétalisation du bâti et plus globalement l'implantation de « surfaces écoaménageables » (murs végétaux, toitures et/ou terrasses végétalisées, espaces verts sur dalle, jardinières hors-sol), si elles peuvent permettre de réduire certains effets négatifs de l'artificialisation en luttant par exemple contre les îlots de chaleur, ne sont pas considérées comme des actions de désartificialisation des sols dans le cadre du ZAN » [25].

D'après l'Agence régionale de la biodiversité d'île de France (ARB ÎdF), « le terme de renaturation englobe de multiples approches et visions dont les termes sont en perpétuelle évolution au sein de la communauté scientifique » ; aujourd'hui, le concept de renaturation « reste sujet à différentes interprétations en fonction des acteurs, qu'ils ou elles soient écologues, aménageurs, urbanistes ou paysagistes ». Néanmoins, « au sens large, la renaturation renvoie au retour à l'état naturel ou semi-naturel des écosystèmes qui ont été dégradés, endommagés ou détruits par les activités humaines. Elle est synonyme de restauration écologique. Elle est dite active lorsque des actions intentionnelles sont mises en place pour initier ou accélérer l'autoréparation de l'écosystème en question. La renaturation peut aussi être passive, lorsque les forces de dégradation sont réduites, permettant aux processus naturels de restaurer l'écosystème initial » [28].

Pour les sols, la renaturation implique un « retour à la pleine terre » [32], un concept graduel qui peut-être caractérisé par plusieurs critères, tels que « Absence de revêtement en surface », « Perméabilité des sols », « Continuité verticale en profondeur » et « Continuité horizontale (trame brune) » [32].

Synonyme de renaturation selon l'ARB ÎdF, la restauration écologique consiste, d'après la Society for Ecological Restoration (SER) [33, 82], à « aider un écosystème à se rétablir après qu'il a été dégradé, endommagé ou détruit », dans l'objectif de le ramener « à sa trajectoire historique, et non à son état historique. L'écosystème ne retrouvera pas nécessairement son état antérieur, car les réalités écologiques contemporaines, y compris le changement climatique mondial, peuvent l'amener à se développer selon une trajectoire altérée, tout comme ces mêmes réalités peuvent avoir modifié la trajectoire d'écosystèmes voisins non perturbés ».

De même, l'ARB ÎdF souligne que la renaturation n'implique pas forcément l'objectif de se rapprocher d'un état historique du site, avant dégradation : « La recherche d'un état initial est particulièrement utilisée dans les projets de restauration d'écosystèmes naturels ou semi-naturels, mais elle est particulièrement difficile voire impossible à retracer en milieu urbain, avec] un retour à un état originel dont l'existence même prête à débat dans la communauté scientifique » [28].

Dans une logique similaire, la MEB indique : « la renaturation ne recherchera pas nécessairement un retour du sol à son état naturel initial, ce qui en milieu urbain ou industriel reste difficile à atteindre. Un parallèle peut ici être fait avec les masses d'eau fortement modifiées (MEFM) qui sont, selon la directive-

cadre sur l'eau, des masses d'eau de surface qui, par suite d'altérations physiques dues aux activités humaines, sont fondamentalement modifiées quant à leur caractère » [25].

Par contre, pour France Stratégie, la renaturation est « l'ensemble des processus permettant de ramener un sol dénaturé, c'est-à-dire ayant subi des perturbations, à un état proche de son état naturel initial » [83].

Selon la Fédération des schémas de cohérence territoriale (SCoT), « la renaturation consiste à redonner sa place à la biodiversité et aux fonctions écologiques d'un sol, en particulier ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage. Elle désigne ainsi une large gamme d'actions pouvant s'appliquer autant dans les espaces urbains ou périurbains que dans les espaces naturels, agricoles, forestiers, littoraux ou de montagne » [77].

Lors d'une journée technique organisée par l'ADEME en 2023, sur le thème de la multifonctionnalité des sols, et plus particulièrement lors de la synthèse du Webinaire Atelier 3 dont le thème était « Des solutions techniques pour concilier le développement des territoires et gestion durable des sols » [84], « les différentes étapes de la renaturation des sols » ont été identifiées ainsi :

- « Déconstruction
- Dépollution
- Désimperméabilisation
- Réhabilitation des sols, végétalisation et augmentation biologique
- Reconnexion fonctionnelle aux écosystèmes naturels environnants »

Une structure similaire a également été proposée par la MEB [25], s'appuyant sur une proposition de France Stratégie [83], ces étapes pouvant être menées « de façon cumulative ou alternative ».

Enfin, l'Abécédaire de la renaturation (FNAU, ADEME, OFB) précise que, « en ville plus spécifiquement », la renaturation est considérée « sans forcément viser un retour à un état initial. En effet, ce dernier a subi de telles modifications du fait de l'anthropisation qu'il serait illusoire de vouloir le retrouver, voire pouvoir le caractériser. Il s'agit donc, par le biais de la renaturation, de revenir à un certain niveau de fonctionnement des sols en rétablissant certaines de ses propriétés » [19].

3.8.3 Informations complémentaires issues du Guide sur les types d'usages

En complément des éléments de définition collectés ci-dessus, le Guide sur les types d'usages définis dans le cadre des cessations d'activité des installations classées pour la protection de l'environnement et de projets d'aménagement, élaboré en 2023 par l'Ineris [2], présente quelques informations complémentaires pour l'usage de renaturation.

- Ne prévoyant aucune construction, l'usage de renaturation n'a pas pu être associé à une destination et une sous-destination de construction, issues du Code de l'urbanisme.
- L'usage de renaturation n'a pas été associé à des scénarios génériques d'exposition humaine, comme c'est le cas pour les autres types d'usage dans la gestion des sites et sols pollués. Néanmoins, le guide considère une « exposition humaine occasionnelle », en complément des « enjeux principaux d'ordre environnemental ». Il donne par ailleurs quelques précisions sur ces aspects : « L'usage de renaturation implique la préservation ou la (re)construction d'écosystèmes viables pour des espèces, qu'elles soient ou non protégées. Notons que la fréquentation humaine pour ce type d'usage n'est pas exclue, quoique jugée occasionnelle ». L'analyse bibliographique effectuée pour le présent rapport et les retours d'expérience collectés (section 2) ont fourni des éléments qui ont alimenté les réflexions des auteurs sur ce positionnement (section 4.6).
- Pour l'usage de renaturation, les exemples de « possibles éléments constitutifs des projets d'aménagement » présentés par le guide sont les suivants : « habitats naturels à enjeux écologiques, aires protégées, mesures compensatoires, etc. ». Sur ces possibilités d'aménagement, le guide indique également que, « conformément à la définition donnée par le décret, les espaces désartificialisés et impliquant des opérations de restauration ou

d'amélioration de la fonctionnalité des sols à des fins de développement d'habitats pour les écosystèmes (au sens de la loi « Climat et Résilience ») peuvent constituer des aménagements relevant de l'usage de renaturation ».

- Le guide illustre la notion de renaturation d'un sol par l'« *exemple d'un site industriel après la fin des opérations de déconstruction et de réhabilitation, au droit duquel sont constatées une reconquête par une diversité d'espèces et une restauration des fonctions écosystémiques* ».

3.8.4 Informations complémentaires issues de la proposition de directive européenne sur la surveillance des sols

La proposition de directive européenne sur la surveillance des sols [17] mentionne les définitions suivantes :

- « *« régénération » : une action intentionnelle visant à ramener les sols d'un état dégradé à un état sain ;*
- « *santé du sol* » : *l'état physique, chimique et biologique du sol qui détermine la capacité de celui-ci à fonctionner comme un système vivant essentiel et à fournir des services écosystémiques* ».

De plus, restauration y est explicitement indiquée comme synonyme de régénération : « *5) la restauration (la régénération) de la santé des sols et l'assainissement des sites contaminés.* »

3.8.5 Définition proposée pour « renaturation »

La renaturation désigne le processus qui vise à aider un sol artificialisé à se rapprocher d'un état naturel, c'est-à-dire à retrouver une composition (vivante et non vivante) et des fonctions correspondant à un milieu écologique donné.

3.8.6 Compléments visant à éclaircir la définition proposée et à répondre à certains questionnements

Au regard des questionnements récurrents que l'Ineris a pu identifier pendant les recherches bibliographiques et les entretiens réalisés, la proposition de définition ci-dessus est complétée par les informations suivantes :

- En première approximation, les termes suivants sont considérés comme des synonymes de renaturation : restauration écologique, désartificialisation, refunctionalisation, régénération⁷.
En particulier :
 - si la nature est définie comme ce qui est peu ou pas transformé par les activités humaines, alors la notion de désartificialisation des sols peut être considérée comme très proche de celle de renaturation des sols, dans la logique de la Loi climat et résilience [12, 25, 51] ;
 - d'après l'Abécédaire de la renaturation (FNAU, ADEME, OFB), « *la distinction entre restauration écologique et renaturation peut être tenue. En effet, ces deux termes sont employés de manière synonymique dans de nombreuses publications et études* » [19].
- La désimperméabilisation et la reconnexion fonctionnelle aux écosystèmes environnants sont considérés comme des composantes de la renaturation, des étapes dans le processus global.
- Le milieu écologique de référence retenu (cf. section 4.2) n'est pas nécessairement un état antérieur du site considéré [79].
Le préfixe « re » de renaturation renvoie ici à un retour vers de la nature sur le site, pas forcément vers un type de nature qui y était historiquement présent.
- La renaturation porte sur les espèces protégées ou non protégées (« nature ordinaire » [85]).
- La renaturation diffère du verdissement, même si elle ne s'y oppose pas *a priori*.

⁷ Au sens de la proposition de directive européenne sur la surveillance des sols (cf. section 3.8.4).

En particulier, selon l'ARB ÎdF, « *le verdissement s'élabore généralement sans lien avec le contexte climatique ou géographique. Il mobilise des espèces inadaptées issues de l'horticulture et nécessite de nombreux intrants (terre végétale, engrais, énergie, irrigation) qui rendent les espaces nouvellement végétalisés peu autonomes et dépendants d'une gestion intensive* » [28].

La renaturation présuppose une intention de se placer dans un cadre écologique, de retenir un objectif en termes de milieu écologique.

- La renaturation peut s'appuyer sur différents types d'interventions, telles que des actions de génie civil (ex : enlever une dalle de béton) ou de génie écologique. Ces interventions incluent des Solutions fondées sur la Nature (SfN), définies par l'Union Internationale pour la conservation de la nature (UICN) comme « *les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité* » [86]. Les principaux éléments de cette définition ont été repris par l'Assemblée des Nations unies pour l'environnement [87].

4 Démarche méthodologique : premières propositions

Cette section présente de premiers éléments de méthode pour guider l'usage de renaturation dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués.

S'inscrivant dans la démarche du plan de gestion (section 4.7), le déroulé des principales étapes de la méthode est décrit dans la section 4.1 et synthétisé dans le logigramme de la Figure 8. Pour certaines étapes et notions clés (par exemple : milieu écologique type (MET), environnement local de référence (ELR), indicateurs de suivi), des approfondissements sont présentés dans les sections 4.2 à 4.6.

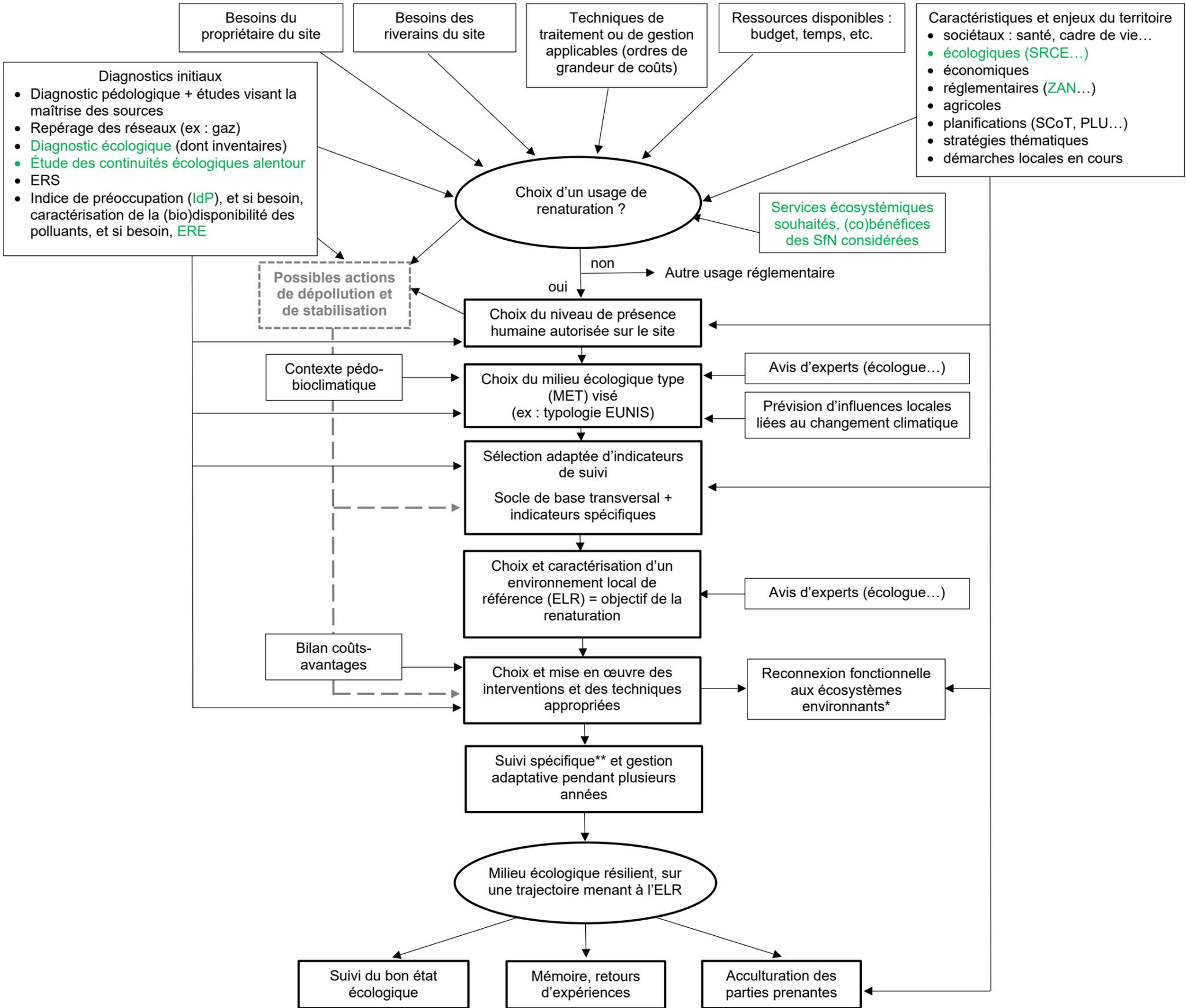


Figure 8 : Usage de renaturation : proposition de démarche méthodologique - logigramme

* On vise ainsi une refunctionalisation à l'échelle du site et à l'échelle du territoire.

** proportionné aux enjeux en présence (ex : rareté à l'échelle du territoire de certains milieux écologiques associés à l'ELR [70]) ; spécifique aux techniques retenues, ainsi qu'aux caractéristiques du site et de l'ELR.

En vert : critères liés à l'usage de renaturation

4.1 Déroulé des principales étapes de la méthode

Choix multicritère d'un usage de renaturation

Retenir l'usage de renaturation pour un site pollué est un choix multicritère. Comme pour les autres usages [2], ces critères peuvent inclure les besoins du propriétaire du site, les ressources disponibles, les résultats de divers types de diagnostics [88] (ex : investigations sur les sols, les eaux souterraines et les gaz du sol ; études documentaires sur l'historique du site), les enjeux du territoire (notamment traduits dans les documents d'urbanisme applicables) [89], les résultats d'évaluations de risques prédictives (ex : analyses des risques résiduels (ARR) prédictives associées aux usages considérés), etc.

En complément, le choix d'un usage de renaturation repose aussi sur des critères spécifiques. Par exemple : inventaires faunistiques et floristiques, caractérisation des risques pour les écosystèmes (indice de préoccupation (IdP) [43, 90] ; évaluation des risques pour les écosystèmes (ERE) [91], par exemple sous la forme d'une approche TRIADE [9, 10]), services écosystémiques souhaités [92], proximité avec des parties de trames verte et brune (voire de trames blanche et noire) [93], notamment dans le cadre du schéma régional de cohérence écologique (SRCE).

Ce choix multicritère peut conduire à différents contextes et différents choix pour l'usage de renaturation, correspondant à différents objectifs et à différents types de milieux écologiques. Voici quelques premiers exemples, à titre d'illustrations :

- une friche clôturée et laissée en libre évolution, présentant des concentrations en polluants incompatibles avec une fréquentation du lieu par des populations (ex : présence de métaux lourds en surface...) mais où la dispersion des polluants est faible (pas d'envol ou de lixiviation), où des bioindicateurs ne montrent pas d'effet et où des écosystèmes d'intérêts fonctionnels ont été recensés [94-97] ;
- une friche clôturée et laissée en libre évolution, présentant un IdP faible mais où des concentrations en polluants trop élevées empêchent la fréquentation humaine ;
- un site laissé en libre évolution et dont la fréquentation humaine est possible, avec un chemin de promenade balisé et constitué de matériaux non pollués visant à éviter le contact avec le sol ;
- un espace vert urbain, incluant des zones délimitées laissées en libre évolution, après reconstruction d'un sol fonctionnel sur la base de réemploi de matériaux inertes issus du site historique ;
- un site présentant un traitement par phytoextraction et/ou phytostabilisation, visant des concentrations en polluants dans le sol compatibles avec la vie d'espèces locales d'intérêt.

La section 5 présente de manière plus approfondie des contextes et des types d'aménagements permettant d'illustrer l'usage de renaturation.

Les ICPE se trouvant souvent dans une zone urbaine ou péri-urbaine, cet extrait du Plan Nature en ville [98] décrit des enjeux qui s'inscrivent dans le champ du présent rapport⁸ : « *Les espaces de nature constituent [...] un bien commun de la structure urbaine et leur absence est un facteur d'aggravation des vulnérabilités socio-urbaines, identifié notamment dans les territoires prioritaires de la politique de la ville, souvent peu végétalisés. Il répond à un besoin sociétal plébiscité : 92% des Français estiment qu'il n'y a pas assez de « nature en ville », 63% qu'il est prioritaire d'accorder plus de place aux espaces de nature et à la végétalisation dans le quartier dans lequel ils vivent - 79% pour les [quartiers prioritaires de la politique de la ville].*

La protection du vivant par le maintien, la préservation, la restauration et le développement des fonctions écologiques en milieu urbain est une nécessité en soi. Ce renforcement des écosystèmes et de leurs fonctionnalités écologiques est aussi directement une condition pour l'habitabilité des villes. Il est essentiel de repenser désormais l'aménagement de la ville en relation avec le vivant, dans un processus de nouvelles coopérations entre ville et nature, dans une logique de co-bénéfices écosystémiques ».

⁸ Le Plan Nature en ville définit le terme « ville » comme « territoire urbain et périurbain » [98].

En pratique, ce choix multicritère peut être réalisé en s'appuyant sur différentes méthodes d'aide à la décision, allant d'un simple échange entre décideurs jusqu'à des méthodes plus complexes, telles que des méthodes d'analyses multicritères (ex : surclassement de synthèse avec l'outil ELECTRE [99]) intégrant des phases de révélations de préférence auprès de différents types de parties prenantes [100]. Ici aussi, la méthode retenue sera proportionnée aux enjeux en présence, et les raisons du choix retenu seront explicitées.

Les raisons pouvant inciter au choix d'un usage de renaturation seront approfondies à la section 5.

Dans tous les cas, le choix de cet usage est une proposition faite par le gestionnaire du site aux autorités locales compétentes.

Choix du niveau de présence humaine autorisée sur le site

La définition législative et réglementaire de l'usage de renaturation (section 3.1) est centrée sur des enjeux environnementaux, mais elle n'exclut en rien la présence humaine⁹.

Dans la même logique, il est possible de randonner dans des zones couvertes par des arrêtés de protection des habitats naturels (APHN), par des arrêtés de protection de biotope (APB) et même au sein de réserves biologiques intégrales (RBI) [101].

Une fois que l'usage de renaturation a été choisi, se pose donc alors la question du niveau de présence humaine qui sera autorisée sur le site.

Ici aussi, il s'agit d'un choix multicritère, tenant compte notamment des besoins des populations riveraines, des niveaux de pollutions présents dans les sols, des priorités sociétales du territoire, etc.

Typiquement, trois niveaux de présence peuvent être envisagés :

- une interdiction d'accéder au site. Par exemple : une friche présentant un grand nombre de zones de pollutions concentrées en polluants toxiques pour les êtres humains. D'après la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, « *la priorité consiste d'abord à déterminer les modalités de suppression des pollutions concentrées, plutôt que d'engager des études pour justifier leur maintien en l'état* » [102] ; une telle interdiction sera donc le plus souvent temporaire ;
- une interdiction d'accéder à certaines parties du site uniquement. Par exemple : un site présentant des pollutions résiduelles élevées (incompatible avec la fréquentation humaine) et circonscrites à des zones limitées ; ou encore un site présentant une pollution résiduelle (diffuse) significative, mais visitable par un chemin balisé et constitué de matériaux non pollués et visant à éviter le contact avec le sol ;
- un libre accès au site, potentiellement accompagné de restrictions pour certaines activités susceptibles de dégrader les écosystèmes. Par exemple : espace vert urbain à forte naturalité où sont interdites les utilisations de produits pesticides (ex : fongicides, insecticides).

Plusieurs raisons plaident pour permettre un accès du public au site dans le cadre d'un usage de renaturation. Notamment :

- la possibilité d'une réappropriation du site par les habitants peut être une motivation forte des élus pour choisir un usage de renaturation ;

⁹ Pour mémoire : la renaturation d'un sol « *consiste en des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé* », cet usage « *impliquant une désartificialisation ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité des sols, notamment des opérations de désimperméabilisation, à des fins de développement d'habitats pour les écosystèmes* » (section 3.1).

- les conclusions de nombreuses études suggèrent que le contact avec la nature est associé à des bénéfices pour la santé [103, 104] ;
- l'accès au site devrait augmenter le niveau d'acceptabilité du projet auprès des populations riveraines.

Ces aspects sont développés dans la section 4.6.

Choix du milieu écologique type (MET) visé

À la suite du travail réalisé à la section 2, la renaturation désigne ici le processus qui vise à aider un sol artificialisé à se rapprocher d'un état naturel, c'est-à-dire à retrouver une composition (vivante et non vivante) et des fonctions correspondant à un milieu écologique donné.

En particulier, ce milieu n'est pas nécessairement un état antérieur du site considéré : la renaturation est un retour à une nature sur le site mais pas forcément vers le type de nature qui s'y trouvait historiquement. Ceci s'applique de fait lorsque l'état écologique historique du site est peu connu ou inconnu, comme souvent dans les cas de sites industriels en zone périurbaine ou urbaine [19, 32, 105].

Certains milieux peuvent présenter un intérêt au regard d'un projet de construction locale d'une trame écologique ; ou encore, le choix d'un milieu peut s'inscrire dans une démarche visant à inverser ou à limiter une dynamique de disparition de certains milieux d'intérêt sur le territoire où se trouve le site.

Le milieu écologique visé peut être choisi parmi une liste de milieux écologiques types (MET), en cohérence avec le contexte pédo-bioclimatique du site [93], les résultats du diagnostic pédologique initial (ex : indicateurs agro-pédologiques classiques) et selon des critères autres qu'écologiques (ex : socio-économiques, politiques, culturels).

Pour le choix du MET, l'avis d'un expert écologue est particulièrement utile, notamment sur les aspects ne concernant pas la pollution des sols et en lien avec la création d'écosystèmes et leurs interactions. Certaines caractéristiques topographiques pourraient être un critère d'intérêt dans le choix du MET du projet.

Sur la base des retours d'expériences présentés à la section 2, de précédents travaux [106], dont des travaux du ministère chargé de l'Écologie [70], et aussi en cohérence avec les réflexions en cours portant l'évolution de la méthode d'interprétation de l'état des milieux (« IEM + ») [107], il est proposé de choisir le MET visé parmi les unités de A à H (milieux les moins artificialisés) de la typologie EUNIS [108-111].

A	Habitats marins
B	Habitats côtiers
C	Eaux de surface continentales
D	Tourbières et bas-marais
E	Prairies ; Terrains dominés par des espèces non graminoides, des mousses ou des lichens
F	Landes, fourrés et toundras
G	Bois, forêts et autres habitats boisés
H	Habitats continentaux sans végétation ou à végétation clairsemée
I	Habitats agricoles, horticoles et domestiques régulièrement ou récemment cultivés
I	Zones bâties, sites industriels et autres habitats artificiels

Figure 9 : Typologie EUNIS : unités retenues (de A à H : les moins artificialisées) [70]

Dans le cas d'un site d'une grande superficie, il est possible que plusieurs types de sol soient présents, et il est donc possible de choisir un MET par zone de sol homogène.

En cohérence avec la définition centrée sur les enjeux environnementaux proposée par le décret n°2022-1588 pour l'usage de renaturation, ce choix du MET visé caractérise la logique de la méthode. L'objectif premier n'est pas de développer certains services écosystémiques : l'objectif premier est de retrouver un milieu écologique résilient, qui par surcroît fournira des services écosystémiques.

De plus, dans le cas particulier où des écosystèmes d'intérêt seraient initialement présents sur le site, l'usage de renaturation peut se limiter à des actions de conservation et de suivi.

Les aspects liés au MET visé sont développés plus avant dans la section 4.2.

Sélection adaptée d'indicateurs de suivi

Sur la base des principales caractéristiques d'intérêt du MET visé, un ensemble d'indicateurs est sélectionné selon le principe de spécificité, dans l'objectif de pouvoir suivre l'évolution du site à renaturer [93].

Cette sélection tient compte également du principe de proportionnalité. Notamment, le nombre d'indicateurs retenus, leur complexité et leurs coûts sont proportionnés aux enjeux en présence.

Enfin, dans l'objectif d'harmoniser les pratiques, un socle de base transversal pourrait être rendu obligatoire pour tous les projets de renaturation. Le cas échéant, pour un projet donné, ce socle de base serait complété par des indicateurs plus spécifiques au MET visé.

Une opération de renaturation étant complexe [28, 105], et sa mise en œuvre pouvant donc être parfois assez exploratoire, ces indicateurs de suivi sont essentiels pour mettre en place un apprentissage itératif, qui permet une gestion adaptative tout au long de la durée du projet [106, 112].

Une fois les indicateurs de suivi sélectionnés, l'étape suivante consiste à réaliser les mesures correspondantes sur le site avant le début des interventions, afin d'obtenir l'état initial du projet de renaturation.

De plus, dans le cas particulier où des écosystèmes d'intérêt seraient initialement présents sur le site et où des actions de conservation seraient décidées, les actions de suivi se baseront sur des indicateurs caractéristiques de ces écosystèmes d'intérêt.

Le sujet du choix des indicateurs de suivi est approfondi à la section 4.4.

Choix et caractérisation d'un environnement local de référence (ELR)

Sur la base du MET visé, un environnement correspondant est recherché dans les environs du site. Une fois cet environnement trouvé, des mesures y sont faites pour renseigner les indicateurs de suivi retenus. La synthèse des valeurs obtenues constitue l'objectif de la renaturation, la référence vers laquelle le projet visera à faire évoluer les caractéristiques du site [78, 113].

Pour faire écho avec la notion d'environnement local témoin (ELT) - qui vise à caractériser l'état dans lequel se trouverait le site sans sa dégradation spécifique - l'environnement proche où sont faites les mesures est appelé environnement local de référence (ELR).

En utilisant le vocabulaire de la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, les caractéristiques de l'ELR constituent « *les objectifs de réhabilitation [,] définis en fonction de l'usage futur déterminé pour le site* » [114].

Les aspects liés à l'ELR sont développés plus avant dans la section 4.3.

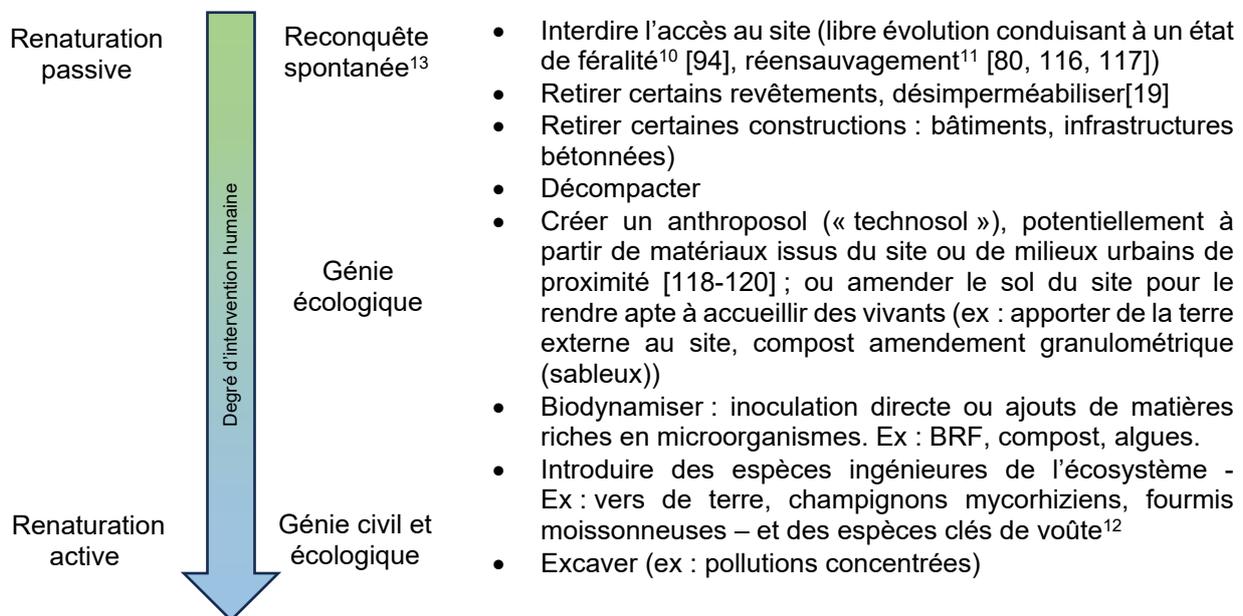
Choix et mise en œuvre des interventions et des techniques appropriées

Compte tenu de la comparaison entre l'ELR et l'état initial du site, différents types d'interventions et de techniques sont identifiées, afin de pouvoir mettre en œuvre des processus qui permettront d'atteindre les résultats attendus.

Sur la base des informations disponibles à ce stade, plus complètes et plus précises qu'au moment initial du choix du futur usage du site, un bilan coûts-avantages est réalisé pour pouvoir effectuer une analyse comparative des différentes solutions considérées. Ce bilan est inclus dans la logique du Plan de Gestion réalisé dans le cadre de la méthodologie de gestion des sites et sols pollués [16].

L'efficacité de ces interventions et de ces techniques est contrôlée avec les indicateurs de suivi retenus. Elle est évaluée au regard de l'ELR.

En complément de la réduction et de la maîtrise des sources de pollution, différents degrés d'intervention sont possibles [105, 115] pour faire évoluer le site vers l'ELR choisi, allant de la quasi-absence d'action jusqu'aux projets d'ingénieries pédologique, civile et écologique (Figure 10). Par exemple :



NB : les termes « passive », « active » et « spontanée »¹³ sont ceux utilisés par l'ARB ÎdF [28] et retrouvés dans la littérature scientifique consultée dans le cadre du présent rapport. On peut également trouver le terme « régénération naturelle » pour désigner la renaturation passive [121].

¹⁰ État de retour d'une espèce ou d'une site vers un état sauvage.

¹¹ « (ou *rewilding* en anglais), qui correspond à la recolonisation d'un milieu par des espèces sauvages (aidée ou non par une intervention humaine), à la suite de l'abandon ou de l'arrêt des activités anthropiques » (ARB ÎdF [28]).

Le réensauvagement est ici considéré comme un type d'options possibles dans le continuum des actions possibles de renaturation [80].

¹² Espèce dont l'impact sur la communauté ou l'écosystème est disproportionné par rapport à son abondance (IPBES [36])

¹³ L'arrêt des perturbations humaines peut suffire à permettre le développement de la flore et de la faune présente sur le site.

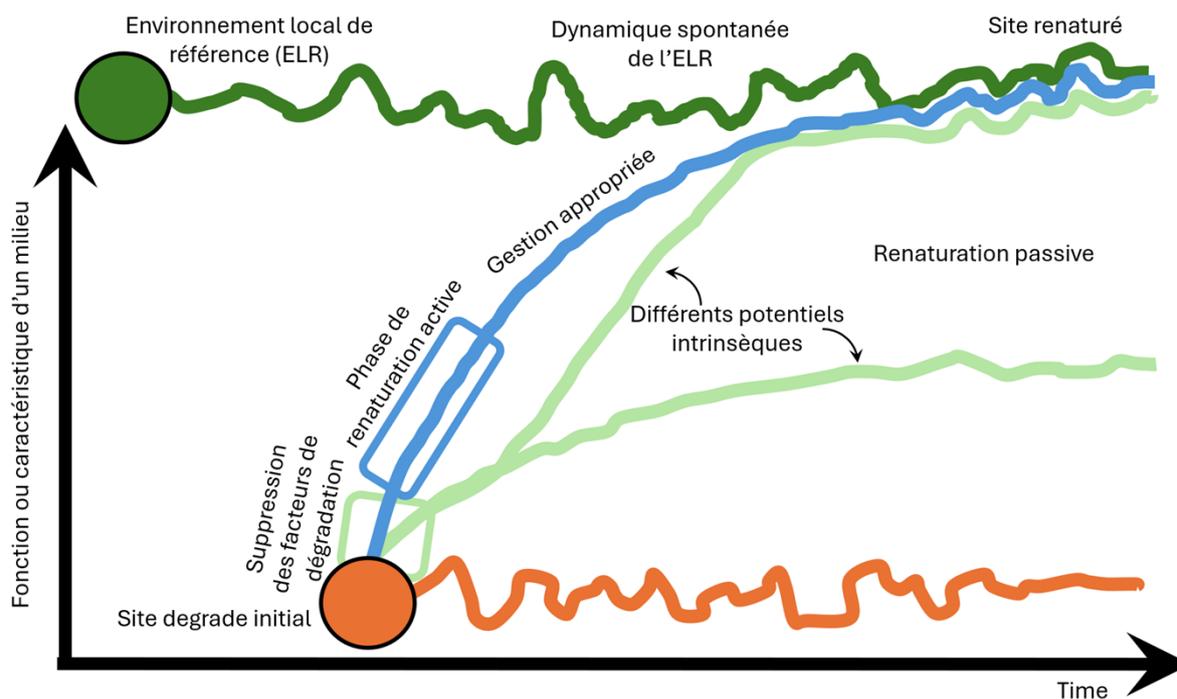


Figure 10 : Illustration de l'articulation entre renaturations active et passive (modifié à partir de Jaunatre et al. 2012 [122] et Gallet 2024 [121])¹⁴

Le sujet du choix des interventions et des techniques est approfondi à la section 4.5.

Suivi de la dynamique générée

Atteindre les caractéristiques de l'ELR peut prendre plusieurs dizaines d'années, voire quelques centaines d'années [82, 94, 117]. Ainsi, dans le contexte des évaluations environnementales des plans et projets, donc en amont de potentielles pollutions de sol, l'Autorité environnementale souligne que « les sols constituent des habitats vivants dont la reconstitution après artificialisation peut s'étaler sur plusieurs siècles » [123].

Ces délais ne correspondant pas aux délais les plus courants pour des projets d'aménagement, l'usage de renaturation peut être considéré comme réussi lorsque le site aura atteint un état résilient¹⁵ et se trouvant sur une trajectoire menant à l'ELR [78, 82, 105, 122]. Ou plus précisément, l'usage de renaturation se réduira à une surveillance proportionnée, accompagnée d'un entretien de base permettant de maintenir l'ELR choisi¹⁶.

Un suivi sur le long terme, avec souvent une fréquence plus faible et sur un nombre réduit d'indicateurs clés, permettra de s'assurer du maintien sur la trajectoire visée.

¹⁴ Par exemple, cette caractéristique pourrait être l'abondance en une espèce d'intérêt ; les fluctuations des courbes peuvent correspondre à des variations saisonnières, à des aléas climatiques, à l'influence d'activités à proximité du site, etc.

¹⁵ La renaturation « devrait permettre des perturbations naturelles dans une gamme de variabilité pertinente du point de vue évolutionniste » [78].

¹⁶ Car les zones de nature évoluent vers des forêts, sauf en cas de fortes contraintes géographiques (ex : altitude).

Concernant la conservation de la mémoire de potentielles pollutions résiduelles¹⁷ [124], le guide de l'Ineris sur les usages [2] rappelle que, « deux outils peuvent être utilisés dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués :

- les restrictions d'usages. Cinq types de restrictions d'usages permettent de conserver la mémoire des sites et sols pollués : les servitudes d'utilité publique (SUP), les restrictions d'usage entre parties (RUP), les restrictions d'usage conventionnelles au profit de l'Etat (RUCPE), les porters à connaissance (PAC) et les projets d'intérêt général (PIG) ;

- les secteurs d'information sur les sols (SIS).

Les porters à connaissance ne produisent d'effets qu'au travers de leur prise en compte dans les documents d'urbanisme. Ils ne sont pas opposables en l'état.

Pour conserver la mémoire des sites et sols pollués, les secteurs d'information sur les sols sont à privilégier dans le cas où l'usage du site est compatible avec la pollution résiduelle. En revanche, l'application de restrictions d'usage s'avère pertinente lorsque, pour l'usage d'un site, il est nécessaire d'interdire ou de restreindre l'utilisation de certains milieux. »

En particulier, l'objectif est d'assurer que de potentiels aménagements futurs ne réduisent pas le niveau de maîtrise des expositions.

4.2 Milieu écologique type (MET)

Typologie EUNIS

D'après l'Office français de la biodiversité (OFB), la typologie *European Nature Information System* (EUNIS) est « une classification des habitats naturels, semi-naturels et anthropiques des secteurs terrestres et marins d'Europe. Cette typologie est utilisable sur tout le territoire français métropolitain et sur tous types de milieux » [125].

Plusieurs « niveaux » correspondent à différents degrés de détail dans la description des habitats. D'après l'OFB, « les critères pour identifier un habitat ne requièrent pas de connaissances confirmées en botanique ou en phytosociologie. Le niveau 3 de la classification Eunis peut permettre d'identifier des habitats sans relevé floristique, donc toute l'année. Néanmoins, dans le cadre d'une démarche conservatoire (évaluation, suivi, action fine de gestion), il peut être pertinent d'aller au-delà (par ex. niveaux 4 ou 5) ».

En cohérence avec les réflexions actuelles sur l'IEM+ [107] et avec des travaux précédents du ministère chargé de l'Écologie [70], le niveau 3 (ex : G.1.3, forêts riveraines méditerranéennes) est le minimum attendu, et le niveau 4 est le niveau préférentiel pour un projet de renaturation, afin d'obtenir des caractéristiques suffisamment détaillées [105, 106], le choix relevant notamment des moyens disponibles pour le projet et du principe de proportionnalité.

Dans le cas où les informations disponibles ne permettraient pas d'identifier un MET adapté au contexte pédo-bioclimatique du site [105], ou dans le cas de sols s'éloignant très fortement de sols pouvant être retrouvés dans des zones naturelles (ex : anthroposol avec un pH > 10 dans certaines couches et avec une forte hétérogénéité de matériaux) la démarche de renaturation pourra consister à rétablir le meilleur niveau possible pour le plus grand nombre de fonctions possibles¹⁸, et en particulier pour les fonctions principales du sol, sur la base de recherches bibliographiques et de dires d'experts. Avec le vocabulaire décrit à la section 2, cette démarche vise à retrouver un sol aussi multifonctionnel que possible.

¹⁷ cf. Guide sur la conservation de la mémoire et les restrictions d'usage en contexte de sites et sols pollués, pour approfondir ces aspects [124].

¹⁸ Cf. notamment interview de Quentin Vincent (Annexe 1).

Milieu écologique historique

Un milieu écologique historique du site « avant dégradation » peut être choisi comme MET, lorsque les informations disponibles sur ce milieu sont suffisantes. C'est notamment l'option privilégiée dans le cadre de la séquence ERC [40, 126]. Elle peut être assez pratique lorsque les dégradations en présence sont faibles [105].

En parallèle, des informations suffisantes sur un état historique du site n'oblige pas à choisir cet état comme MET du projet : un autre MET adapté au contexte du site peut être retenu.

En particulier, il est possible que les contraintes extérieures au site aient changé depuis la période de l'état historique considéré, et que de ce fait il soit devenu impossible de revenir à cet état historique [79, 105]. En d'autres termes, même en l'absence de dégradation, cet état historique aurait évolué vers un autre état.

Dans tous les cas, les informations disponibles sur les états historiques du site peuvent apporter des éclairages intéressants au moment du choix d'un MET pour le projet de renaturation [80].

Adaptation au changement climatique

Parmi les nouvelles contraintes qui s'appliquent au site, le changement climatique peut avoir exercé et pourra encore exercer une influence locale significative, au moment du démarrage du projet ou plus tard pendant son déroulé. Le choix d'un MET doit donc intégrer les informations disponibles sur cette influence existante ou attendue [78]. Il s'agit notamment de celles fournies par les projections climatiques de référence, issues de « *simulations climatiques régionalisées, réalisées dans les principaux laboratoires français de modélisation du climat* » [127].

En parallèle, et autant que possible, l'usage de renaturation doit constituer un des outils contribuant à réduire l'impact du changement climatique. Un projet de renaturation peut être considéré comme s'inscrivant dans le cadre des solutions fondées sur la nature [78, 128], avec notamment un potentiel de capture du carbone atmosphérique et un potentiel d'atténuation des effets néfastes (ex : réduction des îlots de chaleur, diminution du risque d'inondation).

4.3 Environnement local de référence (ELR)

Une fois un MET choisi, associé à des référentiels génériques caractérisant ses principales composantes, trouver une déclinaison locale permet de faire des mesures pour obtenir une caractérisation plus détaillée du milieu cible retenu comme référence pour le projet, en particulier au niveau du sol. Dans ce contexte, l'appui d'un écologue familier avec les milieux locaux peut apporter des informations pratiques utiles.

Cet environnement local de référence (ELR) constitue l'objectif de la renaturation, selon un principe de spécificité.

Comme pour la caractérisation de l'ELT, la représentativité de l'ELR pourra être augmentée en identifiant et en caractérisant plusieurs déclinaisons locales du MET, en tenant compte du principe de proportionnalité.

Dans certains cas, les décideurs du projet ont dès le départ un souhait d'ELR, un environnement existant qu'ils connaissent aux alentours du site et qu'ils souhaitent reproduire ou retrouver sur le site. Ce cas de figure correspond donc à une version simplifiée de la séquence « choix du MET puis choix de l'ELR » proposée dans la méthode du présent rapport.

Lorsque les moyens disponibles pour le projet ne permettent pas de réaliser des mesures dans un ELR, (ou lorsqu'un ELR n'a pas pu être trouvé à proximité du site), le projet peut retenir le MET visé comme objectif. Les caractéristiques de ce MET peuvent alors être affinées par des dires d'experts (écologues...) basés sur l'état des connaissances du moment (recherches bibliographiques...), et sur la base des informations disponibles sur les milieux historiques du site et autour du site. Par exemple : plateformes de partage de données naturalistes, telles que GéoNat'îdF [129], que le Système d'information sur la biodiversité (SIB) vise à fédérer [130]. Ce cas de figure peut être vu comme une déclinaison du principe de proportionnalité.

En cohérence avec la notion de « bon état écologique » de la directive-cadre sur l'eau (DCE) [131], la proximité de l'état du sol du site avec l'ELR retenu pourrait permettre de caractériser le bon état écologique d'un sol. Ce bon état du sol serait donc relatif, basé sur la comparaison avec un référentiel spécifique à son contexte pédo-bioclimatique.

Dans une logique similaire de mise en regard avec la DCE, la MEB indique que, pour mémoire, « *la renaturation ne recherchera pas nécessairement un retour du sol à son état naturel initial, ce qui en milieu urbain ou industriel reste difficile à atteindre. Un parallèle peut ici être fait avec les masses d'eau fortement modifiées (MEFM) qui sont, selon la directive-cadre sur l'eau, des masses d'eau de surface qui, par suite d'altérations physiques dues aux activités humaines, sont fondamentalement modifiées quant à leur caractère* » [25]. Ceci fait écho à la potentielle impossibilité de revenir à un état historique du site étudié.

Avec cette fois-ci la sémantique issue de la proposition de directive européenne sur la surveillance des sols [17], ce bon état écologique du sol fait écho au concept de « *sol sain* » (section 3.8.4).

4.4 Indicateurs de suivi

Le choix des indicateurs de suivi est souvent un sujet délicat pour les porteurs de projets (section 2), notamment car :

- les coûts associés font partie des principaux freins à la mise en œuvre de projets de renaturation ;
- à l'opposé, la complexité et les multiples dimensions des projets de renaturation invitent à retenir de nombreux indicateurs, afin de permettre une gestion adaptative [128, 132] et de valoriser les résultats obtenus ;
- les valeurs mesurées sont souvent difficiles à interpréter.
La caractérisation d'un ELR proposée dans la présente méthode vise à apporter une réponse à cette difficulté.

De nombreuses sources disponibles dans la littérature scientifique et technique fournissent des listes d'indicateurs applicables à des projets de renaturation [10, 11, 17, 49, 70, 106, 107, 133-143]. À titre d'exemples, plusieurs types d'indicateurs peuvent être considérés (section 2) :

- indicateurs agro-pédologiques. Par exemple : teneurs en argiles, limons, sables, matière organique (teneur et qualité), minéraux (ex : P_2O_5 , K_2O , MgO , azote), capacité d'échange cationique.
Certains indicateurs de ce type font classiquement partie du diagnostic pédologique initial. Leur importance relative dans le suivi dépend du MET retenu ;
- teneurs en polluants à enjeux, mobilité vers les eaux souterraines (lixiviation). Par exemple : éléments traces métalliques (ETM) ;
- bioindicateurs [142]. Notamment :
 - microorganismes. Par exemple : biomasse microbienne, respiration microbienne, ARISA bactérienne et fongique (ADN), ARN environnemental, inventaires (ex : abondance, diversité, équilibre des populations, groupes fonctionnels),
 - nématodes (microfaune). Par exemple : abondance, diversité, équilibre des populations, groupes fonctionnels,
 - collemboles (mésofaune). Par exemple : abondance, diversité, équilibre des populations, groupes fonctionnels,

- macrofaune. Par exemple : insectes, millepattes, araignées, lombriciens (abondance, diversité, catégories écomorphologiques (épigés, endogés, anéciques)),
- oméga 3, pour caractériser la phytotoxicité ;
- transfert des polluants vers les plantes (bioaccumulation) ;
- transfert des polluants vers les escargots (bioaccumulation) ;
- indicateurs caractérisant la végétation (inventaire botanique), et pouvant renseigner indirectement sur certains aspects de l'état du sol (écologie des espèces végétales). Par exemple : pourcentage de couverture végétale, présence ou absence de certaines plantes, abondance et indices de diversité, profondeur racinaire, stade de développement ;
- indicateurs caractérisant les services écosystémiques visés. Par exemple : rafraîchissement de l'air, capacité d'infiltration de l'eau, qualité de l'air, fertilité ;
- indicateurs caractérisant la connectivité écologique.

Ces indicateurs techniques peuvent être complétés par des indicateurs de gouvernance, d'adaptation au changement climatique, de co-bénéfices socio-économiques et d'acceptation citoyenne [28, 106, 128].

Au final, plusieurs dizaines d'indicateurs peuvent s'avérer utiles pour un même projet.

Pour une opération de renaturation donnée, le choix des indicateurs de suivi tient compte de plusieurs critères, notamment :

- les caractéristiques les plus importantes du MET visé, selon un principe de spécificité ;
- la surface du site considéré ;
- les compétences disponibles dans l'équipe projet ;
- la simplicité, la robustesse¹⁹, la sensibilité²⁰ et l'accessibilité²¹ des indicateurs considérés ;
- les moyens disponibles pour le projet : budget, contributeurs, temps...
- le cas échéant, les fonctions ciblées prioritairement, les sous-usages projetés, voire les services souhaités ;
- du principe de proportionnalité, au regard des enjeux en présence.

Cette sélection pourrait inclure un socle de base transversal, à appliquer de manière systématique²² à tout type de projet, complété par des indicateurs spécifiques au MET visé.

Les indicateurs retenus peuvent correspondre à des variabilités temporelles différentes. Par exemple, la variabilité attendue des caractéristiques agro-pédologiques est plus faible que celle liée aux caractéristiques biologiques du site (ex : variations saisonnières). L'élaboration du programme de mesures (état initial et suivi de l'évolution du site) devra donc tenir compte de ces aspects.

Pour les indicateurs associés à une forte variabilité temporelle, les mesures dans l'ELR et sur le site pourront être réalisées au cours d'une même campagne, afin de faciliter les comparaisons, en tenant compte du principe de proportionnalité.

Afin d'homogénéiser les pratiques, et au regard de travaux précédents réalisés par le ministère chargé de l'Écologie [70], la sélection d'indicateurs de suivi peut s'inscrire dans une même structure transversale, basée sur les catégories suivantes :

1. Structure
2. Composition
3. Dégradation
4. Caractéristiques abiotiques

¹⁹ Par exemple : indicateurs normalisés (AFNOR, ISO).

²⁰ Au regard de l'évolution des effets à suivre.

²¹ Par exemple : est-ce faisable par plusieurs laboratoires ? Est-ce que cela correspond pour eux à des prélèvements et analyses de routine ?

²² Faisant écho au projet de directive européenne sur la surveillance des sols.

Une déclinaison du principe de proportionnalité pourrait débiter par choisir au minimum un indicateur pour chacune de ces catégories, ou bien deux pour chacune des trois premières catégories : un indicateur pour le sol et un indicateur pour la végétation.

Puis, en fonction des enjeux et des caractéristiques du MET visé, les indicateurs peuvent être multipliés dans certaines catégories d'intérêt. Par exemple, pour la catégorie composition, les indicateurs retenus pourraient inclure l'abondance et la diversité d'une espèce d'intérêt de la microfaune, de la mésofaune, de la macrofaune et de la végétation.

Puis, toujours en fonction des enjeux et des caractéristiques du MET visé, si pertinent, les indicateurs peuvent être multipliés dans certaines sous-catégories d'intérêt. Par exemple, l'abondance et la diversité de plusieurs groupes appartenant à la macrofaune peuvent être suivies.

Cet approfondissement progressif, ciblé et itératif s'inscrit dans la même logique que celle proposée pour l'approche TRIADE (projet TRIPODE) [10, 133].

4.5 Interventions

Différentes échelles à considérer

En complément des différents degrés d'intervention²³ humaine envisageables (section 4.1), les actions sur le site à considérer peuvent s'inscrire au sein de différentes échelles spatiales. Par exemple, pour augmenter les niveaux des fonctions visées, il est possible d'agir :

- à l'échelle de certaines zones restreintes du site, lorsque celles-ci présentent des besoins d'actions spécifiques. Par exemple : des terres localement compactées ;
- à l'échelle du site du projet, pour se rapprocher des niveaux de fonctions associés à l'ELR (section 4.3) ;
- à l'échelle du territoire, en considérant les possibilités de connexion avec le réseau écologique local²⁴, et en inscrivant le projet de renaturation dans des stratégies thématiques²⁵ ou des démarches locales²⁶. Et ainsi, les actions réalisées sur le site pourront être choisis en lien avec les choix d'aménagement locaux.

Principes généraux

Quelques principes généraux peuvent être considérés dans le choix et dans la manière de mener à bien les interventions associées au projet :

- exclure les espèces exotiques envahissantes (EEV) et les plantes connues pour leur caractère allergisant dans la sélection des espèces végétales ;
- privilégier l'utilisation de ressources locales. Par exemple : terres de récupération (« petit cycle des terres »), semences sauvages prélevées à proximité, espèces déjà présentes sur le site et variété d'espèces locales et adaptées aux caractéristiques du site (label Végétal local) [28, 144] ; anticiper dans la sélection des végétaux l'adaptation au changement climatique ;
- privilégier les interventions qui permettent de contribuer à l'adaptation au changement climatique, en particulier dans les zones présentant des îlots de chaleur urbain ou des risques significatifs d'inondation ;
- tenir compte des écosystèmes présents à proximité du site, notamment les trames vertes et brunes [128, 145] ;

²³ Les actions humaines retenues pour le processus de renaturation, de différents types : ingénieries pédologique, civile, écologique, etc.

²⁴ Ex : augmentation de la taille d'environnements naturels existants, permettant d'accueillir une plus grande diversité d'espèces ; contribution aux corridors écologiques (trames verte et brune, schémas régionaux de cohérence écologique) ; (re)création d'un habitat particulier pour une espèce d'intérêt.

²⁵ Ex : reconquête de la biodiversité, adaptation au changement climatique, etc.

²⁶ Ex : Parc Naturel Urbain (PNU).

- « privilégier des mesures de réparation qui nécessiteraient des mesures de gestion les plus légères possibles, afin de ne pas mettre un milieu « sous intervention humaine » sur du très long terme » [70], dans l'objectif que les écosystèmes visés soient résilients le plus vite possible ;
- plutôt que de tenter de créer des écosystèmes, préférer créer des conditions favorables à l'apparition d'écosystèmes, au moins dans un premier temps.
Ainsi, selon la SER, « les praticiens de la restauration n'effectuent pas le travail proprement dit de rétablissement de l'écosystème. Ils créent plutôt les conditions nécessaires au rétablissement, afin que les plantes, les animaux et les micro-organismes puissent effectuer eux-mêmes le travail de rétablissement » [82].
- privilégier les « mesures sans regret » [106, 146], c'est-à-dire des mesures qui « doivent être flexibles et s'adapter à la production de nouvelles connaissances, ne pas entrer en conflit avec le principe d'atténuation du changement climatique et présenter des bénéfices pour le territoire, quelle que soit la situation future » [147] ;
En particulier, on pourra considérer les co-bénéfices (section 6.1) associés aux différentes solutions fondées sur la nature (SfN) [11, 106, 128, 148, 149] applicables au site.
- Si toutefois des EEV apparaissaient au cours des interventions, maîtriser le risque de développement de ces plantes (parfois aussi appelées « invasives ») [105, 150] ;
- considérer l'opportunité d'utiliser des phytotechnologies pour des zones où la pollution est diffuse ;
- utiliser les résultats fournis par les indicateurs sélectionnés pour alimenter l'apprentissage itératif des processus biologiques en cours sur le site, ainsi que pour permettre une gestion adaptative tout au long du projet.

S'appuyer sur les outils existants

Voici quelques exemples d'outils qui peuvent être utiles aux différents acteurs d'un projet de renaturation.

- Pour la végétalisation, l'outil Sésame - Services ÉcoSystémiques rendus par les Arbres, Modulés selon l'Essence – du Cerema [151] permet « d'éclairer techniciens et décideurs sur l'opportunité de planter, le choix des essences, les pratiques de gestion adaptées » [98].
- Selon l'ARB ÎdF, « en France, la marque Végétal local® [...] permet de proposer des espèces floristiques sauvages adaptées à différentes régions » [28], cette marque de l'OFB se présentant comme « un outil de traçabilité des végétaux sauvages et locaux » [144].
- L'outil Plus fraîche ma ville de l'ADEME vise à « aider les collectivités dans le choix de solutions de rafraîchissement urbain pérennes et durables » [152], proposant notamment des « solutions vertes ».
- L'outil EVNATURB [153] fournit des éclairages aux décideurs, en permettant de tester la mise en œuvre de diverses SfN, et en indiquant leur niveau de pertinence au regard de la gestion des eaux pluviales et de l'atténuation des îlots de chaleur.
- L'outil Floriscope et son système d'informations Végébase (Plante&Cité) visent à aider « tous les professionnels [à] connaître, choisir et trouver leurs végétaux » [154].

Assurer la pérennité des actions de renaturation

Différentes formes de valorisations peuvent être mises en place, notamment sous la forme d'opérations de sensibilisation auprès du public [155]. Ces opérations pourraient décrire les écosystèmes présents sur le site [106], leur valeur intrinsèque et la valeur des services qu'ils apportent aux êtres humains, ainsi qu'informer sur les enjeux liés à la présence de pollution résiduelle, la préservation des sols et à la favorisation de la nature. Ces opérations pourraient notamment s'appuyer sur la création d'un chemin pédagogique, qui permettrait de faire également l'expérience directe de la nature créée ou restaurée, et la pose de panneaux d'information. Ces opérations sont de nature à favoriser l'acceptabilité sociale [156].

L'usage de renaturation donne également lieu à la rédaction d'un mémoire, détaillant les retours d'expériences associés au projet [106]. Par exemple : les diagnostics effectués ; le MET, les indicateurs

et l'ELR retenus ; les interventions et les techniques sélectionnées ; les résultats obtenus et les données de surveillance de l'évolution du site. Ce mémoire est transmis aux autorités (DREAL...) et si pertinent à des organismes (ex : AFB, MNHN...) pouvant capitaliser ce type de retours d'expériences - afin de faire progresser l'état des connaissances sur les actions qui sont efficaces et dans quel contexte – et aux autorités chargées de la gestion des environnements naturels. Ainsi, selon la SER, « *un écosystème restauré fournit des services naturels bénéfiques bien au-delà des limites de propriété. Étant donné que la restauration contribue généralement au bien-être de la population, les organismes publics responsables de la protection et de la gestion des ressources naturelles doivent être tenus informés de tout projet de restauration sur leur territoire, quels qu'en soient le propriétaire et le financement* » [105].

Ce document vise également à conserver la mémoire de l'état des milieux du site [16], qui pourrait donner lieu à des servitudes ou à des restrictions d'usage, dans l'objectif de garantir la pérennité de l'adéquation entre les usages actuels ou les futurs usages du site et l'état de ces milieux [114].

Pour éviter qu'un site renaturé ne soit à nouveau artificialisé [105], la priorité de la nouvelle vocation naturelle du site peut être traduite dans les documents d'urbanisme locaux [157-159], « *par un zonage et des orientations d'aménagement adaptés* » [115], s'appuyant notamment sur des outils de sécurisation avec ou sans acquisition foncière [77, 158]. En complément, selon la Fédération nationale des SCoT, « *les orientations d'aménagement et de programmation (OAP) sont une composante du plan local d'urbanisme qui visent à définir des intentions et orientations d'aménagement qualitatives et peuvent servir à orienter un projet. Les OAP étant une partie intégrante des PLU(i), elles peuvent être facilement utilisées par la collectivité* » [77].

Dans une logique similaire, le règlement européen relatif à la restauration de la nature mentionne : « *Il est important que les États membres mettent en place des mesures visant à ce que les zones couvertes par les types d'habitats relevant du champ d'application du présent règlement et faisant l'objet de mesures de restauration présentent une amélioration continue de leur état jusqu'à atteindre un bon état, et que les États membres mettent en place des mesures visant à ce que, lorsqu'ils ont atteint un bon état, ces types d'habitats ne se détériorent pas de manière significative, afin de ne pas compromettre le maintien ou la réalisation de leur bon état à long terme* » [160].

4.6 Interactions avec les populations riveraines

Opportunité d'acculturation

En France, selon l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), « *huit personnes sur dix résidents dans une unité urbaine et près de cinq sur dix dans une unité urbaine de plus de 100 000 habitants. La population est concentrée dans les plus grandes unités urbaines : une personne sur six vit dans l'unité urbaine de Paris et une sur quatre dans une unité urbaine de plus de 200 000 habitants (hors celle de Paris)* » [161].

Et ainsi, selon le Cerema, « *la biodiversité [...] est très peu connue. De plus, elle est souvent une préoccupation secondaire pour les citoyens, face à des enjeux environnementaux plus globaux* » [162]. Par ailleurs, avec la raréfaction de l'expérience de nature [163-168], qui peut réduire « *la volonté de promouvoir des actions en faveur de la biodiversité* » [116], le Plan Nature en ville constate qu'aux « *freins opérationnels s'ajoutent parfois des freins culturels liés aux difficultés d'acceptation par les citoyens de certaines opérations de reconquête de la biodiversité* » [98]. Face à ces difficultés, l'OFB relaie l'appel de l'IPBES [169] à des « *changements transformateurs* », qui « *concernent notamment nos représentations du vivant, nos relations au vivant* » [170].

En matière de sites et sols pollués, les démarches de gestion mises en place s'appuient sur les principes suivants : prévenir les pollutions futures ; mettre en sécurité les sites nouvellement découverts ; connaître, surveiller et maîtriser les impacts ; traiter et réhabiliter en fonction de l'usage puis pérenniser cet usage ; garder la mémoire ; impliquer l'ensemble des acteurs. Dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués [16], il est explicitement dit que pour réaliser les diagnostics appropriés, il faut s'assurer « *l'implication des populations, des différentes parties prenantes [...] tant pour connaître les usages des sols et des milieux que pour accéder aux lieux considérés* » [171].

Dans ce contexte, intégrer des actions d'acculturation des populations dans un projet de renaturation peut favoriser son acceptation [172], composante essentielle de la pérennité de la renaturation.

Ces actions d'acculturation peuvent inclure :

- des débats, des ateliers et des conférences de sensibilisation aux enjeux liés à la présence de pollution résiduelle, à la préservation des sols et au besoin de contact avec la nature ;
- une présentation des écosystèmes présents sur le site avec, quand cela est possible, une visite de la zone renaturée ;
- un descriptif des services écosystémiques créés ou augmentés par le projet de renaturation ;
- des événements publics pour fêter le démarrage de certains travaux ou l'atteinte de certains résultats.

Possibilités de participation citoyenne

Impliquer les populations riveraines est complément intéressant à une démarche d'acculturation [162], avec de potentielles synergies. Selon le Laboratoire d'initiatives foncières et territoriales innovantes (LIFTI), « *on peut utilement introduire des espaces de co-production et de dialogue. Ce peut-être par exemple un atelier de construction de vision urbaine « dessine-moi ta friche dans 5 ans », un atelier mémoire, ou encore un comité de gestion riverain, susceptible de se réunir tout au long du projet pour faciliter le travail d'interface* » [24].

Pour certains types de travaux, les populations riveraines pourraient aussi participer à la mise en œuvre et au suivi [80, 93, 105, 106]. D'après l'ARB ÎdF, « *la crise écologique, matérialisée par les changements climatiques et l'érosion de la biodiversité, produit souvent un sentiment individuel d'impuissance. S'inscrire dans une approche participative de désimperméabilisation et de renaturation peut permettre aux citoyens et citoyennes de s'investir concrètement et d'avoir un impact réel sur leur environnement quotidien. C'est aussi une façon de leur proposer de se réapproprier l'espace public* » [28].

Cette participation citoyenne peut prendre plusieurs formes. Par exemple [162] :

- réaliser des enquêtes (questionnaires, entretiens individuels) pour collecter les avis et les suggestions ;
- organiser des ateliers de co-construction pour certaines composantes du projet ;
- mettre en place des chantiers participatifs ;
- organiser un suivi naturaliste s'appuyant sur des programmes de sciences participatives, par exemple en s'appuyant sur :
 - les protocoles proposés dans le programme Vigie-Nature du MNHN [134] ;
 - le réseau de sciences participatives animé par l'association française pour l'étude des sols (AFES) [173, 174] ;
 - l'application INPN Espèces, qui permet de participer à l'inventaire national des espèces vivantes [175].

Selon l'ARB ÎdF, « *couplées à un accompagnement et une médiation par une association locale, les sciences participatives sont également un bon moyen de valoriser les résultats d'un projet de renaturation auprès de la population* » [28].

Plus généralement, le Conseil économique, social et environnemental (CESE) souligne que « *les « expériences de nature » doivent être soutenues, notamment grâce aux sciences participatives, [...] afin de reconnecter avec la nature une population majoritairement urbaine* » [176].

L'encouragement récent à créer et pérenniser des laboratoires vivants (Living Lab) - un dispositif qui permet de faire se rencontrer différentes populations (élus, décideurs, riverains, scientifiques, etc.) - est un outil d'acculturation et de participation citoyenne qui se base sur une démarche d'innovation participative engendrant notamment de nouvelles dynamiques sociales, des connaissances et des actions collectives.

Opportunité d'une présence humaine sur le site

La densification des zones urbaines pose de nombreux défis, dont celui de l'accès à la nature. D'après le ministère chargé de l'Écologie, « *la densité peut être optimisée pour faciliter l'accessibilité aux services et activités, tout en améliorant le cadre de vie de nos concitoyens, notamment en renforçant la présence de la nature en ville. [...] La nature en ville est un enjeu d'acceptabilité sociale de la densification* » [177]. Dans une logique similaire, le Plan Nature en ville souligne que « *pour rendre [la densification] vivable, tant pour les humains que les non humains, le développement d'espaces de nature est indispensable* » [98].

Or les zones urbaines actuelles peuvent significativement manquer d'espaces de nature. Par exemple, en Île-de-France, selon les données du Plan vert (2017), 919 communes sont considérées comme carencées²⁷ en espaces verts [178], « *la place accordée à la nature étant aujourd'hui insuffisante dans la plupart des espaces urbains* » [98].

Projet Extra-Zn - 2023

Le projet Extra-Zn [179], piloté par l'Ineris et subventionné par l'ADEME, a porté sur la production de biomasses enrichies en zinc par phytoextraction pour l'écocatalyse.

Dans le cadre de ce projet, une enquête sociologique a été menée pour connaître les réactions des riverains du site face à cette expérience de phytomanagement. La méthode retenue a été celle des *focus groups*²⁸.

Voici quelques extraits du rapport, à titre illustratif :

« les participants ont associé les espaces verts présentés dans les photos à des lieux de sociabilité et de repos [...] Les photos E à G, représentant des lieux calmes, ont été vus comme une échappatoire aux inconvénients de la vie urbaine (estimée dense, fermée, bruyante, stressante, oppressante...). La photo H, symbolisant l'absence d'esthétisme et la pauvreté de ce genre de plantations, a été rejetée pour ces raisons par les deux groupes. [...]

Ce second exercice a montré que, quelle que soit l'expérience de phytomanagement entreprise, il est nécessaire de se préoccuper d'esthétisme si l'on veut qu'elle connaisse une bonne réception de la part des riverains. Des espaces verts calmes qui favorisent la vie sociale et présentent une diversité de plantes sont spontanément appréciés, contrairement aux espaces de plantation trop uniformes, jugés peu attractifs » [179].

Une des idées clés issues de la phase de collecte de retours d'expériences (section 2) est l'importance de considérer la possibilité d'une présence humaine dans le cadre d'un usage de renaturation. Pour mémoire, les arguments associés étaient les suivants :

- souhait d'élus locaux que les populations locales puissent se réappropriier le site ;
- augmentation de l'acceptabilité sociale du projet ;
- possibilité d'opérations de sensibilisation aux enjeux liés au contact avec la nature et de la pollution des sols.

Dans cette logique, un projet de renaturation peut avoir pour objectif de « *favoriser les usages et permettre une ré-appropriation de la nature et de la biodiversité par les citoyens* » [106].

Les bénéfices pour la santé associés au contact avec la nature constituent un autre argument en faveur d'une présence humaine sur un site en cours de renaturation, d'autant plus important que plusieurs interviewés ont souligné que les aspects sanitaires restaient la motivation prépondérante, à ce stade, dans la gestion des sites pollués. Si la perception de la valeur intrinsèque des écosystèmes reste à faire

²⁷ Surface par habitant, accessibilité en proximité.

²⁸ La méthode des *focus groups* [180] consiste à réunir dans un groupe 6 à 12 personnes concernées par une question particulière et à les faire échanger sur tous les aspects de celle-ci. Les chercheurs sont chargés à la fois de l'animation du groupe et de l'analyse de ce qui s'y dit.

progresser, il est possible de s'appuyer dès maintenant sur des motivations sanitaires pour appuyer un projet de renaturation [181, 182].

Au regard de la définition de la santé par l'Organisation mondiale de la santé (OMS)²⁹, l'amélioration du cadre de vie est un premier sujet à enjeu. Sur ce thème, selon les auteurs d'une revue de littérature scientifique portant sur l'ensauvagement urbain [166], ce dernier « *promeut des activités humaines moins interventionnistes et plus attentives aux milieux naturels spontanés, mais ne signifie pas pour autant l'absence de présence humaine. Au contraire, notre synthèse de littérature révèle que les espaces sauvages urbains peuvent contribuer à améliorer le cadre de vie des citoyens, en créant des interactions et des expériences qualitatives autour de la nature* » [116].

Contact avec la nature : effets bénéfiques pour la santé

L'intérêt pour l'influence de la nature sur la santé a été appuyé, tout particulièrement, par la popularisation en 2005 du concept de « services écosystémiques » par l'Évaluation des écosystèmes pour le Millénaire de l'Organisation des Nations unies (ONU) [53]. Cette évaluation a notamment relié la santé humaine à la biodiversité et aux fonctionnements des écosystèmes [183].

Dans cette logique, l'UICN précise : « *Le concept de SfN reconnaît que la conservation de la biodiversité et la protection des services écosystémiques sont essentielles aux divers aspects du bien-être humain, y compris la santé humaine* » [132] ; et ailleurs [128], « *un consensus scientifique croissant a permis de montrer que « la nature est essentielle à l'existence humaine et à une bonne qualité de vie » [184]* ».

D'après l'AEE, « *les voies par lesquelles les environnements naturels sont bénéfiques pour la santé sont l'exercice physique, la relaxation et la restauration, la cohésion sociale et le soutien du système immunitaire* » [103]. Il s'agit des mécanismes les mieux documentés, et plusieurs autres sont appuyés par des niveaux de preuves variables [60, 104, 185-193].

En termes d'effets mesurés, par exemple, l'exposition aux espaces verts est associée à une réduction de la mortalité et de la morbidité dues à de nombreuses maladies chroniques, à une amélioration de la santé mentale, à une amélioration de l'issue des grossesses et à une réduction du niveau d'obésité.

L'AEE souligne aussi que, du point de vue sociétal, l'accès aux espaces verts favorise la cohésion communautaire, réduisant notamment l'isolement social des groupes minoritaires et des personnes âgées.

Par ailleurs, des actions de participation citoyenne pourraient également contribuer à réduire le sentiment d'impuissance, et ainsi à mieux gérer les ressentis d'éco-anxiété [194] et de solastalgie [195].

Comme le souligne une revue de littérature de Plante & Cité, datée de 2021 et intitulée Effets bénéfiques des espaces de nature en ville sur la santé, « *bien qu'il existe encore certaines divergences théoriques et méthodologiques parmi les travaux scientifiques, au vu du nombre conséquent de résultats il est aujourd'hui considéré que la preuve des effets bénéfiques des espaces de nature en ville sur la santé des citoyens n'est plus à fournir* » [188].

Au-delà des mécanismes d'influence plus ou moins bien connus à ce stade, si plus de contact avec la nature est associé à un risque plus faible de maladies, alors on peut faire l'hypothèse que ces maladies ne sont pas seulement liées aux environnements modernes très transformés, incluant l'exposition à des environnements pollués. En changeant de perspective, ces maladies pourraient être aussi liées à la privation de contact avec la nature.

En ce sens, certains auteurs font l'hypothèse que le contact avec la nature est un besoin de base de l'être humain [196-200]. L'OFB résume ainsi : « *Les expériences de nature sont indispensables à tous*

²⁹ Selon le Préambule de 1946 à la constitution de l'OMS, la santé est un « *état de complet bien-être physique, mental et social et ne consiste pas seulement en une absence de maladie et d'infirmité* ».

les âges de la vie » [201] ; et Santé publique France ainsi : « *Faire de la protection de la biodiversité un enjeu de santé publique est une nécessité car une nature "en bonne santé" est essentielle à la (sur)vie des êtres humains* » [202].

Maîtrise du risque de nuisances

La présence de nature en ville peut être associée à des préoccupations concernant le risque de nuisances liées à certaines espèces [28, 98, 128, 176, 189]. Ces préoccupations concernent les populations visitant le site et les populations riveraines. Par exemple :

- allergies liées à certaines plantes ;
- maladies transmissibles par certains animaux ;
- « *certaines aspects des espaces sauvages, comme la végétation dense qui réduit la visibilité, peuvent engendrer de l'anxiété ou un sentiment de négligence et d'abandon* » [116].
Plus généralement, les friches industrielles peuvent symboliser, « *aux yeux des anciennes familles ouvrières (comme des habitants et des commerçants du voisinage), le chômage, la crise économique, la jeunesse désœuvrée, la fin de façons de vivre et de manières d'être* » [73].

Certaines de ces préoccupations sont fondées, d'autres sont basées sur des informations inexacts. Pour ces dernières, les opérations de sensibilisation considérées plus haut pourront être une réponse de première approche, notamment si elles incluent des retours d'expériences issus de projets similaires. Pour les autres préoccupations, il pourra s'agir de trouver la meilleure articulation entre les différents enjeux en présence, incluant :

- la sécurité sanitaire des riverains, qui peut se traduire par exemple par une liste de plantes à éviter, car connues pour leur pouvoir allergisant, en complément de la démarche de maîtrise des sources de pollution ;
- la diversité des écosystèmes issus du projet de renaturation, qui peut également se traduire par une liste d'espèces locales ;
- l'adaptation au changement climatique, qui peut ici aussi se traduire par une liste d'espèces adaptées aux prévisions des projections climatiques locales.

Ces exemples illustrent que plus les besoins en présence sont nombreux, plus le nombre de listes à croiser peut augmenter, diminuant ainsi l'ampleur du résultat obtenu par croisement. Par conséquent, une démarche de compromis proactive [60], le plus tôt possible au sein du projet de renaturation, sera probablement nécessaire dans certaines situations, ce qui plaide à nouveau pour créer des liens forts entre le projet de renaturation et les populations en présence.

Néanmoins, d'une manière générale, le bon fonctionnement des écosystèmes favorise la compétition interspécifique, ce qui peut contribuer à limiter la prolifération des espèces problématiques (ex : moustiques...) [155].

Par ailleurs, des interventions légères devraient pouvoir répondre à de potentiels sentiments de négligence et d'abandon. Par exemple : « *la création de chemins bien tracés, de petites zones récréatives gérées ou l'installation de petits mobiliers pour signaler que les espaces sauvages urbains restent accessibles pour les habitants et ne sont pas abandonnés* » [116], panneaux d'information, etc.

Concernant les risques de « *disservices* » à forts enjeux, des indicateurs de suivi spécifiques peuvent être mis en place en complément [106].

Plus généralement, une gestion de projet adaptative et participative devrait permettre de réduire le risque de nuisance, mesurée et perçue, en complément de la prise en compte de ces aspects dans la phase de conception du projet.

L'ensemble de ces éléments s'inscrit dans la logique de la « *stratégie de communication* » indiquée dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués : « *Préalablement aux travaux puis*

tout au long de la démarche, notamment si les opérations de réhabilitation sont susceptibles de conduire à des nuisances [...], la mise en place d'une communication et d'échanges réguliers avec les riverains apparaît incontournable de même que la désignation d'un interlocuteur identifié » [16].

4.7 Usage de renaturation et Plan de gestion

Cohérence avec la logique et le contenu du Plan de gestion

L'usage de renaturation constitue un des usages qui peut être retenu [1, 2] dans le cadre du Plan de gestion de la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués [16]. En ce sens, la démarche méthodologique décrite dans le présent rapport vise à s'inscrire dans la démarche du Plan de gestion, en tant qu'une de ses composantes potentielles. En particulier, ce nouvel usage vient augmenter les options pouvant être considérées dans les « *études des scénarios de gestion* » [16].

Comme pour les autres usages associés au Plan de gestion, l'usage de renaturation tel que décrit dans ce rapport présente les caractéristiques types suivantes :

- Il fait l'objet d'un choix multicritère en entrée du Plan de gestion, un choix proposé par le gestionnaire du site aux autorités locales.
Ce choix multicritère s'appuie notamment sur :
 - la réalisation de différents types d'études préalables, pouvant intégrer le résultat de campagnes de terrain ;
 - l'identification des enjeux en présence, incluant les « *ressources naturelles à protéger* » [16] ;
 - l'état écologique du site, incluant « *les possibilités de régénération ou d'atténuation naturelle des milieux* » [16] ;
 - la prise en compte des contraintes et des documents d'urbanisme applicables.
- Il est associé à différentes possibilités de techniques d'intervention, qui peuvent être comparées avec un bilan coûts-avantages.
- Il peut conduire à des restrictions d'usages, pour le site entier ou pour certaines zones du site. Par exemple : interdiction d'accès, restrictions de certaines activités pouvant endommager les écosystèmes.
- Il tient compte de potentielles variations spatiales dans les niveaux de pollution présents sur le site.
- Il se base sur des objectifs de réhabilitation : la démarche décrite dans ce rapport propose que ces objectifs soient des caractéristiques propres à l'ELR.
Ces caractéristiques sont décrites avec une sélection d'indicateurs.
L'évolution attendue des mesures de ces indicateurs peut être caractérisée par certaines étapes clés, qui peuvent servir à la définition de contrôles de l'efficacité des interventions réalisées.
Et ainsi, le Plan de gestion associé à un usage de renaturation peut être « *progressif, itératif, évolutif tout en étant interactif avec les données acquises et les orientations envisagées* » [16].
- Il inclut un programme de surveillance, spécifique à l'état actuel du site et à l'ELR visé.
- Il est associé à des mécanismes de conservation de la mémoire.

Les schémas conceptuels associés à l'usage de renaturation constituent d'autres caractéristiques importantes : ils sont décrits dans la session suivante.

Scénarios d'exposition associés à l'usage de renaturation

Par homogénéité avec le guide de l'Ineris sur les usages [2], les scénarios d'exposition humaine liés à l'usage de renaturation (Tableau 7) sont décrits par :

« - *les éléments potentiels constitutifs d'un aménagement ou d'un projet de construction (par exemple : bâti, espaces verts, parkings, type d'installation, etc.)*,

- *les usages des milieux d'exposition dans le périmètre du site*,

- le type de populations fréquentant ces aménagements (adultes et/ou enfants, résidents, personnes fréquentant régulièrement ou occasionnellement les lieux (visiteurs) ou travailleurs),
- les voies d'exposition des populations ».

Tableau 7 : Usage de renaturation : potentielles expositions humaines associées

Éléments constitutifs de projets d'aménagement		Usages des milieux	Populations exposées	Voies d'exposition
Friches ³⁰ (ex : terrains inutilisés)	Accès interdit au public (ex : réserve naturelle intégrale ; libre évolution jusqu'à la forêt)	Activités de gestion occasionnelles	Travailleurs gestionnaires du site	Inhalation de vapeurs et de particules de sol en suspension (ré- envol)
	Chemins balisés faits de matériaux non pollués et visant à éviter le contact avec le sol ³¹ (ex : espace naturel sensible)	Activités d'entretien et de gestion régulières	Travailleurs gestionnaires du site	Ingestion non intentionnelle de sol (contact mains-bouche)
		Visite pédagogique, promenade ; occasionnelle ou régulière	Adultes et enfants visiteurs - population générale	Inhalation de vapeurs et de particules de sol en suspension (ré- envol)
Espaces de nature (de nature ordinaire à nature à forts enjeux écologiques)	Usage récréatif de plein air, occasionnel ou régulier. Ex : parcs, aires de jeu.	Adultes et enfants - population générale	Inhalation de vapeurs et de particules de sol en suspension (ré- envol) Ingestion non intentionnelle de sol (contact mains-bouche)	
	Usage résidentiel, incluant un jardin d'agrément (non potager)			
	Usage d'accueil de populations sensibles. Ex : aires de jeu et espaces verts intégrés dans des établissements			
Terres cultivées (ex : agriculture à visée non alimentaire : productions horticoles, énergétiques...)	Usage agricole (non alimentaire) avec gestion écologique du terrain, non destructrice des écosystèmes	Travailleurs agricoles, usagers de jardins privés (adultes et enfants)	Inhalation de vapeurs et de particules de sol en suspension (ré- envol) Ingestion non intentionnelle de sol (contact mains-bouche)	

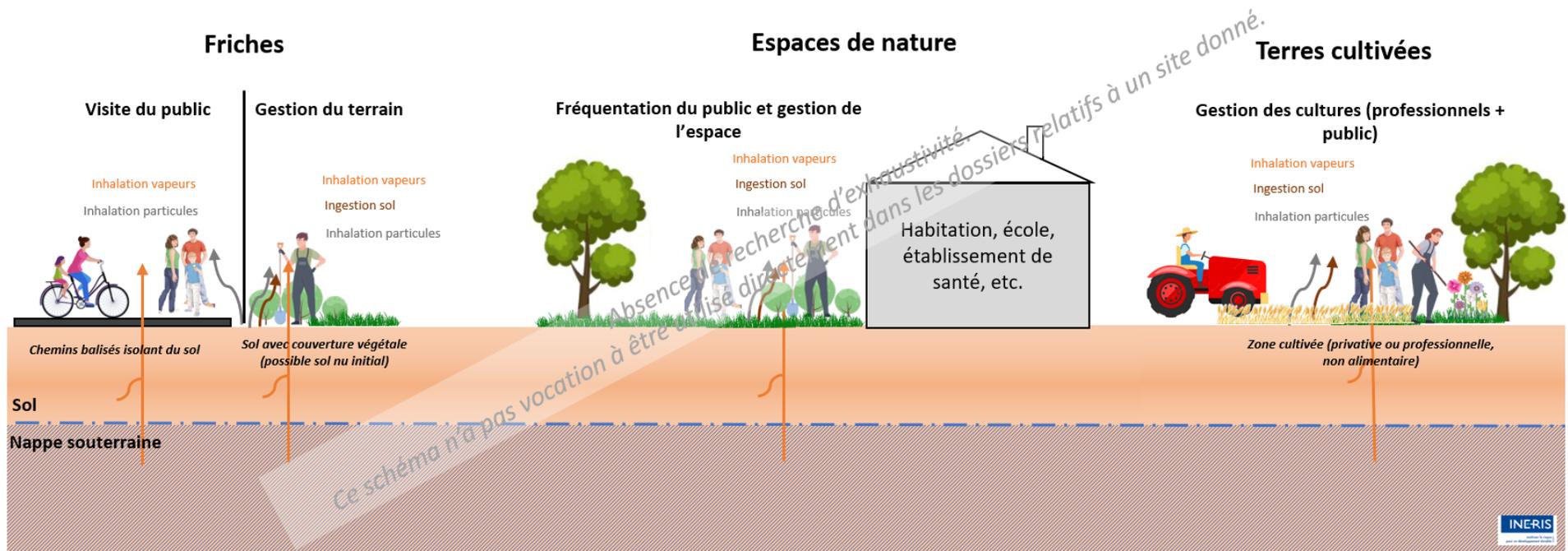
En cohérence avec le décret n°2022-1588, l'usage de renaturation est considéré indépendamment ou concomitamment avec d'autres usages sur un même site. Par exemple : usage récréatif de plein air, usage résidentiel, usage d'accueil de populations sensibles, usage agricole.

Dans le cadre de ce rapport, les expositions considérées sont celles associées spécifiquement à l'usage de renaturation (Tableau 7, Figure 11). Les expositions associées aux autres usages ont été décrites dans un rapport précédent de l'Ineris [2].

³⁰ D'après le site Infoterre [14], une friche se définit comme un « site inutilisé, éventuellement dégradé par la présence d'installations, de déchets, d'une pollution avérée ou suspectée et dont l'état, la configuration ou l'occupation totale ou partielle ne permet pas de retrouver un usage [autre que l'usage de renaturation] sans un aménagement ou des travaux préalables ».

³¹ Par exemple, ce chemin peut être « revêtu » ou « recouvert », le guide Ineris sur les usages de 2023 [2] définissant ces deux termes ainsi : « Un sol est réputé revêtu si sa structure de surface est réalisée à l'aide d'asphalte, d'enrobés bitumeux, d'enduits superficiels d'usure, de béton, de ciment ou de pavés jointoyés par un matériau lié. » et « Un sol est réputé recouvert s'il est recouvert par au moins 30 cm de matériaux naturels ou équivalents, supposés être sains. »

Concernant ces multiples usages sur un même site, Catherine et Raphaël Larrère proposent « *un autre regard sur les activités humaines* » [73] : « *La bonne nouvelle de l'écologie contemporaine est de réinscrire les hommes et leurs activités dans la nature et de montrer qu'il n'y a pas nécessairement contradiction entre les besoins et aspirations des humains et leur environnement naturel. On peut donc s'acheminer vers une façon d'habiter la nature sans la détruire. Certains ont même parlé d'« écologie de la réconciliation »* » ou encore de « Win-Win Ecology » [203], ou encore d'« éthique du partenariat » [204].



Sans échelle

Figure 11 : Schémas conceptuels associés à l'usage de renaturation

5 Typologie d'aménagements pour l'usage de renaturation

Au regard des éléments de définition ci-dessus, des réflexions en cours et des retours d'expérience disponibles, les types d'aménagement pouvant correspondre à un usage de renaturation sont a priori des aménagements de pleine terre qui se réalisent sur des espaces naturels existants ou en devenir sur des espaces artificialisés (avec une intention écologique), tels que :

- les espaces à moyenne et forte naturalité [117, 205, 206], biodiverses initialement ;
- les terrains inutilisés (friches), initialement imperméabilisés ou non ;
- les espaces de nature ordinaire (ex : pelouse, arbres d'alignement avec des espèces indigènes), *a priori* peu biodiverses initialement ;
- les espaces verts horticoles et décoratifs, même si peu biodiverses initialement ;
- les espaces agricoles (en complément d'un usage agricole, il est possible de créer ou renforcer des habitats et d'enrichir l'écosystème par l'usage de renaturation³²) ;
- les espaces déconstruits ;
- les espaces verts présentant initialement trop peu de pleine de terre (« coefficient de pleine terre » trop faible) pour pouvoir assurer le bon fonctionnement de l'écosystème en présence.

À l'inverse, le champ de l'usage de renaturation n'inclut pas :

- des espaces verts hors sol et dont la finalité est uniquement d'embellir l'espace urbain, sans objectif écologique. Par exemple : toitures végétalisées, espaces végétalisés sur dalle, murs végétalisés modulaires, bacs plantés, massifs horticoles, arbres d'alignement sans connexion par le sol et avec des essences non indigènes ;
- les zones présentant uniquement des revêtements imperméables, sans projet de désimperméabilisation ;
- les espaces gérés avec des pratiques non écologiques et destructrices des écosystèmes.

A priori, les aménagements qui vont contribuer à l'obtention d'un gain écologique et social maximal seront ceux réalisés sur les espaces minéralisés, qui se concentrent en particulier en milieu urbain.

Les exemples ci-après illustrent certains aménagements correspondant a priori à l'usage de renaturation :

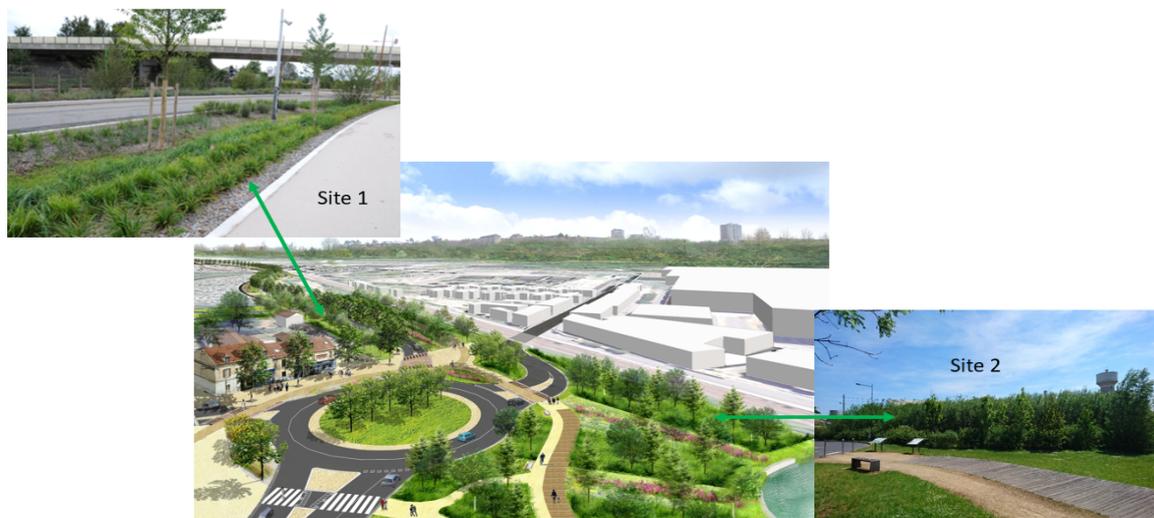
Projet Cœur-Vert (Carrières-sous-Poissy) – portage : département des Yvelines

Exemple d'étrépage de terres polluées (métaux) sur 30cm de profondeur et 55ha, mise en merlon des terres étrépees sur 15km et reboisement par plantation d'arbustes et d'arbres locaux adaptés aux conditions pédo-biogéoclimatiques (phytostabilisation). L'étrépage des terres a permis sur le sol laissé en place l'expression d'une banque de graines limitant l'expansion d'une espèce exotique envahissante. L'usage envisagé est un espace naturel sensible ouvert au public.



³² Le décret n°2022-1588 envisage cette possibilité de plusieurs usages sur un même site.

Projets PHYTOAGGLO et Extra-Zn (Montataire, Creil) – portage : communauté d’agglomération Creil-Sud-Oise



Exemple de création d’une noue végétalisée (site 1) de 100 m de long pour la récupération des eaux de ruissellement sur sol pollué (métaux) et couverture du sol par une herbacée dense et pérenne issue d’une pépinière locale (phytostabilisation) ; exemple de création d’un espace paysager (site 2) sur 850m² de sol pollué (métaux) et couverture du sol par deux espèces végétales extrayant le Zn et le Cd (phytoextraction). Pour limiter l’accès au site, il est entouré d’une barrière végétale.

Projets Nature en ville (Bordeaux) – portage : ville de Bordeaux

Stratégie pour une ville naturelle et apaisée. Exemples d’aménagement de quartier, de rues, de places, etc. suite à des opérations de désimperméabilisation et de création d’espaces de nature, non accessibles au public.





Projets gestion de l'eau - Gestion des eaux pluviales et biodiversité, Revue bibliographique et préconisations, 2020, Agence Régionale de la Biodiversité IdF.

Exemples d'ouvrages de gestion des eaux pluviales ayant pour avantage de se rapprocher du cycle naturel de l'eau, en s'appuyant sur l'infiltration directe dans les sols et la création de multiples espaces végétalisés.



6 Développer l'usage de renaturation en France

L'usage de renaturation a été introduit dans la réglementation française par le décret n°2022-1588, entré en vigueur au 1er janvier 2023. Dans ce nouveau contexte, quelles seraient les raisons de choisir cet usage dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués ?

Cette section vise à présenter plusieurs atouts de l'usage de renaturation, à considérer au moment du choix multicritère du futur usage d'un site pollué.

Ces atouts sont variés et peuvent intéresser l'ensemble des porteurs de projets (ex : collectivités, entreprises, services de l'État), directement ou indirectement.

6.1 Arguments en faveur du choix de l'usage de renaturation

Valeur intrinsèque de la nature

D'après le ministère chargé de l'Écologie, en moyenne lors de la dernière décennie, 24 000 ha/an d'espaces naturels, agricoles et forestiers ont été urbanisés en France, « *soit près de 5 terrains de football par heure* » [177].

Aujourd'hui, de nombreuses personnes considèrent que la nature possède une valeur en elle-même, « *intrinsèque* » [202], « *indépendante de son utilité mesurable* » [176]. Dans ce contexte, il est logique d'accorder de la valeur à des projets qui visent à réhabiliter et à promouvoir les environnements naturels.

D'après Catherine et Raphaël Larrère, « *que l'on en appelle à notre responsabilité à l'égard des générations futures ou au respect de la nature, on s'accorde généralement à reconnaître que cette prise de conscience a une dimension morale. La Charte de la Nature des Nations unies proclame ainsi « que toute forme de vie est unique, et mérite le respect, indépendamment de ce qu'elle vaut pour l'homme »* » [207].

Pour Carver *et al.*, la reconnaissance de la valeur intrinsèque de toutes les espèces et de tous les écosystèmes est un des « *principes directeurs* » de la renaturation : « *Bien qu'il soit de plus en plus reconnu que les écosystèmes naturels et les espèces qu'ils abritent fournissent des biens et des services précieux à l'homme, la nature sauvage a sa propre valeur intrinsèque que l'humanité a la responsabilité éthique de respecter et de protéger* » [78].

Et face à « *l'effondrement de la biodiversité* » [169, 208, 209], se contenter de protéger certaines espèces et certains écosystèmes d'intérêt apparaît insuffisant [80] : la restauration d'écosystèmes dégradés est également nécessaire [120, 160, 210-213]. Selon le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), « *il n'a jamais été aussi urgent de restaurer les écosystèmes endommagés* » [212].

Dans cette logique, Paul Taylor parle de « *justice restitutive* » et considère que les opérations de restauration renvoient à un devoir de réparation [214].

Cette valeur intrinsèque de la nature peut conduire à plusieurs dispositifs de valorisation de projets, en fonction du type de porteur. Par exemple :

- Contribution à la bonne image d'une entreprise auprès de ses clients, une image d'« entreprise responsable » au regard de certains des enjeux les plus importants de notre époque, tels que ceux soulignés par l'IPBES [169, 215].
Par exemple, un projet de renaturation peut s'inscrire dans une démarche RSE (responsabilité sociétale des entreprises), qui « *désigne la contribution des entreprises aux enjeux du développement durable* » [216]. Selon la norme ISO 26000 [217], l'« *environnement* » en est une des thématiques centrales.
- Valorisation dans des démarches de labellisation ou de concours thématiques. Par exemple : ÉcoQuartier, Capitale française de la Biodiversité, Trophée de l'adaptation au changement climatique, Territoires engagés pour la nature, Prix national du génie écologique.

D'après le Plan Nature en ville, « *la protection du vivant par le maintien, la préservation, la restauration et le développement des fonctions écologiques en milieu urbain est une nécessité en soi. Ce renforcement des écosystèmes et de leurs fonctionnalités écologiques est aussi directement une condition pour l'habitabilité des villes* » [98].

Multiples (co)bénefices

Un projet de renaturation peut viser certains bénefices spécifiques, au regard des écosystèmes considérés. En pratique, d'autres bénefices sont généralement produits par la même occasion : ils sont couramment appelés « cobénéfices ». D'après le Plan Nature en ville, « *il est désormais parfaitement documenté que partout où elle existe, la biodiversité urbaine apporte des cobénéfices essentiels* » [98].

Au global, un projet de renaturation peut donc simultanément apporter ou contribuer à des bénefices dans de nombreux domaines [48, 52, 98, 139, 149, 155, 185, 218-222]. Par exemple :

- atténuation et adaptation au changement climatique. Notamment :
 - stockage du carbone par les sols et les végétaux, en particulier par les arbres,
 - réduction du ruissellement et donc limitation des impacts liés aux inondations,
 - diminution de l'ampleur des îlots de chaleur urbains, voire apport d'îlots de fraîcheur urbains, par exemple via l'interception du rayonnement solaire (ombrage) ou l'évapotranspiration des feuilles et du sol (rejet de vapeur d'eau). Et ainsi, « *en apportant de la nature dans les villes, la température urbaine peut baisser localement de 3 à 5°C grâce à l'ombrage apporté et à l'augmentation de l'humidité de l'air par évapotranspiration* » [98] ;
- restauration de continuités écologiques ;
- gestion de l'eau. Par exemple :
 - filtration améliorant sa qualité,
 - infiltration améliorant la gestion des eaux pluviales (ex : moins de débordement de stations d'épuration vers les cours d'eau) et la recharge des nappes d'eaux souterraines ;
- gestion des risques naturels. Par exemple : inondations, glissements de terrain ;
- préservation et promotion de la biodiversité ;
- économie de ressources (terres polluées gérées *in situ*, sans excavation et mise en site de stockage de déchets) ;
- valorisation d'un foncier pollué (ex : changement d'image) ;
- qualité paysagère du quotidien, « *qui façonne l'identité et l'attractivité d'un territoire* » [98] ;
- qualité de l'air. Par exemple :
 - zone présentant peu de sources de pollution ;
 - réduction (limitée) des concentrations en certains polluants. Par exemple : particules PM₁₀, ozone, oxydes d'azote ;
- pollinisation ;
- santé et bien-être des populations locales :
 - favorisation de pratiques d'activités physiques et de détente,
 - amélioration de la santé mentale (ex : « *corrélation établie avec les taux d'anxiété et de dépression* » [98]),
 - usages récréatifs (certains auteurs parlent d'« *un commun récréatif* » [74]),
 - interactions sociales,
 - expériences esthétiques,
 - brassage de différentes catégories de population ;
- lutte contre le bruit en zone urbaine. Par exemple :
 - zone présentant peu de sources de bruit ;
 - atténuation (limitée) du bruit routier ;
- production agricole non alimentaire ;
- activités liées au tourisme ;
- contrôle biologique d'espèces jugées nuisibles ;
- création d'emplois non délocalisables.

Comme le rappellent Bispo et al. [44], la valeur associée aux services écosystémiques [223] peut faire l'objet d'une évaluation économique et aussi d'une évaluation sociale, en lien avec l'« *importance accordée par les individus* » (Figure 2).

L'ampleur de cette liste fait écho à la notion d'action « *sans regret* » [24, 146, 147, 221, 224] : même si le principal bénéficiaire visé ne peut finalement pas être complètement atteint, l'action mise en œuvre aura probablement créé de nombreux autres co-bénéficiaires.

Et ainsi, cette grande diversité de bénéfices potentiels peut favoriser l'acceptabilité de projets de renaturation pour de nombreux types de parties prenantes. En particulier, d'après le Plan Nature en ville, « *les espaces de nature constituent un bien commun de la structure urbaine et leur absence est un facteur d'aggravation des vulnérabilités socio-urbaines, identifié notamment dans les territoires prioritaires de la politique de la ville, souvent peu végétalisés. Il répond à un besoin sociétal plébiscité : 92% des Français estiment qu'il n'y a pas assez de « nature en ville* » » [98].

D'après la Fédération nationale des SCoT, avec une vision plus centrée sur l'échelle du projet, « *la mise en œuvre de la renaturation sera d'autant plus comprise et acceptée par les acteurs du territoire si elle permet justement d'améliorer ces services écosystémiques* » [77].

Synergies et logique One Health

Le contenu d'un projet de renaturation peut être l'occasion de mettre en synergie les réponses à différents enjeux majeurs [120, 128, 160, 176, 215, 225, 226] :

- protection et promotion de la biodiversité³³ ;
- atténuation et adaptation au changement climatique ;
- réduction des expositions à des pollutions environnementales.

En ce sens, le PNUE et la FAO mettent en avant que « *ce n'est qu'avec des écosystèmes sains que nous pourrions améliorer les conditions de vie des populations, lutter contre les changements climatiques et mettre fin à la perte de biodiversité* » [212]. De même, l'OFB, l'UPGE et la Fédération Nationale des SCoT soulignent que « *en mobilisant les outils de reconquête de la nature en ville, la conjugaison entre stratégie territoriale et urbanisme opérationnel est une réponse aux défis climatiques, sanitaires et écologiques* » [220].

L'UICN élargit le champ des synergies possibles en identifiant sept « *défis sociétaux* » : l'adaptation au changement climatique et l'atténuation de ses effets ; la réduction des risques naturels ; l'inversion du processus de dégradation des écosystèmes et de la perte de biodiversité ; la santé humaine ; le développement socioéconomique ; la sécurité alimentaire ; la sécurité de l'approvisionnement en eau.

Contribuer à répondre à ces défis fait partie de la définition d'une solution fondée sur la nature : « *Pour qu'une intervention soit considérée une SfN, elle doit répondre à un ou plusieurs défis sociétaux, de manière intégrée. [...] S'il s'agit de relever le défi sociétal de la dégradation des écosystèmes, la conception de la solution doit s'attaquer à au moins un autre défi sociétal pour faire en sorte de distinguer l'intervention de SfN d'une simple action de conservation* » [132].

Cette logique de synergie s'inscrit également dans la démarche Une seule santé (One Health) [227, 228], qui se trouve au cœur de l'action publique et de programmes de recherche en France [229, 230]. L'idée ici est de replacer la santé humaine dans le cadre écologique, en soulignant les liens étroits entre santé humaine, santé des animaux et santé des écosystèmes.

³³ Ici comme une conséquence du maintien ou de la création d'habitats et d'écosystèmes.

Par ailleurs, dans une même logique de synergie, le règlement européen sur la restauration de la nature souligne que « *la restauration de la biodiversité devrait prendre en considération le déploiement des énergies renouvelables et inversement. Il devrait être possible de combiner les activités de restauration et le déploiement de projets d'énergies renouvelables, partout où cela est possible* » [160].

Enfin, cette logique de synergie peut s'avérer un atout pour la pérennité de la renaturation projetée. Par exemple, selon l'UICN [128], « *la durabilité d'une solution [fondée sur la nature] se trouve largement renforcée lorsqu'elle contribue de manière tangible aux engagements nationaux et mondiaux tels que les ODD* » (Objectifs de développement durable des Nations unies).

Objectifs fixés par des politiques et des réglementations nationales et internationales

Un projet de renaturation peut s'inscrire dans les déclinaisons concrètes de différentes politiques et réglementations. Par exemple :

- Objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies, en particulier les objectifs 14.2, 15.1, 15.2 et 15.3, qui font référence à la nécessité de garantir la préservation, la restauration et l'exploitation durable des écosystèmes terrestres et des services associés ;
- Décennie des Nations Unies pour la restauration des écosystèmes (2021 - 2030) ;
- Cadre mondial de la biodiversité, adopté lors de la quinzième réunion de la conférence des parties (COP 15) de la Convention sur la diversité biologique (2022) ;
- Stratégie européenne pour la protection des sols à l'horizon 2030 (2021) ;
- Future directive européenne relative à la surveillance et à la résilience des sols ;
- Stratégie de l'Union Européenne en faveur de la biodiversité à l'horizon 2030 - Ramener la nature dans nos vies (2020) ;
- Stratégie de l'Union européenne pour l'adaptation au changement climatique (2021) ;
- Règlement européen relatif à la restauration de la nature (2024), qui traite notamment de nature en ville, avec par exemple une obligation de maintenir les surfaces d'espaces de nature et de couvert arboré en milieu urbain d'ici à 2030, puis de les augmenter ;
- Code de l'environnement, dont l'article L110-1 indique que « *les espaces, ressources et milieux naturels terrestres [...] les êtres vivants et la biodiversité font partie du patrimoine commun de la nation. Ce patrimoine génère des services écosystémiques et des valeurs d'usage. Les processus biologiques, les sols et la géodiversité concourent à la constitution de ce patrimoine* » ;
- Stratégie Nationale Biodiversité 2030 ;
- Loi Climat et résilience (2021), incluant l'objectif de zéro artificialisation nette (ZAN) pour 2050. Cet objectif fixé à l'échelle nationale consiste :
 - d'ici 2031, à réduire de moitié la consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF) par rapport à celle observée sur la décennie 2011-2021,
 - puis ensuite, à réduire l'artificialisation nette des sols jusqu'à atteindre le ZAN en 2050.

En particulier, d'après l'ARB ÎdF, « *les friches deviennent des leviers primordiaux pour atteindre les objectifs fixés dans ces deux étapes 2030 et 2050. D'abord parce que les friches ne sont pas classées comme des espaces naturels, agricoles et forestiers : leur reconversion n'est donc pas comptabilisée comme une consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers lors de la première étape. Cela en fait des espaces de projets particulièrement intéressants. Ensuite, lors de l'étape « ZAN », les friches bâties ou imperméabilisées seront déjà considérées comme artificialisées. Leur reconversion ne « pèsera » pas dans le solde du zéro artificialisation nette alors qu'au contraire leur renaturation permettra d'avoir un solde positif et donc de dégager des possibilités d'artificialisation d'autres secteurs* » [28].

De plus, l'article 201 indique que les communes les plus peuplées ou les plus dynamiques doivent définir, dans leurs secteurs urbains et via leurs documents d'urbanisme, une part minimale de surfaces favorables à la biodiversité ;

- Décret n°2022-1588 du 19 décembre 2022 relatif à la définition des types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués ;
- Loi visant à faciliter la mise en œuvre des objectifs de lutte contre l'artificialisation des sols et à renforcer l'accompagnement des élus locaux (2023) ;

- Loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages (2016).
En particulier, le préjudice écologique est inscrit dans cette loi : « *toute personne responsable d'un préjudice écologique est tenue de le réparer. [...] Est réparable, dans les conditions prévues au présent titre, le préjudice écologique consistant en une atteinte non négligeable aux éléments ou aux fonctions des écosystèmes ou aux bénéfices collectifs tirés par l'homme de l'environnement. [...] La réparation du préjudice écologique s'effectue par priorité en nature* ».
- Séquence « éviter, réduire, compenser » (séquence ERC) [40, 96, 126], introduite par la loi de protection de la nature de 1976, puis renforcée par la loi « Grenelle II » de 2010 et par la loi biodiversité de 2016, qui indique notamment que les mesures de compensation des atteintes à la biodiversité visent « *un objectif d'absence de perte nette, voire de gain de biodiversité* ». En écho avec l'objectif ZAN, on parle d'objectif « ZPN » (Zéro Perte Nette de biodiversité) [231]. De plus, « *les mesures de compensation sont mises en œuvre en priorité au sein des zones de renaturation préférentielle identifiées par les schémas de cohérence territoriale en application du 3o de l'article L. 141-10 du code de l'urbanisme et par les orientations d'aménagement et de programmation portant sur des secteurs à renaturer* » [12].
Le CESE recommande de progresser dans cette logique, en « *passant de la trilogie « Éviter - Réduire - Compenser » à « Éviter - Réduire - Enrichir - Compenser » : les projets de « ménagement territorial » ont alors vocation à améliorer les situations* » [176].
- Instruction du 29 juillet 2019 relative à l'engagement de l'État en faveur d'une gestion économe de l'espace.

L'ensemble de ces politiques et réglementations produisent certains éléments de contexte favorables à des projets de renaturation.

Aspects financiers

Certaines déclinaisons de l'usage de renaturation sont moins coûteuses que d'autres, les plus coûteuses pouvant inclure de lourds travaux de dépollution et de génie civil. En particulier, l'usage de renaturation peut permettre d'éviter certains coûts. Par exemple : absence d'exportation de terres hors site, gestion sur site de pollutions résiduelles, etc. En fonction des caractéristiques du site et de l'objectif choisi pour la renaturation, les coûts spécifiques à cet usage peuvent être intégrés dans le coût global du projet d'aménagement

Plus généralement, la faisabilité d'un projet s'apprécie notamment à partir de l'évaluation des coûts et des bénéfices associés. Et selon le ministère chargé de l'Écologie, les « *coûts de projet [de renaturation sont] souvent majorés par la dépollution et une rentabilité économique directe faible, contrairement aux projets de construction. [Néanmoins,] ces coûts sont à regarder à l'aune des services rendus et des opportunités de valorisation permises par le projet* » [232].

Selon l'UICN, cette logique coûts-bénéfices soulève « *une question économique simple et bien connue : l'absence de prix de marché pour les services rendus par les écosystèmes et la biodiversité signifie que les services que nous retirons de ces biens (souvent de nature publique) sont généralement négligés ou sous-évalués lors des prises de décisions politiques* » [219].

Pourtant, à moyen-long terme notamment, un usage de renaturation peut conduire à de nombreuses externalités positives [149]. Dans ce contexte, l'outil BENEFRICHES de l'ADEME [233] permet de quantifier et de monétariser des bénéfices socio-économiques associés à un projet de reconversion de friche, en appui aux différents acteurs de l'aménagement.

Un des auteurs de l'outil rapporte un exemple illustratif : « *à Sevran, en Île-de-France, où la ville a converti la friche industrielle Kodak en parc paysager à haute valeur écologique, le calculateur évalue les bénéfices nets socio-économiques à 23,6 millions d'euros, dont 90 % reviennent aux riverains qui voient leur qualité de vie mais également la valeur de leur bien immobilier augmenter [;] l'outil a également mis en évidence l'amélioration de la qualité de l'air, la création d'un îlot de fraîcheur et la préservation de la biodiversité... Tous ces effets paraissent relever du simple « bon sens », mais*

l'objectif poursuivi par Bénéfriches est de les mesurer, pour un projet donné, en se fondant sur des études qui font consensus » [234].

En ce sens, la Règlement européen sur la restauration de la nature souligne que *« les avantages de la remise en bon état des écosystèmes dégradés dans toutes les zones terrestres et marines l'emportent largement sur les coûts de la restauration. Ces services contribuent à une large gamme d'avantages socio-économiques »* [160]. De plus, selon l'UICN, *« les interventions qui privilégient les coûts et les bénéfiques à court terme au détriment des coûts, des bénéfiques et des mesures compensatoires à plus long terme ont toutes les chances d'être moins résilientes »* [132].

Cochet et Durand rapportent un autre exemple illustratif : *« Il y a quelques années, les Italiens se sont lancé le défi des 10 % de nature protégée. Ils y sont parvenus en créant en un temps record 25 parcs nationaux avec un statut de protection bien plus efficace qu'en France. La raison du succès italien tient au fait qu'ils ont démontré que c'était très intéressant au niveau économique. Dans le cas du parc national des Abruzzes, avec 800 000 visiteurs chaque année, les communes qui étaient contre ont fini par demander à en faire partie quand elles ont vu ce que cela rapportait à leurs voisins. Ils ont réussi à protéger 10 % de leur territoire malgré une densité de 200 habitants/kilomètre carré, le double de la densité française »* [117].

Par ailleurs, certains dispositifs permettent de co-financer des projets de renaturation [106]. Par exemple : subventions publiques et privées, fonds européens. Notamment :

- Fonds vert : fonds friches (300 millions d'euros par an) et renaturation (100 millions d'euros par an) [26, 177].
- Potentielle *« aide financière de l'établissement porteur de SCoT ou de ses EPCI membres si l'objectif politique de financement est validé par les élus et figure au plan d'actions du SCoT »* [77].
- Programme de renaturation des villes et des villages (2022), *« avec un fonds de 500 millions d'euros sur 5 ans, dont 100 millions d'euros en 2023 dans le cadre de son rattachement au Fonds Vert »* [98].
- Plan National d'Adaptation au Changement Climatique 3 (PNACC-3) [226]. Le PNACC-3 *« prévoit une mesure sur l'adaptation aux effets du changement climatique de l'environnement urbain, qui propose des évolutions dans sa conception, son organisation et son usage. Les actions déployées miseront notamment sur les solutions d'adaptations fondées sur la nature »* (SafN) [98]. Sur ce thème, le plan précise que *« l'accompagnement des porteurs de projets SafN est crucial. A cette fin, dès 2024, l'Etat accompagnera la structuration d'une filière de l'offre SafN, mettra en place une animation régionale avec des acteurs au plus près des parties prenantes locales, et réalisera une cartographie des financements publics et privés disponibles »* [226].
- Aides des Agences de l'eau, pour des projets liés à des masses d'eaux.

6.2 Pistes pour rendre l'usage de renaturation plus attractif

Leviers d'actions économiques

Selon les ordres de grandeur fournis par France Stratégie [83], la renaturation est associée à un coût compris entre 100 et 400 €/m², hors coûts de déconstruction. En comparant au prix moyen des terrains constructibles (130 €/m² en juin 2019), France Stratégie conclut que *« la renaturation pourrait être un outil économiquement viable pour les projets ne nécessitant ni dépollution, ni désimperméabilisation »*, soit le scénario le moins coûteux a priori. Par conséquent, la question de la viabilité économique se pose pour l'usage de renaturation dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués.

Néanmoins, la renaturation d'un site pollué peut aussi générer des retombées économiques. En ce sens, la MEB met aussi en avant l'exemple de l'ancienne friche KODAK de Sevrans : *« la reconversion de la friche industrielle KODAK (Sevrans, Seine-Saint-Denis) en parc paysager à haute valeur écologique a permis de générer des bénéfices nets socio-économiques estimés à 23,6 millions d'euros, dont 90%*

reviennent aux riverains (amélioration de leur qualité de vie et augmentation de la valeur de leurs biens immobiliers) » [25].

Cette influence sur les valeurs de biens immobiliers [149] fait écho au besoin de nature évoqué plus haut (section 4.6). En ce sens, le CESE indique que « *les espaces verts sont devenus un critère clef pour sept européennes et européens sur dix qui estiment leur proximité « importante ou très importante » au moment de choisir leur habitat » [176, 235].*

Par ailleurs, plusieurs comités de référence (ex : Comité pour la fiscalité écologique, Comité pour l'économie verte (dont les recommandations sont appuyées par le CESE [176]), Mission présidée par Guillaume Sainteny [236], Groupe d'experts IFSTTAR-INRA, Working Party on Integrating Environmental and Economic Policies de l'OCDE) ont fait des recommandations portant sur des leviers d'actions visant à limiter l'artificialisation des sols [237-240], dont des modifications de la fiscalité environnementale.

Augmenter le nombre de retours d'expériences formalisés

Partager plus de retours d'expériences formalisés, portant sur des projets de renaturation à succès, contribuerait à montrer la faisabilité et les avantages de l'usage de renaturation pour la gestion de sites et sols pollués (section 2, [32, 139, 148]).

Une augmentation du partage d'expérience permettrait également de faire progresser les connaissances scientifiques et techniques, sur un type de projet qui est souvent complexe et multidisciplinaire.

De premières compilations de retours d'expériences ont été publiés en ce sens [59, 77, 106, 149, 241-243].

7 Aspects à développer par la suite - quelques propositions

Ce rapport a présenté une proposition de premiers éléments de méthode pour mener à bien un usage de renaturation, dans le contexte de la gestion des sites et sols pollués. Dans un premier temps, cette proposition pourrait faire l'objet d'une phase de consultation pour avis, auprès d'une sélection de parties prenantes identifiées par le Bureau du sol et du sous-sol. Par exemple : bureaux d'études de différentes spécialités (SSP et écologues notamment), administrations locales, gestionnaires de sites, sociétés de travaux.

En parallèle, le démarrage de nouveaux projets de renaturation pourrait être l'occasion de tester le déroulé de la méthode proposée. En complément, certains projets en cours pourraient aussi permettre de tester certaines parties du déroulé - en fonction du contenu de ces projets - afin d'augmenter le nombre de retours d'expériences disponibles.

Dans un second temps, l'ensemble des avis et des retours d'expériences collectés pourrait être analysé. Sur cette base, des suggestions d'amélioration de la méthode seraient identifiées, ainsi que des études complémentaires à mener pour répondre à de potentielles difficultés de mise en œuvre.

Dès à présent, selon l'Ineris, certains aspects pourraient utilement donner lieu à des travaux d'approfondissement. Par exemple :

- Identifier une potentielle sélection d'indicateurs transversaux à tous les projets, à mettre en œuvre systématiquement.
- Préciser les lignes directrices sur le choix des indicateurs spécifiques à chaque projet, en s'appuyant sur les études et les outils existants (ex : TRIADE [9, 10], RECORD [11]).
- Expliciter une méthode d'évaluation des coûts et des avantages spécifique à l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués, incluant les avantages pour la santé humaine, et identifier les besoins d'appui aux acteurs du domaine sur ces aspects (ex : élargissement des informations disponibles dans l'outil SélecDEPOL), en s'appuyant sur les études et les outils existants [155, 222, 244-246].
Il s'agira notamment de pouvoir tenir compte des multiples bénéfices liés aux écosystèmes associés aux espaces renaturés.
- Réfléchir à la manière dont la notion de « plan de conception des travaux » peut être déclinée pour l'usage de renaturation. Par exemple : essais de faisabilité et de traitabilité (ex : phytotechnologies), en laboratoire ou sur une zone restreinte du site, afin d'éviter de possibles surcoûts ou retards lors de la phase de réalisation des travaux.
- Expliciter et approfondir les liens possibles entre les mesures de compensation, issues de la séquence ERC, et les usages de renaturation dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués. Les réflexions pourront notamment porter sur les sites naturels de compensation, de restauration et de renaturation (SNCR) [247, 248].
Faciliter les liens entre ces deux démarches permettraient de répondre aux limites des mesures de compensation actuelles, soulignées par certains travaux [96, 249] (certains étant mis en avant par l'ARB ÎdF [32]) et par les derniers rapports annuels de l'Autorité environnementale [123, 250, 251].

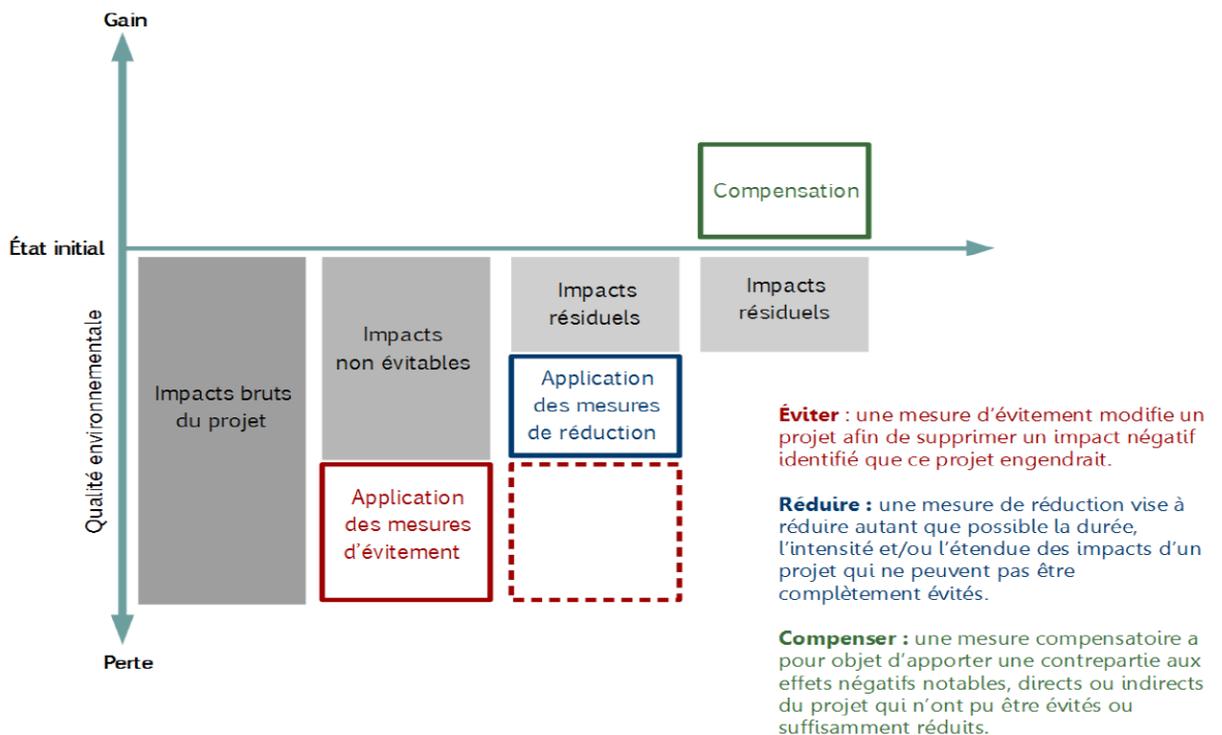


Figure 12 : Bilan écologique de la séquence ERC [252]

- Définir des critères à considérer pour évaluer l'opportunité d'une renaturation passive dans le cadre d'une gestion en libre évolution. Ces critères permettraient d'éviter de potentielles dérives liées aux coûts souvent réduits de cette option. Dans le domaine des sites et sols pollués, un parallèle peut être fait avec les options de gestion s'appuyant sur l'atténuation naturelle³⁴ pour certains polluants organiques - cf. protocole élaboré dans le cadre du projet ATTENA [253]. En particulier, ces options de gestion sont envisagées dans le bilan coûts/avantages notamment lorsque :
 - Les sources de pollutions en présence sont maîtrisées, en s'appuyant sur des études de délimitation des sources, de délimitation de l'impact des sources, des possibilités de suppression des sources et de leur impact, etc.
 - Les pollutions des milieux sont diffuses et les niveaux de concentration en polluants - généralement bas et compatibles avec les usages constatés ou envisagés des milieux - sont stabilisés ou en régression.
 - Les conditions biogéochimiques des milieux (ex : potentiel rédox) rendent possibles des réactions d'atténuation naturelle connues et permettant l'atteinte des objectifs fixés par le plan de gestion.
 - Une surveillance appropriée des milieux est définie en accompagnement, notamment au regard des produits de dégradation intermédiaires issus des réactions attendues³⁵,

³⁴ Les mécanismes d'atténuation naturelle désignent l'ensemble des processus naturels qui concourent à la diminution spatio-temporelle d'un panache de pollution (composés dissous et/ou vapeurs) : processus physiques, chimiques et biologiques qui, dans des conditions favorables, agissent sans intervention humaine et réduisent la masse, la toxicité, la mobilité, le volume, le flux ou la concentration de polluants dans le milieu souterrain. Ces mécanismes comprennent les phénomènes de biodégradation, dégradation abiotique (chimique), dispersion, dilution, adsorption, volatilisation, les stabilisations chimiques ou biologiques, la transformation des polluants.

³⁵ Par exemple, pour la biodégradation de certains solvants chlorés, la déchloration réductrice conduit à la formation d'intermédiaires métaboliques connus (PCE → TCE → cis-DCE → CV → C₂H₄ → C₂H₆). Dans ce contexte, la détection dans les eaux souterraines de ces intermédiaires peut constituer une preuve de l'existence de processus de dégradation.

afin de s'assurer de l'efficacité de ces réactions et de l'atteinte des objectifs fixés par le plan de gestion.

On parle « atténuation naturelle contrôlée », et on pourrait donc aussi parler de « libre évolution contrôlée » ; plutôt qu'un « ne rien faire », il s'agirait d'orienter vers un « regarder faire » ou « observer faire ».

8 Conclusion

Afin d'accompagner la mise en œuvre de l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués, ce rapport présente :

- une collecte et une analyse de retours d'expériences issus de projets en lien avec la renaturation, en cours ou achevés, réalisés en France et hors contexte de la recherche. Ces retours d'expériences ont été collectés sous la forme d'interviews de chefs de projets issus de différents types d'organismes. Par exemple : bureaux d'études spécialisés dans la gestion des sites et sols pollués, dans le paysage, dans l'aménagement des territoires, startups, organismes publics, etc.
- une étude bibliographique visant à préciser la définition retenue dans le décret n°2022-1588, relatif à la définition des types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués ;
- une proposition de démarche méthodologique pour mener à bien un usage de renaturation. Cette démarche a été élaborée à partir de l'analyse de retours d'expériences et des travaux de définition réalisés, ainsi que sur la base des résultats disponibles dans la littérature scientifique et technique. Cette démarche s'appuie sur trois étapes clés :
 - 1) choisir le milieu écologique type (MET) visé, selon une liste de référence telle que la typologie EUNIS, correspondant à un gain écologique pour le site considéré, en cohérence avec son contexte pédo-bioclimatique, et en tenant compte des besoins des différentes parties prenantes impliquées (gestionnaire du site, riverains, élus locaux, etc.) ;
 - 2) sélectionner des indicateurs de suivi, au regard des principales caractéristiques d'intérêt du MET et de manière proportionnée aux enjeux ;
 - 3) identifier un environnement local de référence (ELR), c'est-à-dire une déclinaison locale du MET visé, puis y mesurer les indicateurs de suivi sélectionnés : les résultats obtenus constituent alors l'objectif de la renaturation.

L'usage de renaturation est considéré comme réussi lorsque le site atteint un état résilient et se trouvant sur une trajectoire menant à l'ELR.

De plus, dans le cas particulier où des écosystèmes d'intérêt seraient initialement présents sur le site, l'usage de renaturation peut se limiter à des actions de conservation et de suivi.

Cette démarche constitue une approche générale qui peut s'adapter à tous types de sites, de contextes et d'objectifs spécifiques, permettant de mettre en cohérence les projets de renaturation réalisés et de les inscrire dans la logique du Plan de gestion.

En complément, le présent rapport a traité des différents types d'interactions possibles avec les populations riveraines, et notamment de l'opportunité de permettre un accès aux sites où un usage de renaturation a été retenu.

9 Acronymes

- ADEME : Agence de la transition écologique
- AEE : Agence européenne pour l'environnement
- AFB : Agence française pour la biodiversité (aujourd'hui intégrée à l'Office français de la biodiversité (OFB))
- AFES : Association Française pour l'Étude du Sol
- APB : Arrêté de protection de biotope
- APHN : Arrêté de protection des habitats naturels
- ARB ÎdF : Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France
- ARR : Analyses des risques résiduels
- B3S : Bureau du sol et du sous-sol
- BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières
- Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
- CESE : Conseil économique, social et environnemental
- CGDD : Commissariat général au développement durable
- CSRD : Corporate Sustainability Reporting Directive
- DCE : Directive-cadre sur l'eau
- DGARNE : Direction Générale Opérationnelle belge Agriculture, Ressources naturelles et Environnement
- DHFF : Directive européenne Habitats Faune Flore
- ELR : Environnement local de référence
- ELT : Environnement local témoin
- ERC : Éviter-Réduire-Compenser
- ERE : évaluation des risques pour les écosystèmes
- ERS : évaluation des risques sanitaires
- ENAF : espaces naturels, agricoles et forestiers
- ERE : évaluation des risques pour les écosystèmes
- ETM : éléments traces métalliques
- EUNIS : European Nature Information System (Système européen d'information sur la nature)
- IdP : indice de préoccupation
- INPN : Inventaire national du patrimoine naturel
- INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques
- IPBES : Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques)
- LIFTI : Laboratoire d'initiatives foncières et territoriales innovantes
- MEB : Mission Économie de la Biodiversité
- MEFM : Masse d'eau fortement modifiée
- MET : Milieu écologique de référence
- MNHN : Muséum national d'histoire naturelle
- MO : Matière organique
- MUSE (projet) : projet Intégrer la multifonctionnalité des sols dans l'élaboration des documents d'urbanisme
- NRC : National Research Council (Conseil national de recherche américain)
- OAP : orientation d'aménagement et de programmation
- OCS GE : Occupation du sol à grande échelle
- ODD : Objectifs de développement durable
- OFB : Office français de la biodiversité
- ONU : Organisation des Nations unies
- ORS Île-de-France : Observatoire régional de santé Île-de-France
- PLU : Plan local d'urbanisme
- PNUD : Programme des Nations unies pour le développement (de l'anglais *United Nations Development Programme* - UNDP)
- RBI : Réserves biologiques intégrales
- RMQS : Réseau de Mesures de la Qualité des Sols

- SCoT : Schéma de cohérence territoriale
- SER : Society for Ecological Restoration
- SfN : Solution fondée sur la nature
- SIB : Système d'information sur la biodiversité
- SRCE : schéma régional de cohérence écologique
- SSP : Sites et sols pollués
- SfN : Solutions fondées sur la Nature
- SWOT : analyse selon la trame « forces », « faiblesses », « opportunités » et « verrous à lever », une traduction inspirée de l'anglais Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats
- TIPOMO : Étude des Transferts, Indices de Préoccupation : Outils pour la valorisation des friches urbaines MOyennement contaminées
- TRIADE : Méthode d'évaluation de qualité des sols ; méthode internationale normalisée ISO 19204:2017 (ISO 2017) qui met en œuvre différentes disciplines scientifiques pour réaliser une évaluation des risques pour les écosystèmes (ERE) pour le compartiment terrestre.
- UPGE : Union professionnelle du génie écologique
- UPDS : Union des professionnels de la dépollution des sols
- ZAN : Zéro artificialisation nette

10 Références

1. Ministère chargé de l'Écologie, 2022. Décret n°2022-1588 du 19 décembre 2022 relatif à la définition des types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués. NOR : TREP2211324D. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000046761045>.
2. Velly N. Guide sur les types d'usages définis dans le cadre des cessations d'activité des installations classées pour la protection de l'environnement et de projets d'aménagement. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2023. Ineris - 213282 - 2759342 - v3.0. <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Rapport-Ineris-213282-279342-Typologie%20d%27usage%20SSP%20v3.pdf>
3. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Programme « Évaluation des expositions et des risques sanitaires en appui à la gestion des sites et sols pollués », thématique « Comprendre et maîtriser les risques à l'échelle d'un territoire ». Descriptif du programme d'appui aux politiques publiques en application du protocole de gestion des ressources publiques. *Ministère chargé de l'Écologie*, 2022.
4. Office français de la biodiversité (OFB). Qu'est-ce que la biodiversité ? <https://www.ofb.gouv.fr/quest-ce-que-la-biodiversite> [Consulté le : 23/12/2024]
5. Benzaghta MA, Elwalda A, Mousa MM *et al.* SWOT analysis applications: An integrative literature review. *Journal of Global Business Insights* 2021 ; 6(1) : 54-72. DOI: <https://doi.org/10.5038/2640-6489.6.1.1148>.
6. Bert V, Perronnet K. Applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des pollutions des sols. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2019. Ineris-19-180756-1814948-v1.0. <https://www.ineris.fr/fr/applicabilite-phytotechnologies-gestion-pollutions-sols>
7. Bert V, Perronnet K. Applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des pollutions des sols – Analyse des forces, faiblesses, opportunités et verrous à lever sur la base d'entretiens. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2023. Ineris - 207011 - 2746368 - v1.0. <https://www.ineris.fr/fr/applicabilite-phytotechnologies-gestion-pollutions-sols>
8. Bert V, Douay F, Faure O *et al.* Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués. Nouveaux résultats de recherche et démonstration. *ADEME, Ineris, ISA-Lille, Mines de Saint-Etienne*, 2017. <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/phytotechnologies-ademe-2013-1463054029.pdf>
9. Agence Française de normalisation (AFNOR). Qualité du sol — Procédure d'évaluation des risques écologiques spécifiques au site de la contamination des sols (approche TRIADE de la qualité du sol). Norme NF EN ISO 19204. 2022. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-iso-19204/qualite-du-sol-procedure-devaluation-des-risques-ecologiques-specifiques-au/fa205085/338584>
10. PAUGET Benjamin, Tesora, MANIER Nicolas, PUCHEUX Nicolas, INERIS, GRAND Cécile, ADEME. Guide Technique d'application de la norme Triade (ISO 19204) - Projet TRIPODE (2021-2024). *Agence de la transition écologique (ADEME)*, 2025. <https://librairie.ademe.fr/>
11. Baptist F, Cotillon S, Hellal J *et al.* RECORD, Outil de conception et de suivi de la réhabilitation écologique de sites dégradés intégrant les solutions fondées sur la nature. Exemples d'application en contexte urbain. Etude n°19-1024/1A. *Biotope, BRGM, Vertigo Lab*, 2021. <https://record-net.org/media/etudes/226/public/rapport/rapport-record19-1024-1a.pdf>
12. Journal officiel de la République française (JORF n°0196), 2021. Loi n°2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (1) NOR : TREP2100379L. <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2021/8/22/TREP2100379L/jo/texte>.
13. Ministère chargé de l'Écologie. Loi climat et résilience : l'écologie dans nos vies. 2021. <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-climat-resilience> [Consulté le : 16/06/2023]
14. Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Site Internet InfoTerre, Sites et sols pollués. Glossaire. <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/glossaire> [Consulté le : 12/09/2024]
15. Organisation internationale de normalisation (ISO : International Organization for Standardization). Norme NF ISO 11074 - Qualité du sol - Vocabulaire. 2015. <https://www.iso.org/fr/standard/59259.html>
16. Direction générale de la Prévention des Risques (DGPR) - Bureau du Sol et du Sous-Sol. Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. *Ministère chargé de l'Écologie*, 2017. https://www.ecologie.gouv.fr/sites-et-sols-pollues#scroll-nav_2
17. Commission européenne, 2023. Proposition de Directive du parlement européen et du Conseil relative à la surveillance et à la résilience des sols (directive sur la surveillance des sols). COM(2023) 416 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52023PC0416>.
18. Association française pour l'étude des sols (AFES). La définition officielle des sols par l'AFES. <https://www.afes.fr/les-sols/definition-et-enjeux/#:~:text=LA%20D%C3%89FINITION%20OFFICIELLE%20DES%20SOLS%20PAR%20L'AFE>

[S&text=%C2%AB%20Le%20sol%20est%20un%20volume,peu%20marqu%C3%A9%20par%20la%20p%C3%A9doge%C3%A8se](#). [Consulté le : 03/12/2024]

19. Fédération nationale des agences d'urbanisme (FNAU), Agence de la transition écologique (ADEME), Office français de la biodiversité (OFB). Abécédaire de la renaturation. Des définitions pour mieux cerner les enjeux de la renaturation dans le cadre du ZAN. *Les dossiers FNAU - N° 60 Octobre 2024*, 2024. https://www.fnau.org/wp-content/uploads/2024/10/fnau-60-abecedaire-renaturation-web_v2.pdf

20. Le Robert. Dictionnaire de la langue française. <https://dictionnaire.lerobert.com/> [Consulté le : 17/09/2024]

21. Larousse. Dictionnaire de français. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais> [Consulté le : 17/09/2024]

22. Larramendy, Sandrine (coord.). Conception écologique d'un espace public paysager. Guide méthodologique de conduite de projet. 2e édition. *Plante & Cité*, 2023. <https://www.nature-en-ville.com/ressources/nouvelle-edition-guide-de-conception-ecologique-dun-espace-public-paysager>

23. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Portail de l'artificialisation des sols - L'enjeu de réduction de l'artificialisation des sols. Et Définition de l'artificialisation et application dans les bases. 2022. <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/a-propos> [Consulté le : 30/06/2023]

24. Laboratoire d'Initiatives Foncières et Territoriales Innovantes (LIFTI). Guide pratique de la reconversion des friches. 2022. <https://lifti.org/reconvertir-les-friches-vite/>

25. Castaing J, Monod K, Noreve V. Renaturer les sols - Des solutions pour des territoires durables. *Mission Économie de la Biodiversité : Office français de la biodiversité (OFB), CDC Biodiversité - Dossier de la MEB N°42*, 2022. <https://www.ofb.gouv.fr/sites/default/files/Fichiers/Plaquettes%20et%20rapports%20institut/renaturer-les-sols.pdf>

26. Ministère chargé de l'Écologie. Stratégie Nationale Biodiversité 2030. 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Doc-chapeau-SNB2030-HauteDef.pdf>

27. LPO France. Guide technique « Sols vivants : alternatives à l'artificialisation des sols et réhabilitation des sols dégradés ». 2022. https://www.lpo.fr/media/read/20425/file/LIVRABLE%20SOLS%20VIVANTS_Web.pdf

28. Deboeuf De Los Rios G, Barra M, Grandin G. Renaturer les villes. Méthode, exemples et préconisations. *Institut Paris Region. Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France (ARB ÎdF)*, 2022. https://www.arb-idf.fr/fileadmin/DataStorage/user_upload/ARB-idF_-_Renaturer_les_villes_-_WEB.pdf

29. Ministère chargé de l'Écologie, 2022. Décret n° 2022-763 du 29 avril 2022 relatif à la nomenclature de l'artificialisation des sols pour la fixation et le suivi des objectifs dans les documents de planification et d'urbanisme. NOR : LOGL2201338D. <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2022/4/29/LOGL2201338D/jo/texte>.

30. Ministère chargé de l'Écologie. Artificialisation des sols - L'artificialisation des sols, qu'est-ce que c'est ? 2022. <https://www.ecologie.gouv.fr/artificialisation-des-sols> [Consulté le : 30/06/2023]

31. European Environment Agency (EEA). Soil monitoring in Europe — Indicators and thresholds for soil health assessments. 2022. EEA Report No 08/2022. https://www.eea.europa.eu/publications/soil-monitoring-in-europe/at_download/file

32. Barra M, Ducreux J-L, Yvert F *et al.* Cycle de webinaires « La renaturation en Île-de-France ». La renaturation en ville : enjeux et principes. Réussir son projet de renaturation malgré les contraintes. 2023. https://www.youtube.com/playlist?list=PLgtWr6Jr2_rfyFzw0zUmxsNfVS4Mh1oD [Consulté le : 05/10/2024]

33. Society for Ecological Restoration International. SER international primer on ecological restoration. *Society for Ecological Restoration International*, 2004. https://www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/ser_publications/Dev_and_Mng_Eco_Rest_Proj.pdf

34. McDonald T, Gann G, Jonson J *et al.* Standards internationaux pour la restauration écologique - incluant les principes et les concepts clés. *Society for Ecological Restoration*, 2016. https://reseau-rever.fr/wp-content/uploads/sites/39/2019/05/SER_Standards_french_v1.pdf

35. Scholes R, Montanarella L, Brainich A *et al.* The IPBES assessment report on land degradation and restoration. *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)*, 2018. <https://www.ipbes.net/assessment-reports/ldr>

36. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). Glossary. <https://www.ipbes.net/glossary?page=0> [Consulté le : 16/09/2024]

37. National Research Council (NRC). Restoration of Aquatic Ecosystems. Science, Technology, and Public Policy (cité par le cadre conceptuel du projet EFESE (2017)). *National Academy Press*, 1992. <https://doi.org/10.17226/1807>.
38. Learning for Nature. Introduction à la restauration des écosystèmes. Leçon 1. *Programme des Nations unies pour le développement (PNUD)*, 2023. <https://www.learningfornature.org/fr/courses/ecosystem-restoration-part-1/>
39. Union des Professionnels de la Dépollution des Sites (UPDS). UPDS MAG. Dossier : biodiversité et sites pollués. 2022.
40. Commissariat général au développement durable (CGDD) - Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB). Références - Lignes directrices nationales sur la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur les milieux naturels. *Ministère chargé de l'Écologie*, 2013. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/eviter-reduire-compenser-impacts-lenvironnement>
41. Commissariat général au développement durable (CGDD). Guide pour l'élaboration d'un site naturel de compensation. *Ministère chargé de l'Écologie*, 2023. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/guide_elaboration_site_naturel_de_compensation_fevrier2023.pdf
42. Ministère chargé de l'Écologie. Rapport de première phase de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques. Du constat à l'action. 2020. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Efese%20-%20Rapport%20de%20premiere%20phase%20-%20Du%20constat%20à%20l%27action.pdf>
43. Nicolas Pucheux (INERIS), Nicolas Manier (INERIS), Olivier Faure (Ecole des Mines de Saint-Etienne, UMR 5600 EVS). Étude TIPOMO, Étude des Transferts, Indices de Préoccupation : Outils pour la valorisation des friches urbaines MOyennement contaminées. *Agence de la transition écologique (ADEME)*, 2022. <https://librairie.ademe.fr/sols-pollues/5799-identification-de-friches-polluees-eligibles-a-une-reconversion-ecologique.html>
44. Bispo A, Guellier C, Martin E *et al.* *Les sols : Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable*. Éditions Quæ, 2016.
45. Ruellan A. *Des sols et des hommes : Un lien menacé*. IRD Éditions, 2010.
46. Service de l'environnement (SEN) - Canton du Valais (Suisse). Fonctions du sol - De quoi parle-t-on exactement ? <https://www.vs.ch/web/sen/fonctions-du-sol> [Consulté le : 15/09/2024]
47. Haines-Young R, Potschin M. England's terrestrial ecosystem services and the rationale for an ecosystem approach. DEFRA Overview Report Project Code NR0107. *Centre for Environmental Management, School of Geography - University of Nottingham*, 2008. https://www.nottingham.ac.uk/cem/pdf/NR107_FTR_080108.pdf
48. Greiner L, Keller A, Grêt-Regamey A *et al.* Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Policy* 2017 ; 69 : 224-237. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.025>.
49. Branchu P, Marseille F, Béchet B *et al.* Projet MUSE : intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme. *Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) ; Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) ; Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville (IRSTV) ; Université Aix-Marseille ; Chambre d'Agriculture 36 ; Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) ; Agence de la transition écologique (ADEME)*, 2022. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme/5415-muse-integrer-la-multifonctionnalite-des-sols-dans-les-documents-d-urbanisme.html>
50. Commission des communautés européennes. Stratégie thématique en faveur de la protection des sols. COM(2006)231 final. 2006. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0231&from=ES>
51. Merly C, Limasset E, Bataillard P. Re-fonctionnalisation des sols dégradés, de quoi parle-t-on ? Journée Axelera « Refonctionnalisation des friches ». *Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)*, 2023.
52. Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire. Rapport de synthèse de l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire. 2005. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.447.aspx.pdf>
53. Millennium Ecosystem Assessment. Guide to the Millennium Assessment Reports. 2005. <https://www.millenniumassessment.org/> [Consulté le : 21/12/2024]
54. Monfort D, Limasset E, Mossmann J-R *et al.* Sensibiliser les acteurs de l'aménagement à l'importance des fonctions du sol et des services rendus lors de projets de reconversion de friches urbaines : Retour d'expérience en métropole lilloise. *Étude et Gestion des Sols*, 2020. <https://brgm.hal.science/hal-02969536/document>

55. Adhikari K, Hartemink AE. Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma* 2016 ; 262 : 101-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.
56. Keller A, Franzen J, Knüsel P *et al.* Plateforme d'information des sols suisse (pis-ch) : Informations du sol, méthodes et instruments pour une utilisation durable de la ressource sol. *Synthèse thématique ST4 du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (pnr 68)*, 2018. https://www.snf.ch/media/fr/N5fWBUZcAQnXWKd7/NFP68_TS4_Bodeninformationsplattform_FR.pdf
57. Agence de la transition écologique (ADEME), Association Française pour l'Étude du Sol (AFES). La Fresque du sol - Guide d'animation. Annexes. 2023. <https://fresquedusol.com/comment-participer/telecharger-la-fresque-du-sol/> [Consulté le : 23/09/2024]
58. Mouton T, Guittonneau S, Ménard S *et al.* La mise en oeuvre de l'objectif de Zéro artificialisation nette à l'échelle des territoires. BIODIV'2050. *CDC Biodiversité, Humanité et Biodiversité*, 2021.
59. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). La désimperméabilisation des sols : du principe à la mise en oeuvre. 2022. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/desimpermeabilisation-renaturation-sols-serie-fiches-du>
60. Collard M, Host S, Colombier C *et al.* Santé et biodiversité. Analyse des enjeux pour une approche intégrée en Île-de-France. *Observatoire régional de santé (ORS) Île-de-France, Agence régionale de la biodiversité Île-de-France (ARB) Île-de-France*, 2023. https://www.ors-idf.org/fileadmin/DataStorageKit/ORS/Etudes/2023/SanteEtBiodiversite/2023_sante_biodiversite_OR_S_ARB.pdf
61. Nature France. Les écosystèmes et les habitats : Comment évoluent les écosystèmes et habitats en France ? 2022. <https://naturefrance.fr/les-ecosystemes-et-les-habitats> [Consulté le : 16/09/2024]
62. Nature France. Habitat. <https://naturefrance.fr/glossaire/habitat> [Consulté le : 16/09/2024]
63. Conseil des communautés européennes, 1992. Directive 92/43/CEE DU CONSEIL du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages. https://www.natura2000.fr/sites/default/files/directive_habitats_version_consolidee_2007.pdf.
64. Office français de la biodiversité (OFB). Préserver et restaurer les habitats naturels. 2020. https://www.youtube.com/watch?v=GEGPBHqF5TQ&ab_channel=Officefran%C3%A7aisdelabiodiversit%C3%A9 [Consulté le : 16/09/2024]
65. Muséum national d'histoire naturelle (MNHN). « Cahiers d'habitats » Natura 2000. Tome 1 : Habitats forestiers. 2001. <http://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/tome1.pdf>
66. Sordello R, Gaudillat V, Sibley J-P *et al.* Trame verte et bleue – Critères nationaux de cohérence – Contribution à la définition du critère sur les habitats. *Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) - Service du Patrimoine Naturel*, 2011.
67. Inventaire national du patrimoine naturel (INPN). Glossaire. <https://inpn.mnhn.fr/informations/glossaire/liste/h> [Consulté le : 16/09/2024]
68. Jeffery S, Gardi C, Jones A *et al.* Atlas européen de la biodiversité du sol. *Commission européenne, Institut de l'environnement et du développement durable (Centre commun de recherche)*, 2010. <https://op.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/7161b2a1-f862-4c90-9100-557a62ecb908>
69. Direction Générale Opérationnelle belge Agriculture, Ressources naturelles et Environnement (DGARNE). Biotope ou Habitat ? <https://biodiversite.wallonie.be/fr/biotope-ou-habitat.includehtml?IDC=833&IDD=2212> [Consulté le : 16/09/2024]
70. Gaubert H, Hubert S. Comment réparer des dommages écologiques graves ? *Ministère chargé de l'Ecologie - Service de l'économie, de l'évaluation, et de l'intégration du développement durable*, 2018. <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/98175/comment-reparer-des-dommages-ecologiques-graves>
71. Décamps H. Livret sur l'environnement - Les écosystèmes. *Académie des sciences*, 2020. https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/livret_6.pdf
72. Ducarme F, Couvet D. What does 'nature' mean? *Palgrave Communications* 2020 ; 6(1) : 14. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41599-020-0390-y>.
73. Larrère C, Larrère R. *Penser et agir avec la nature*. La Découverte, 2018.
74. Ministère de la Transition Écologique (MTE) SdéesS. Société, nature et biodiversité : regards croisés sur les relations entre les Français et la nature. 2021.
75. Moscovici S. *Essai sur l'histoire humaine de la nature*. Flammarion, 1968.
76. Ducarme F, Flipo F, Couvet D. How the diversity of human concepts of nature affects conservation of biodiversity. *Conservation Biology* 2021 ; 35(3) : 1019-1028. DOI.
77. Heinrich M, Dellinger S, Soyer H *et al.* Renaturer : Principes et méthodologie. *Fédération nationale des SCoT*, 2024. <https://fedescot.org/etude-renaturer>
78. Carver S, Convery I, Hawkins S *et al.* Guiding principles for rewilding. *Conservation Biology* 2021 ; 35(6) : 1882-1893. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/cobi.13730>.

79. Pettorelli N, Barlow J, Stephens PA *et al.* Making rewilding fit for policy. *Journal of Applied Ecology* 2018 ; 55(3) : 1114-1125. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1365-2664.13082>.
80. Mutillod C, Buisson É, Mahy G *et al.* Ecological restoration and rewilding: two approaches with complementary goals? *Biological Reviews* 2024 ; DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/brv.13046>.
81. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN). IUCN CEM Rewilding Thematic Group. <https://iucn.org/our-union/commissions/group/iucn-cem-rewilding-thematic-group> [Consulté le : 23/09/2024]
82. Society for Ecological Restoration (SER). What is Ecological Restoration? <https://ser-rrc.org/what-is-ecological-restoration/> [Consulté le : 18/09/2024]
83. Fosse J. Objectif « zéro artificialisation nette » : quels leviers pour protéger les sols ? *France Stratégie*, 2019. <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-rapport-2019-artificialisation-juillet.pdf>
84. Lefranc A, Pierart A, Girot E *et al.* Journée Technique - Transfert des résultats de la recherche en outils opérationnels. Thématique : multifonctionnalité des sols. Webinaire Atelier 3 - synthèse - Des solutions techniques pour concilier le développement des territoires et gestion durable des sols. *Agence de la transition écologique (ADEME)*, 2023.
85. Mougenot C. *Prendre soin de la nature ordinaire*. Éditions de la Maison des sciences de l'homme, 203.
86. Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN). Solutions fondées sur la Nature. <https://iucn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/> [Consulté le : 21/12/2024]
87. United Nations Environment Assembly of the United Nations Environment Programme (UNEP). Resolution adopted by the United Nations Environment Assembly on 2 March 2022. Nature-based solutions for supporting sustainable development. 2022. <https://digitallibrary.un.org/record/3999268?v=pdf>
88. Direction générale de la prévention des risques (DGPR), Service des risques technologiques, Bureau du sol et du sous-Sol. Diagnostics des sites et sols pollués. *Ministère chargé de l'Écologie*, 2023. <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/methodologie/diagnostic-site>
89. Wójcik-Madej J, García J, Sowińska-Świerkosz B. Multi-criteria evaluation method for the selection of nature-based solutions for urban challenges. *Journal of Environmental Management* 2025 ; 373 : 123387. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123387>.
90. Pucheux N. Indice de préoccupation (IDP) - Outil d'aide à la gestion pour identifier les friches polluées éligibles à une reconversion écologique. *Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)*, 2023.
91. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Document d'orientation pour l'évaluation du risque chimique pour les écosystèmes. 2022. <https://www.ineris.fr/fr/document-orientation-evaluation-risque-chimique-ecosystemes>
92. Martin DM, Mazzotta M, Bousquin J. Combining ecosystem services assessment with structured decision making to support ecological restoration planning. *Environmental Management* 2018 ; 62(3) : 608-618. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1038-1>.
93. Gann GD, McDonald T, Walder B *et al.* International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration ecology* 2019 ; 27(S1) : S1-S46. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13035>.
94. Génot J-C, Schnitzler A. *La France des friches : De la ruralité à la féralité*. Éditions Quæ, 2012.
95. Muratet A. Cycle de webinaires « La renaturation en Île-de-France ». Renaturation des friches. Les friches urbaines, des réservoirs de biodiversité, des refuges d'humanité. 2023. https://www.youtube.com/watch?v=jv-6hr8iLi8&list=PLgtWr6Jr2_rfyFzw0zUmxsNfVS4Mh1oD&index=4 [Consulté le : 05/10/2024]
96. Gauthier C. Contribution de la compensation écologique à un modèle économique de renaturation des friches urbaines et périurbaines. *Humanité et Biodiversité*, 2018. https://webissimo-ide.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/etude_friches_et_compensation_urbaines-web_cle77c96c.pdf
97. Shwartz A. Les interactions entre la biodiversité et les citoyens au cœur d'une métropole. *Muséum national d'histoire naturelle (MNHN)*, 2012. <http://www.theses.fr/2012MNHN0005>
98. Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages (DHUP). Plan Nature en ville. *Gouvernement français*, 2024. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/MTE_PlanNatureEnVille-1.pdf
99. Govindan K, Jepsen MB. ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research* 2016 ; 250(1) : 1-29. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.019>.

100. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Définition d'une méthode d'identification et de hiérarchisation de substances préoccupantes – Application au cas particulier de la préparation du troisième Plan National Santé Environnement. 2013. <https://www.ineris.fr/fr/definition-methode-identification-hierarchisation-substances-preoccupantes-application-cas>
101. Office national des forêts (ONF). La réserve biologique intégrale des Maures. https://www1.onf.fr/midimed/sommaire/patrimoine_a_decouvrir/nos_reserves_biologiques/20151104-111545-917813/@_@index.html [Consulté le : 05/10/2024]
102. Direction générale de la Prévention des Risques (DGPR) - Bureau du Sol et du Sous-Sol. Introduction à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. *Ministère chargé de l'Écologie*, 2017. https://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/documents/2022-02/intro_methodo_ssp_2017.pdf
103. European Environment Agency (EEA). Healthy environment, healthy lives: how the environment influences health and well-being in Europe. 2020. <https://www.eea.europa.eu/publications/healthy-environment-healthy-lives>
104. Bolon I, Cantoreggi N, Simos J *et al.* Espaces verts et forêts en ville : bénéfiques et risques pour la santé humaine selon l'approche « Une seule santé » (One Health). *Santé Publique* 2019 ; S1(HS1) : 173-186. DOI: <https://doi.org/10.3917/spub.190.0173>.
105. Clewell A, Rieger J, Munro J. Guidelines for Developing and Managing Ecological Restoration Projects, 2nd Edition. *Society for Ecological Restoration International*, 2005. www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/ser_publications/Dev_and_Mng_Eco_Rest_Proj.pdf
106. Cerema, CDC Biodiversité et ENPC, coordination. Suivi de projets de Solutions d'adaptation fondées sur la Nature (SafN). Référentiel d'indicateurs fondé sur les 10 sites pilotes du programme démonstrateur du projet LIFE intégré ARTISAN. Livrable de l'Action D4 « Suivi et évaluation du programme démonstrateur ». *Projet LIFE intégré ARTISAN « Accroître la Résilience des Territoires au changement climatique par l'Incitation aux Solutions d'adaptation fondées sur la Nature » (2020-2027), piloté par l'Office français de la biodiversité (OFB)*, 2022. <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/590977/suivi-de-projets-de-solutions-d-adaptation-fondees-sur-la-nature-safn-referentiel-d-indicateurs-fond?lg=fr-FR>
107. Derycke V, Drzewiecki P, Baptist F *et al.* Démarche exploratoire sur la prise en compte de la biodiversité en contexte d'interprétation de l'état des milieux. Compte rendu d'activité. BRGM - DEPA/3SP – VD/MD n° 2023-244 - Version 1 (document non publique). *Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)*, 2023.
108. Gayet G, Baptist F, Maciejewski L *et al.* Guide de détermination des habitats terrestres et marins de la typologie Eunis. *Agence française pour la biodiversité*, 2018. <https://www.natura2000.fr/documentation/references-bibliographiques/guide-determination-habitats-terrestres-marins-typologie>
109. European Environment Agency (EEA). European Nature Information System (EUNIS). 2022. <https://eunis.eea.europa.eu/index.jsp>
110. Inventaire national du patrimoine naturel (INPN). Classification des habitats EUNIS 2022. 2022. https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd_typo/107 [Consulté le : 02/12/2024]
111. European Environment Agency (EEA). EUNIS terrestrial habitat classification 2021_1 including crosswalks (updated in January 2023). 2023. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eunis-habitat-classification-1/eunis-terrestrial-habitat-classification-review-2021> [Consulté le : 02/12/2024]
112. Hull RN, Luoma SN, Bayne BA *et al.* Opportunities and challenges of integrating ecological restoration into assessment and management of contaminated ecosystems. *Integrated Environmental Assessment and Management* 2015 ; 12(2) : 296-305. DOI: <https://doi.org/10.1002/ieam.1714>.
113. Marchand L, Castagneyrol B, Jiménez JJ *et al.* Conceptual and methodological issues in estimating the success of ecological restoration. *Ecological Indicators* 2021 ; 123 : 107362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107362>.
114. Bureau du sol et du sous-sol. Guide du donneur d'ordre dans le domaine des sites et sols pollués. *Ministère chargé de l'Écologie*, 2023. https://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/documents/2023-11/Guide_du_Donneur_Ordre_septembre_2023.pdf
115. Agence de la transition écologique (ADEME). Guide méthodologique « Intégrer les friches à risque de pollution dans les démarches de planification territoriale ». 2021. <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/rapport/guide-methodologique-integrer-friches-demarches-de-planification>
116. Bonthoux S, Chollet S. Ensauvager les villes pour réconcilier nature et société. *The Conversation*, 2024. <https://theconversation.com/ensauvager-les-villes-pour-reconcilier-nature-et-societe-230527>
117. Cochet G, Durand S. *Ré-ensauvageons la France : Plaidoyer pour une nature sauvage et libre*. ACTES SUD, 2018.

118. Séré G. Mieux connaître la pédogenèse et le fonctionnement des Technosols pour optimiser les services écosystémiques rendus. Université de Lorraine, 34 cours Léopold, 54000 Nancy. 2018. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01785605>.
119. Pruvost C. Potentiel de la Biodiversité dans la construction de Technosols à partir de déchets urbains| Theses. fr. Paris Est. 2018.
120. United Nations Environment Programme (UNEP). Global Resources Outlook 2024 - Bend the trend: Pathways to a liveable planet as resource use spikes. 2024. <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook-2024>
121. Gallet S. Génie écologique, Ingénierie écologique, Restauration écologique, ... De quoi parle-t-on ? *Colloque Génie écologique et ingénierie écologique - 14-15/11/2024*, 2024. <https://documents.lesentreprisesdupaysage.fr/pub/documents/Presentation-colloque-unep-2024.pptx>
122. Jaunatre R. Dynamique et restauration d'une steppe méditerranéenne après changements d'usages (La Crau, Bouches-du-Rhône, France) - Thèse. Université d'Avignon. 2012. <https://theses.hal.science/tel-00862398/document>.
123. Autorité environnementale (Ae). Rapport annuel 2022 de l'Autorité environnementale. Le Zéro artificialisation nette (ZAN). *Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD)*, 2023. https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ra-ae_2022_web_dble_cle0f2197.pdf
124. Ministère chargé de l'Écologie, Direction générale de la Prévention des Risques (DGPR), Service des risques technologiques (SRT), Bureau du sol et du sous-Sol (B3S). Guide sur la conservation de la mémoire et les restrictions d'usage en contexte de sites et sols pollués. Version soumise à consultation - 04/10/2024. 2024.
125. Office français de la biodiversité (OFB). Portail technique : le site pour les professionnels de la biodiversité. Guide de détermination des habitats terrestres et marins de la typologie Eunis. <https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-guides-protocoles/guide-determination-habitats-terrestres-marins-typologie-eunis> [Consulté le : 06/10/2024]
126. Ministère chargé de l'Écologie. Doctrine relative à la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur le milieu naturel. 2012. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Doctrine%20ERC.pdf>
127. Portail Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement (DRIAS). Les futurs du climat. Espace Données et Produits. <https://www.drias-climat.fr/commande> [Consulté le : 06/10/2024]
128. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). Standard mondial de l'UICN pour les solutions fondées sur la nature : Cadre accessible pour la vérification, la conception et la mise à l'échelle des SFN - Première édition. 2020. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2020-020-Fr.pdf>
129. Direction régionale et interdépartementale de l'Environnement, de l'Aménagement et des Transports (DRIEAT Île-de-France). GéoNat'idF, plateforme régionale de partage et de diffusion des données naturalistes. 2024. <https://www.drieat.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/geonat-idf-plateforme-regionale-de-partage-et-de-a12941.html> [Consulté le : 16/10/2024]
130. Naturefrance. Naturefrance et le Système d'information sur la biodiversité (SIB). <https://naturefrance.fr/systeme-information-biodiversite> [Consulté le : 17/10/2024]
131. Parlement européen, Conseil de l'Union européenne, 2000. Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Journal officiel n° L 327 du 22/12/2000 p. 0001 - 0073. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0060:fr:HTML>.
132. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). Orientations générales d'utilisation de Standard mondial de l'UICN pour les solutions fondées sur la nature : Cadre accessible pour la vérification, la conception et la mise à l'échelle de solutions fondées sur la nature - Première édition. 2020. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2020-021-Fr.pdf>
133. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), Ministère chargé de l'Écologie, Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et al. L'évaluation écotoxicologique de la qualité des sols : Des bioessais d'écotoxicité pour l'évaluation par exposition directe de la qualité du sol. *Fiches Sites et sols pollués : Techniques Innovantes*, 2022. https://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/documents/2023-11/guide_fiches_ti_v5_01_12_2023.pdf
134. Muséum National d'Histoire Naturelle, Département Homme et Environnement. Site Internet Vigie-Nature. <https://www.vigienature.fr/> [Consulté le : 06/10/2024]
135. Prach K, Durigan G, Fennessy S et al. A primer on choosing goals and indicators to evaluate ecological restoration success. *Restoration Ecology* 2019 ; 27(5) : 917-923. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13011>.

136. Gatica-Saavedra P, Echeverría C, Nelson CR. Ecological indicators for assessing ecological success of forest restoration: a world review. *Restoration Ecology* 2017 ; 25(6) : 850-857. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.12586>.
137. Ranjard L, Chemidlin Prévost Bouré N, Dequiedt S *et al.* Le projet AgrInnov, ou comment mettre en place le premier tableau de bord d'indicateurs opérationnels pour évaluer la qualité biologique des sols agricoles et leur durabilité. *Institut national de la recherche agronomique (INRA)*, 2015. https://agriressources.fr/fileadmin/user_upload/Auvergne-Rhone-Alpes/177_Eve-agriressources/fertisols/RESSOURCES/Diagnostic/Nov2015-Comifer-Gemas-ARTICLE-RANJARD.pdf
138. Calvaruso C, Blanchart A, Bertin S. Diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers : indicateurs de suivi et stratégies de déploiement *Agence de la transition écologique (ADEME)*, 2019. <https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/290-diagnostic-de-la-qualite-des-sols-agricoles-et-forestiers.html>
139. European Commission (EC), Directorate-General for Research Innovation. Evaluating the impact of nature-based solutions – A handbook for practitioners. *Publications Office of the European Union*, 2021. <https://doi.org/10.2777/244577>
140. Wendling L, Rinta-Hiiri V, Jermakka J *et al.* Performance and Impact Monitoring of Nature-Based Solutions. *Projet Urban Nature Labs (UNaLab)*, 2019. D3.1 Deliverable. <https://unalab.eu/system/files/2020-02/d31-nbs-performance-and-impact-monitoring-report2020-02-17.pdf>
141. Pardo T, Clemente R, Epelde L *et al.* Evaluation of the phytostabilisation efficiency in a trace elements contaminated soil using soil health indicators. *Journal of Hazardous Materials* 2014 ; 268 : 68-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.01.003>.
142. Bhaduri D, Sihi D, Bhowmik A *et al.* A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Frontiers in Microbiology* 2022 ; 13 : 938481. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481>.
143. Séré G, Le Guern C, Bispo A *et al.* Selection of soil health indicators for modelling soil functions to promote smart urban planning. *Science of the Total Environment* 2024 ; 924 : 171347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171347>
144. Marque Végétal local. Garantir et préserver la diversité génétique. <https://www.vegetal-local.fr/la-marque> [Consulté le : 07/10/2024]
145. Sordello R. Trame verte, trame bleue et autres trames. Regard R72. *Société Française d'écologie*, 2021. <https://sfecologie.org/wp-content/uploads/2017/05/R72-Sordello-2017-1.pdf>
146. Rizvi A, Barrow E, Zapata F *et al.* Ecosystem based adaptation: Building on no regret adaptation measures. *Session of the Conference of the Parties to the UNFCCC, Session of the Conference of the Parties to the Kyoto Protocol*, 2014. <https://iucn.org/sites/default/files/2022-07/iucn-eba-technical-paper-no-regret-actions-20-lima.pdf>
147. Site Territoires & Climat. Résilience des territoires - faits et enjeux. <https://www.territoires-climat.ademe.fr/ressource/410-%20144> [Consulté le : 08/10/2024]
148. Song Y, Kirkwood N, Maksimović Č *et al.* Nature based solutions for contaminated land remediation and brownfield redevelopment in cities: A review. *Science of the Total Environment* 2019 ; 663 : 568-579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.347>.
149. Mission Économie de la Biodiversité (MEB). BIODIV'2050. Évaluation socioéconomique des Solutions fondées sur la Nature. *CDC Biodiversité*, 2019. https://www.cdc-biodiversite.fr/publications/evaluation-socioeconomique-des-solutions-fondees-sur-la-nature_revue-biodiv-2050-n17_2019/
150. Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France (ARB îdF). Webinaire Les fausses bonnes idées : les espèces exotiques envahissantes. 2024. https://www.youtube.com/watch?v=t-Fj9kps8aE&ab_channel=ARB%C3%8Eile-de-France [Consulté le : 16/10/2024]
151. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Sésame : Intégrer l'arbre dans vos projets de renaturation urbaine. <https://sesame.cerema.fr/> [Consulté le : 07/10/2024]
152. Agence de la transition écologique (ADEME), Association des maires de France (AMF). Plus fraîche ma ville. <https://plusfraichemaville.fr/aide-decision> [Consulté le : 07/10/2024]
153. Plateforme EVNATURB - Évaluation des performances écosystémiques d'une renaturation du milieu urbain. <https://hmco.enpc.fr/portfolio-archive/evnaturb/#:~:text=The%20four%20years%20EVNATURB%20project%20aims> [Consulté le : 04/10/2024]
154. Plante&Cité. Floriscope. Connaître, choisir et trouver des plantes pour les jardins et les espaces verts. <https://www.floriscope.io/> [Consulté le : 18/12/2024]

155. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Evaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques. Ecosystèmes urbains. Tomes 1 et 2, annexes. Etude et rapport. 2018. https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/590375/evaluation-francaise-des-ecosystemes-et-des-services-ecosystemiques-ecosystemes-urbains-tomes-1-et-2?_lg=fr-FR
156. Flanquart H. Acceptabilité. Les mots du risque, Le vocabulaire des sciences sociales pour décrire et analyser les risques et les nuisances, Hypothèses. <https://risques.hypotheses.org/a-b-c/acceptabilite> [Consulté le : 22/12/2024]
157. Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB). Trame verte et bleue : les outils pour sa mise en œuvre. Outils de gestion et de planification Cahier technique N° 91. *Ministère chargé de l'Écologie, Agence française pour la biodiversité (AFB) (aujourd'hui intégrée à l'Office français de la biodiversité (OFB))*, 2017. https://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/references_bibliographiques/cahier_technique_afb_outils_tvb.pdf
158. Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN), Centre d'études techniques de l'équipement (CETE) Méditerranée. Stratégies foncières locales et mobilisation des outils fonciers en faveur de la biodiversité : Guide méthodologique. 2013. <https://territoire-environnement-sante.fr/sites/pnse4/files/fichiers/2021/05/Strat%C3%A9gies%20fonci%C3%A8res%20locales%20et%20mobilisation%20des%20outils%20fonciers%20en%20faveur%20de%20la%20biodiversit%C3%A9.pdf>
159. Desrousseaux M. *La protection juridique de la qualité des sols*. Librairie générale de droit et de jurisprudence (LGDJ), 2016.
160. Parlement européen, Conseil de l'Union européenne, 2024. RÈGLEMENT DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL relatif à la restauration de la nature et modifiant le règlement (UE) 2022/869. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0089_FR.pdf.
161. Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE). Toujours plus d'habitants dans les unités urbaines. 2020. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4806684> [Consulté le : 10/10/2024]
162. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Implication citoyenne et nature en ville - Premiers enseignements issus de sept études de cas en France. 2016. <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/implication-citoyenne-nature-ville-premiers-enseignements>
163. Fleury C, Prévot A-C. *Le Souci de la nature. Apprendre, inventer, gouverner*. CNRS éditions, 2017.
164. Kahn Jr PH. 2002. Children's affiliations with nature: Structure, development, and the problem of environmental generational amnesia, dans *Children and nature: Psychological, sociocultural, and evolutionary investigations*. p. 93-116.
165. Cormier L, Joliet F, Carcaud N. La biodiversité est-elle un enjeu pour les habitants ? Analyse au travers de la notion de trame verte. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie* 2012 ; 3(2). DOI: <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.9319>.
166. Bonthoux S, Chollet S. Wilding cities for biodiversity and people: a transdisciplinary framework. *Biological Reviews* 2024 ; . DOI: <https://doi.org/10.1111/brv.13076>.
167. Soga M, Gaston KJ. Extinction of experience: the loss of human–nature interactions. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2016 ; 14(2) : 94-101. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fee.1225>.
168. Prévot A-C, Cheval H, Raymond R *et al.* Routine experiences of nature in cities can increase personal commitment toward biodiversity conservation. *Biological conservation* 2018 ; 226 : 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.07.008>.
169. Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES). Le rapport de l'évaluation mondiale de la biodiversité et les services écosystémiques - résumé à l'intention des décideurs. 2019. https://files.ipbes.net/ipbes-web-public-files/2020-02/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers_fr.pdf
170. Office français de la biodiversité (OFB). Relations humains – biodiversité. <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1083> [Consulté le : 10/10/2024]
171. Bert V, Flanquart H. *Chapitre 15 : Quels sont les freins sociaux et économiques à l'instauration du phytomanagement*. Éditions Quæ (Ouvrage en cours d'écriture).
172. Kathleen Monod, Coordonnatrice thématique "aménagement du territoire" - Office français de la biodiversité (OFB). Définition et enjeux de la renaturation. *AGAPE Lorraine Nord - La renaturation et la désartificialisation des sols, une stratégie à adopter pour les territoires dans la perspective du ZAN, Mémo*, 2022. https://www.agape-lorrainord.eu/uploads/tx_dklibrochures/20220720_memO_Renaturation_et_perspective_ZAN.pdf
173. Agence de la transition écologique (ADEME). Mieux préserver les sols en 10 questions. 2024. <https://librairie.ademe.fr/ged/8528/guide-mieux-preserver-sols.pdf>

174. Association française pour l'étude des sols (AFES). Sciences et Recherches participatives sur les sols. <https://www.afes.fr/nos-missions/reconnaitre-et-federer/recherches-participatives/> [Consulté le : 11/10/2024]
175. Inventaire national du patrimoine naturel (INPN). INPN Espèces. <https://inpn.mnhn.fr/accueil/participer/inpn-especes> [Consulté le : 11/10/2024]
176. Jaeger A. La nature en ville : comment accélérer la dynamique ? *Conseil économique, social et environnemental (CESE)*, 2018. NOR : CESL1100021X. <https://www.lecese.fr/travaux-publies/la-nature-en-ville-comment-acceler-la-dynamique>
177. Ministère chargé de l'Écologie. Zéro Artificialisation Nette : Guide synthétique. 2023. <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bibliographie/zan-guide-synthetique>
178. Plan vert d'Île-de-France. Définition de la Carence selon le Plan Vert. Comment s'apprécie la carence en espaces verts dans le Plan vert 2017 ? . 2017. <https://www.iledefrance-nature.fr/wp-content/uploads/2023/12/Definition-de-la-Carence-selon-le-Plan-Vert.pdf>
179. BERT Valérie, Ineris, GRIGNET Arnaud, Ineris-ULCO-UCEIV, LOUNES - HADJ SAHRAOUI Anissa, ULCO-UCEIV *et al.* Production de biomasses enrichies en Zn par phytoextraction pour l'écocatalyse. 2023. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-territoires-et-sols/7823-production-de-biomasses-enrichies-en-zn-par-phyto-extraction-pour-l-eco-catalyse.html>
180. Geoffrion P. *Le groupe de discussion. Recherche sociale: de la problématique à la collecte des données*. Pesse de l'Université du Québec, B. Gautier (ed.), 2003.
181. van den Bosch M, Ode Sang Å. Urban natural environments as nature-based solutions for improved public health – A systematic review of reviews. *Environmental Research* 2017 ; 158 : 373-384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.040>.
182. Laurent É. *Et si la santé guidait le monde ? L'espérance de vie vaut mieux que la croissance*. Les liens qui libèrent, 2020.
183. Corvalan C, Hales S, McMichael A. Ecosystems and human well-being : health synthesis : a report of the Millennium Ecosystem Assessment. *World Health Organization*, 2005. 9241563095. <https://iris.who.int/handle/10665/43354>
184. Reid H, Ali L. Ecosystem-based approaches to adaptation: strengthening the evidence and informing policy: Research results from the Incentive-based Hilsa Conservation Programme, Bangladesh. London, UK: IIED. *IIED, UNEP, IUCN*, 2019. <http://pubs.iied.org/17625IIED>
185. Markevych I, Schoierer J, Hartig T *et al.* Exploring pathways linking greenspace to health: Theoretical and methodological guidance. *Environmental Research* 2017 ; 158 : 301-317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.06.028>.
186. WHO Regional Office for Europe. Urban green spaces and health. A review of evidence. *World Health Organization (WHO)*, 2016. <https://www.who.int/europe/publications/i/item/WHO-EURO-2016-3352-43111-60341>
187. WHO Regional Office for Europe. Urban green space interventions and health: A review of impacts and effectiveness. *World Health Organization (WHO)*, 2017. <https://www.who.int/andorra/publications/m/item/urban-green-space-interventions-and-health--a-review-of-impacts-and-effectiveness.-full-report>
188. Meyer-Grandbastien A, Vajou B, Fromage B *et al.* Effets bénéfiques des espaces de nature en ville sur la santé : Synthèse des recherches internationales et clés de compréhension. *Plante & Cité*. 2021. https://www.citeverte.com/fileadmin/Citeverte_Ressources/PDF/Publication_Synthese-recherches-nature-et-sante.pdf
189. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Nature en ville - Fiche n°03 – Nature en ville et santé. 2018.
190. James P, Hart JE, Banay RF *et al.* Exposure to greenness and mortality in a nationwide prospective cohort study of women. *Environmental health perspectives* 2016 ; 124(9) : 1344-1352. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.1510363>.
191. Sandifer PA, Sutton-Grier AE, Ward BP. Exploring connections among nature, biodiversity, ecosystem services, and human health and well-being: Opportunities to enhance health and biodiversity conservation. *Ecosystem Services* 2015 ; 12 : 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.12.007>.
192. Frumkin H, Bratman GN, Breslow SJ *et al.* Nature Contact and Human Health: A Research Agenda. *Environmental Health Perspectives* 2017 ; 125(7) : 075001. DOI: <https://doi.org/10.1289/EHP1663>.
193. Hoffman J. Improving Community Health and Wellbeing through Ecological Restoration. *The United States Environmental Protection Agency's Center for Computational Toxicology and Exposure*, 2021. https://epa.figshare.com/articles/presentation/Community_Health_and_Wellbeing_through_Ecological_Restoration/16598618
194. Desbiolles A. *L'éco-anxiété: Vivre sereinement dans un monde abîmé*. Fayard, 2020.

195. Albrecht G. *Les émotions de la Terre: Des nouveaux mots pour un nouveaux monde*. Les liens qui libèrent, 2020.
196. Kellert SR, Wilson EO. *The biophilia hypothesis*. Island Press, 1993.
197. Carson R. *The sense of wonder*. Harper Perennial, 1956.
198. Kahn PH. *The human relationship with nature: Development and culture*. MIT Press, 1999.
199. Kahn Jr PH, Kellert SR. *Children and nature: Psychological, sociocultural, and evolutionary investigations*. MIT press, 2002.
200. Kaplan S. 1992. *The restorative environment: Nature and human experience*. Timber Press.
201. Office français de la biodiversité (OFB). Les bienfaits de la biodiversité sur notre santé. <https://www.ofb.gouv.fr/la-biodiversite-lassurance-sante/les-bienfaits-de-la-biodiversite-sur-notre-sante> [Consulté le : 13/10/2024]
202. Santé publique France (SpF). Préserver la nature pour protéger la santé des populations. *La Santé en action*, Octobre 2024, n°467, 2024. <https://www.santepubliquefrance.fr/docs/la-sante-en-action-octobre-2024-n-467-preserver-la-nature-pour-protoger-la-sante-des-populations>
203. Rosenzweig ML. *Win-win ecology: how the earth's species can survive in the midst of human enterprise*. Oxford University Press, 2003.
204. Merchant C. *Reinventing Eden: The fate of nature in Western culture*. Routledge, 2004.
205. Guetté A, Carruthers-Jones J, Godet L et al. « Naturalité » : concepts et méthodes appliqués à la conservation de la nature. *Cybergeo: European Journal of Geography* 2018 ; . DOI: <https://doi.org/10.4000/cybergeo.29140>.
206. Lecomte J. Réflexions sur la naturalité. *Courrier de l'environnement de l'INRA* n°37, 1999. <https://hal.science/hal-01203602v1/file/C37Lecomte.pdf>
207. Larrère C, Larrère R. *Du bon usage de la nature : Pour une philosophie de l'environnement*. Éditions Flammarion, 2022 (édition originale : 1997).
208. Site Internet biodiversité.gouv.fr. Les 5 pressions responsables de l'effondrement de la biodiversité. <https://biodiversite.gouv.fr/les-5-pressions-responsables-de-leffondrement-de-la-biodiversite> [Consulté le : 15/10/2024]
209. Cowie RH, Bouchet P, Fontaine B. The Sixth Mass Extinction: fact, fiction or speculation? *Biological Reviews* 2022 ; 97(2) : 640-663. DOI: <https://doi.org/10.1111/brv.12816>.
210. Young TP. Restoration ecology and conservation biology. *Biological conservation* 2000 ; 92(1) : 73-83. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(99\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(99)00057-9).
211. International Union for Conservation of Nature (IUCN). A review of the impact of IUCN resolutions on international conservation efforts. 2012. <https://portals.iucn.org/library/node/10093>
212. Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Décennie des Nations Unies pour la restauration des écosystèmes. Prévenir, arrêter et inverser la perte de la nature. <https://www.decadeonrestoration.org/fr> [Consulté le : 15/10/2024]
213. Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal. 2022. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-15/cop-15-dec-04-fr.pdf>
214. Taylor PW. *Respect for nature: A theory of environmental ethics*. Princeton University Press, 2011 (date de première publication : 1986).
215. Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES). Affronter Ensemble Cinq Crises Mondiales Interconnectées en Matière de Biodiversité, d'Eau, d'Alimentation, de Santé et de Changement Climatique. Rapport Nexus d'évaluation sur les liens entre la biodiversité, l'eau, l'alimentation et la santé. 2024. <https://www.ipbes.net/nexus>
216. Ministère chargé de l'Économie. Qu'est-ce que la responsabilité sociétale des entreprises (RSE) ? 2024. <https://www.economie.gouv.fr/entreprises/responsabilite-societale-entreprises-rse#> [Consulté le : 12/10/2024]
217. Organisation internationale de normalisation (ISO : International Organization for Standardization). ISO 26000:2010 - Lignes directrices relatives à la responsabilité sociétale. 2010. <https://www.iso.org/fr/iso-26000-social-responsibility.html>
218. World Health Organization (WHO). Connecting global priorities: biodiversity and human health: a state of knowledge review. *Convention on Biological Diversity (CBD)*, 2015. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241508537>
219. Union Internationale pour la conservation de la nature (UICN) France. Panorama des services écologiques fournis par les milieux naturels en France – volume 1 : contexte et enjeux. 2012. https://uicn.fr/wp-content/uploads/2012/07/Brochure_Panorama_des_services-vol1.pdf
220. Office français de la biodiversité (OFB), Fédération Nationale des SCoT, Union professionnelle du génie écologique (UPGE). Stratégie écologique territoriale : Intégrer la biodiversité dans l'aménagement du territoire. 2024. <https://www.fedescot.org/publications/etudes>

221. CDC Biodiversité. Nature en ville : aménager aujourd'hui les communes de demain - LES CAHIERS DE BIODIV'2050 – COMPRENDRE N°17. 2021. <https://www.cdc-biodiversite.fr/download/nature-en-ville-amenager-aujourd'hui-les-communes-de-demain/>
222. Ministère chargé de l'Écologie, Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité. Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE) - Cadre conceptuel. *Théma-Balises*, 2017. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/Thema%20-%20Efese%20-%20Le%20cadre%20conceptuel.pdf>
223. Breure A, De Deyn G, Dominati E *et al.* Ecosystem services: a useful concept for soil policy making! *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2012 ; 4(5) : 578-585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.010>.
224. Vo Van C. La nature source de biodiversité au sein des territoires. De l'outil à la stratégie. Guide méthodologique. *Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema)*, 2022. <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/592529/la-nature-source-de-biodiversite-au-sein-des-territoires-de-l-outil-a-la-strategie-guide-methodologi>
225. Versini P-A. « Renaturer » les villes, une voie prometteuse pour mieux s'adapter au changement climatique. 2024. <https://theconversation.com/renaturer-les-villes-une-voie-prometteuse-pour-mieux-sadapter-au-changement-climatique-239624> [Consulté le : 01/10/2024]
226. Gouvernement français. Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC 3). Document de présentation. 2024. https://consultation-pnacc.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2024-10/Document_de_presentation_du_PNACC_3.pdf
227. World Health Organization (WHO), United Nations Children's Fund (UNICEF), Food and Agriculture Organization (FAO) *et al.* Contributing to One world, One health. A Strategic Framework for reducing risks of infectious diseases at the animal-human-ecosystems interface. 2008. <https://www.fao.org/4/aj137e/aj137e00.pdf>
228. Conférence des parties à la Convention sur la diversité biologique. Décision adoptée par la Conférence des parties à la Convention sur la diversité biologique. Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal. *Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE)*, 2022. CBD/COP/DEC/15/4. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-15/cop-15-dec-04-fr.pdf>
229. Ministère chargé de l'Écologie, Ministère chargé de la Santé. Quatrième Plan national santé-environnement (PNSE4). Un environnement, une santé. 2021. <https://sante.gouv.fr/sante-et-environnement/les-plans-nationaux-sante-environnement/article/plan-national-sante-environnement-4-pnse-4-un-environnement-une-sante-2021-2025>
230. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). One Health : une seule santé pour les êtres vivants et les écosystèmes. 2023. <https://www.anses.fr/fr/content/one-health-une-seule-sante-pour-les-etres-vivants-et-les-ecosystemes> [Consulté le : 15/10/2024]
231. Lombard Latune J. La compensation écologique : du principe de non perte nette de biodiversité à son opérationnalisation - analyse de l'action collective. *Université Paris-Saclay*, 2018. NNT: 2018SACLA040. https://erc-biodiversite.ofb.fr/sites/default/files/2020-08/70704_LOMBARD_LATUNE_2018_archivage.pdf
232. Ministère chargé de l'Écologie. Guide pratique pour limiter l'artificialisation des sols. 2021. <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bibliographie/guide-pratique-limiter-artificialisation-sols-sobriete-fonciere>
233. ADEME (Laurent Chateau), ARCADIS (LaureLenguema AB, Maximilien Piquant), , EFFICACITY (Lionel Cauchard). Evaluer les bénéfices socio-économiques de la reconversion de friches pour lutter contre l'artificialisation. Outil BENEFRICHERS. Mise à jour. *Agence de la transition écologique (ADEME)*, 2022. <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique/3772-evaluer-les-benefices-socio-economiques-de-la-reconversion-de-friches-pour-lutter-contre-l-artificialisation-outil-benefriches.html>
234. Chateau L. Pourquoi réhabiliter des friches urbaines est moins coûteux qu'il n'y paraît. *The Conversation*, 2022. <https://theconversation.com/pourquoi-rehabiliter-des-friches-urbaines-est-moins-couteux-quil-ny-parait-182101>
235. Ipsos, Union Nationale des Entreprises du Paysage (Unep). Enquête « Jardins et espaces verts, l'exception culturelle française ? ». 2013. <https://www.lesentreprisesdupaysage.fr/content/uploads/2019/12/dp-unep-ipsos-2013.pdf>
236. Mission présidée par Guillaume Sainteny. Les aides publiques dommageables à la biodiversité. *Centre d'Analyse Stratégique*, 2012. https://strategie.archives-spm.fr/cas/system/files/rapport_43_web_0.pdf
237. Commissariat général au développement durable (CGDD). Fiscalité environnementale. Un état des lieux. *Ministère chargé de l'Écologie*, 2017. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/IMG/pdf/thc3a9ma20-255bb.pdf>

238. Comité pour l'Économie Verte (CEV). Les instruments incitatifs pour la maîtrise de l'artificialisation des sols. 2019. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Les%20instruments%20incitatifs%20pour%20la%20maîtrise%20de%20l'artificialisation%20des%20sols.pdf>
239. Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Rethinking Urban Sprawl: Moving Towards Sustainable Cities. 2018. <https://doi.org/10.1787/9789264189881-en>
240. Béchet B. (coord.), Le Bissonnais Y. (coord.), Ruas A. (coord.). Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols. Déterminants, impacts et leviers d'action. *Institut national de la recherche agronomique (INRA), Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar)*. 2017. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/artificialisation-des-sols-rapport-en-francais-1.pdf>
241. Fédération nationale des agences d'urbanisme (FNAU). Repenser les écosystèmes par la planification : Vers des solutions d'adaptation fondées sur la nature dans les documents d'urbanisme. *Les dossiers FNAU - N° 53*, 2022. <https://www.fnau.org/fr/publication/repenser-les-ecosystemes-par-la-planification-vers-des-solutions-dadaptation-fondees-sur-la-nature-dans-les-documents-durbanisme/>
242. CPIE Sèvre et Bocage. Renaturation des zones d'activités économiques. Cadre de référence à destination des collectivités. Retours d'expériences de six intercommunalités dans le cadre du Contrat Nature du Pays du Bocage Vendéen. 2024. <https://www.cpie-sevre-bocage.com/cpie/Content.aspx?ID=222739>
243. Plateforme Nature4Cities. <https://www.nature4cities.eu/nature4cities-platform> [Consulté le : 06/01/2025]
244. Bockarjova M, Botzen WJW. Nature Based Urban Innovation (NATURVATION) Project - Review of Economic Valuation of Nature Based Solutions in Urban Areas. Deliverable 1.3 Part III May 2017 *Universiteit Utrecht*, 2017. https://naturvation.eu/sites/default/files/result/files/review_of_economic_valuation_of_nature_based_solutions_in_urban_areas.pdf
245. Bockarjova M, Wouter Botzen WJ, Koetse M. Briefing Note. Financial and Economic Values Database. Deliverable 1.2. *NATURVATION*, 2017. <https://naturvation.eu/result/briefing-financial-and-economic-values-database.html>
246. Tromeur É, Pommeret A. Mettre en valeur(s) la biodiversité : état des lieux et perspectives. *France Stratégie*, 2024. https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2024-na_147-biodiversite-modifiee_janvier_2025_1.pdf
247. Ministère chargé de l'Écologie, 2024. Décret n° 2024-1052 du 21 novembre 2024 relatif à la restauration de la biodiversité, à la renaturation et à la compensation des atteintes à la biodiversité. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000050654369>.
248. République française, 2023. Loi n° 2023-973 du 23 octobre 2023 relative à l'industrie verte (1). https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000048242327.
249. Weissgerber M, Roturier S, Julliard R *et al.* Biodiversity offsetting: Certainty of the net loss but uncertainty of the net gain. *Biological conservation* 2019 ; 237 : 200-208. DOI: <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.biocon.2019.06.036>.
250. Autorité environnementale (Ae). Rapport annuel 2023 de l'Autorité environnementale. L'évaluation environnementale : un outil de progrès pour l'environnement et la démocratie. *Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD)*, 2024. https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ra-ae_2023_01_juillet_300ppp_hd_2cr_cle279e2b.pdf
251. Autorité environnementale (Ae). Rapport annuel 2021 de l'Autorité environnementale. *Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD)*, 2022. https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ra2021-ae-v6_cle7d4d87.pdf
252. Commissariat général au développement durable (CGDD). La séquence "éviter, réduire et compenser", un dispositif consolidé. *Ministère chargé de l'Écologie*, 2017. <https://side.developpement-durable.gouv.fr/CENT/doc/SYRACUSE/384764/la-sequence-eviter-reduire-et-compenser-un-dispositif-consolide?lq=fr-FR>
253. Saada A, Blanc C, Colombano S *et al.* Protocole opérationnel de gestion de sites par ATTEnuation NATurelle dans le contexte réglementaire français. Projet ATTENA – Phase 2. *ADEME, Ineris, IFP, APESA, Arcelor Real Estate France, TOTAL, Rhodia, BURGEAP*, 2023. https://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/documents/2022-05/attena-protocole_vfinal.pdf

11 Annexes

Liste des annexes :

Annexe 1 : Comptes-rendus de l'ensemble des entretiens réalisés

Annexe 1 : Comptes-rendus de l'ensemble des entretiens réalisés

NB : ces comptes-rendus synthétiques présentent la compréhension par l'Ineris du contenu des échanges ayant eu lieu pendant les interviews réalisées. Ces comptes-rendus n'ont pas fait l'objet d'une validation formelle de la part des personnes interviewées et n'engagent que l'Ineris.

Dans le cadre de ces interviews, les personnes interviewées se sont exprimées à titre personnel, intuitu personae, et n'ont pas visé à représenter un de leurs organismes d'affiliation. Les points de vue exprimés ne reflètent pas nécessairement les décisions ou la politique déclarée de ces organismes.

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Benjamin Pauget - TESORA, Responsable recherche et développement, 17 octobre 2023

La renaturation renverrait à l'idée de maintien de l'environnement actuel, en maîtrisant les risques environnementaux, notamment lorsque les écosystèmes en place sont fonctionnels.

Lorsque les risques sanitaires résiduels sont trop élevés, sanctuariser des friches pour pérenniser le bon fonctionnement de certains écosystèmes en place, cela pourrait être de la renaturation. A l'inverse, le décret n°2022-1588 présuppose le besoin d'apporter des modifications, et dans certains cas, ces modifications pourront déséquilibrer l'état du sol considéré et des écosystèmes associés.

« Usage naturel », « usage de nature » ou encore « usage environnemental » seraient des notions plus intéressantes que « renaturation ».

La renaturation pourrait aussi inclure les opérations de désimperméabilisation des sols, suivies de récréation d'un sol vivant à partir du substrat en place, par exemple avec des amendements et des technosols, afin d'obtenir un espace végétalisé par la suite.

La renaturation renverrait aussi à l'idée de « redonner tous ses droits » à la nature, à ne plus la contraindre, potentiellement après une première étape d'ingénierie.

Par exemple, une pollution résiduelle en plomb ou en arsenic peut être, d'un côté, inacceptable pour l'humain, et de l'autre, générer un impact environnemental très faible. Ex : pas de potentiel de lixiviation, pas d'impact mesurable avec des bioindicateurs, etc.

Certains outils présentent des référentiels, avec des profils de bioindicateurs basés sur des jeux de données robustes, pour différents types d'usages et d'environnements. Par exemple : nématodes. Néanmoins, d'une manière générale, on manque beaucoup de référentiels.

A ce stade, c'est rarement les clients qui sont eux-mêmes demandeurs de renaturation, c'est plus une proposition de bureau d'études.

Si le risque sanitaire est acceptable, cela oriente vers un usage de type parc urbain. Si non, et si les risques environnementaux sont maîtrisés, on peut s'orienter vers un usage de nature. L'option parc urbain ne serait pas vraiment de la renaturation, car exerçant encore trop de contraintes sur les écosystèmes. Le milieu doit pouvoir se développer « naturellement ».

Un verger correspond à moins d'intervention que d'autres cultures, cela peut être vu comme du « semi-naturel ».

Les indicateurs utilisés pourraient être assez simples, des bioindicateurs (type nématodes (biodiversité, richesse en nutriments, capacité à dégrader la matière organique, etc.), oméga 3 (éco-toxicité ; pas de référentiel mais site témoin ou sol de référence en laboratoire), transfert plantes ([phyto-Ac], ex phytomètre ; il y a un référentiel), transfert escargot (sur site ou en laboratoire ; il y a des référentiels ; caractérisation d'un excès de transfert ; mobilité et accumulation dans l'escargot, ouverture vers une potentielle biomagnification), bactériologie du sol (mais peu de référentiels, par exemple pour l'ARN environnemental)) qui permettent d'avoir une vision directe de ce qui se passe dans le sol, de si « ça fonctionne ». Indicateurs de la TRIADE (on en trouve dans des appels d'offre à présent), avec IdP en amont. On peut aussi considérer des indicateurs visuels - Ex : est-ce qu'il y a des végétaux qui poussent, couverture végétale et sa qualité ; indice de Shanon, diversité végétale - qui peuvent être utilisés aussi pour le suivi

Les services écosystémiques sont intéressants à considérer, mais peut-être un peu trop centrés sur l'Humain.

Matrice SWOT 1 : Usage de renaturation – entretien avec Benjamin Pauget (TESORA)

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
La renaturation peut être aussi simple que de ne rien faire, dans certains cas où la biologie des sols est déjà fonctionnelle.	Le décret n°2022-1588 associe la renaturation à un changement, à des actions humaines, et présuppose que le sol considéré est dégradé, peu fonctionnel, qu'on se doit de l'améliorer.
Une zone sanctuarisée pour la nature, dont les sols présentent des concentrations inacceptables pour un usage humain, pourrait être ouverte au public via un sentier pédestre basé sur une couche de concassé, un sentier de balade ou un sentier pédagogique. Cette option présente de multiples co-bénéfices : îlot de chaleur, exposome, contact avec la nature, activité physique, etc.	Selon la définition du décret n°2022-1588, avec ses « ou », juste enlever une dalle de béton et laisser en place une couche sous-jacente de concassé sans vie, cela pourrait déjà être considéré comme de la renaturation, alors que cela paraît clairement insuffisant.
Un usage de nature, avec une friche rendue inaccessible au public par exemple, constitue une opération peu coûteuse pour les maîtres d'ouvrages et à forte valeur ajoutée potentielle pour la biodiversité, notamment au regard de mesures d'excavation.	
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
Intégrer/renforcer les aspects environnementaux dans la méthodologie SSP.	Les projets d'agriculture, et notamment les projets d'agriculture urbaine, gagneraient à être inclus dans le périmètre de la renaturation (pleine terre, infiltration, séquestration de carbone, etc.), une renaturation d'un autre type que la sanctuarisation, mais qui implicitement implique de la nature.
Certains indicateurs simples peuvent déjà être bien utiles. Ex : Turn-over de matière organique (indicateur indirect de fonctionnalité globale / dégradation de la matière organique)	Un sol présente plusieurs fonctions. Il est difficile de définir objectivement à partir de quand un sol peut être jugé « fonctionnel », et inversement, à partir de quand il aurait besoin d'être renaturé. Notamment parce qu'il y a un manque de référentiels par types de milieux, présentant différents profils d'indicateurs biologiques.
Sensibiliser les maîtres d'ouvrage, les collectivités et autorités locales au fait que le sol n'est pas qu'un support géotechnique, c'est aussi un support biologique ; qu'il peut y avoir des écosystèmes intéressants sur des sites contaminés.	Dans les zones avec une forte pression foncière, la renaturation ne fait pas partie des priorités. Il faudrait trouver un moyen que les aménageurs y voient plus d'intérêt pour eux.
	Le risque sanitaire reste largement prioritaire par rapport au risque environnemental. Par exemple, si les risques sanitaires calculés sont acceptables, alors les risques environnementaux peuvent ne pas être calculés, pour éviter toute situation de blocage.

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Souhir Soussou - Fertil'Innov Environnement, présidente, 16 octobre 2023

Le terme « renaturation » est très général. Il renvoie à un processus qui peut être spontané ou aidé. Chez Fertil'Innov, la renaturation est abordée sous l'angle de la restauration et de la re-végétalisation, ce sont des notions qui se rejoignent.

A ce stade, le marché lié à la renaturation est un marché de niche. Fertil'Innov reçoit des demandes notamment pour des sites et sols pollués et pour des carrières.

Chez Fertil'Innov, la renaturation consiste à impliquer le vivant - les espèces végétales et les micro-organismes - pour mettre en place un milieu fonctionnel.

Saint Laurent le Minier présente une ancienne mine de zinc, de plomb et de cadmium, dont la sécurisation (potentiels risques sanitaires pour les riverains / envol de poussières) a inclus des actions de phytostabilisation aidée. Les travaux ont consisté en :

- une phase de diagnostic *in situ* (anomalies potentielles liées au sol, aux microorganismes, à la diversité des espèces végétales en présence), s'appuyant sur des analyses de sol, des observations *in situ* et des analyses en laboratoire, permettant de choisir les espèces végétales et les micro-organismes les mieux adaptés aux contraintes du site ;
- puis en une phase de phytostabilisation, qui peut être considérée comme de la renaturation car focalisée sur l'utilisation d'espèces végétales et sur de microorganismes bénéfiques à la croissance des plantes. Cette phase s'appuie sur des essais *in situ* visant à valider les conclusions préliminaires obtenues en laboratoire. Ces essais ont été suivis pendant deux ans, et ont conduit à valider un protocole pour la phase de travaux ;
- puis les travaux ont intégré une phase de terrassement, l'apport d'amendements, la mise en place de géotextiles (/ gestion de l'érosion), le semis et la plantation d'espèces autochtones avec leur micro-organismes symbiotiques.

Pour vérifier le bon état écologique, on peut s'appuyer sur :

- la qualité des sols. Ex : matière organique, diversité microbienne, activité enzymatique, stockage de carbone, nématodes, biomasse et diversité microbiennes (au printemps et en automne, les périodes où l'activité microbienne est la plus forte), paramètres agronomiques (ex : rapport C/N, Ph, éléments minéraux) capacité à l'infiltration d'eau ;
- la végétation. Ex : diversité des espèces, migration de la pollution vers les parties aériennes ;
- la biodisponibilité des polluants (EDTA). L'interprétation s'appuie sur l'environnement local témoin, avec un gradient de pollution.

Pour le sol, la référence retenue est un site non-pollué et non-perturbé, se trouvant à proximité du site considéré. La comparaison se fait entre un sol « naturel » local – végétalisé depuis toujours et non affecté -, un sol nu au niveau de l'ancienne mine, et le sol après réhabilitation. On a pu voir que le sol réhabilité se rapproche progressivement du sol naturel. L'objectif est ici de revenir à un état initial, c'est-à-dire à l'état avant l'exploitation de la mine. Et en ce sens, il est bien légitime de parler de renaturation.

Quand il est difficile de trouver un environnement local témoin, par exemple en milieu urbain, on peut parfois s'appuyer sur des référentiels fournis par des laboratoires d'analyses (de sol, principalement).

La définition du décret n°2022-1588 s'inscrit dans une dynamique qui était déjà en place depuis des années. Le décret vient surtout rappeler et insister sur des aspects qui ont peut-être été un peu mis de côté, à certains moments. L'idée est de pousser les gestionnaires et les clients privés à penser au vivant et à la renaturation, avant d'utiliser des techniques conventionnelles moins respectueuses de la vie présente dans les sols. On voit déjà une influence sur le contenu des récents appels à projets.

A partir du moment où de la végétation est présente sur un site, il est utile de considérer l'opportunité de partir de ce potentiel pour la gestion du site.

Les bioindicateurs sont centraux pour estimer la réussite d'une renaturation. Ex : nématodes, oméga, escargots, micro-organismes bénéfiques (notamment à la croissance des végétaux et pour la qualité des milieux). En plus des végétaux, qu'on peut plus facilement observer.

Matrice SWOT 2 : Usage de renaturation – entretien avec Souhir Soussou (Fertil'Innov Environnement)

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
Les opérations de phytostabilisation, et plus généralement celles utilisant des phytotechnologies, puisque focalisées sur l'utilisation d'espèces vivantes (espèces végétales, microorganismes, etc.) peuvent déjà être considérées comme des opérations de renaturation.	Le marché lié à la renaturation est de faible ampleur, à ce stade.
Les techniques de traitement ou de gestion basées sur le vivant sont moins coûteuses que les techniques historiques classiques, et peuvent être suffisamment puissantes pour répondre aux besoins des gestionnaires. Ex : protéger les riverains de l'exposition à l'envol de poussières.	Il existe peu de référentiels permettant de servir d'objectifs pour les activités de renaturation.
Le « potentiel du vivant » est de plus en plus utilisé par les bureaux d'études pour gérer les milieux perturbés. Il y a eu une prise de conscience.	
La renaturation est une technique qui favorise l'obtention de résultats pérennes, car elle vise à s'adapter aux spécificités du site considéré.	
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
À défaut d'environnement local témoin pour servir d'objectif à la renaturation, les référentiels s'appuyant sur les bases de données de laboratoire d'analyses pourraient constituer une alternative intéressante à approfondir.	En l'absence d'environnement local témoin pour servir d'objectif à la renaturation, peu de référentiels existent pour orienter les activités de renaturation.
Le décret n°2022-1588 incite les gestionnaires publics et les clients privés à considérer l'usage de renaturation parmi les potentielles priorités, avant les techniques de gestion conventionnelles, notamment celles qui ne permettent pas de conserver la vie présente dans le sol. Cette incitation semble avoir eu une influence sur le contenu des appels à projets récents, ce qui est encourageant pour la suite.	À ce stade, les contextes de ZAN (Zéro Artificialisation Nette) et de compensation conduisent à peu de projets de renaturation.

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Sébastien Kaskassian, Alexiane Godain et Julie Estival - TAUW France - expert en site et sols pollués, ingénieure environnemental, chef de projet - 15 septembre 2023

"Le sol comme capital naturel" est un thème qui fait l'objet de réflexions approfondies, notamment via un groupe de travail interne (« Community of practice »). En particulier, ces réflexions portent sur comment favoriser les sols sains dans les activités de TAUW, notamment en SSP.

Les actions de refunctionalisation peuvent être intégrées aux actions de dépollution de sols et y contribuer. Par exemple, il peut s'agir de techniques de dépollution basées sur des fonctions naturelles du sol, et qui essaient de les valoriser par la même occasion. Par exemple : bioremédiation, phytomanagement, etc.

Actuellement, une fois fixé un objectif de dépollution ou de gestion de la pollution en présence, il y a deux types de stratégies qui peuvent être proposées à un client :

- dépolluer d'une manière conventionnelle puis renaturer, c'est-à-dire qu'on refunctionalise dans un second temps ;
- réfléchir conjointement à une solution de dépollution qui va permettre en même temps de maintenir - voire de renforcer - des fonctions du sol, notamment des fonctions biologiques.

La notion de renaturation renvoie au retour de la nature. Cela diffère de simplement replanter des espaces verts, car cela implique la restauration d'un véritable écosystème, avec des êtres vivants en interaction et qui remplissent certaines fonctions, certains services écosystémiques, qui ne seront pas forcément présents avec un simple espace vert.

Des actions de renaturation sont menées notamment via la phytoremédiation dans les projets SSP, et aussi dans le cadre de la séquence Eviter-Réduire-Compenser dans les études d'impact, cette séquence incitant à des actions en faveur du bon fonctionnement des écosystèmes et du milieu naturel. Par exemple : ajouter des possibilités d'habitats pour des espèces au sein d'un projet de centrale photovoltaïque, ou maîtriser le développement d'espèces invasives dans le cadre de la gestion d'un site pollué (c'est une obligation des aménageurs).

Certaines collectivités ont des démarches de retour de la nature en ville, et plus généralement, sur leur territoire.

L'objectif d'avoir un sol vivant présuppose un certain niveau de fertilité et de qualité agronomique.

Les indicateurs à suivre dépendent du type de fonction que l'on cherche à restaurer, des problématiques du site et des enjeux environnementaux en présence. Les indicateurs potentiels incluent les suivants : prélèvement de sols pour suivi de l'abattement des polluants ciblés, mesures des gaz du sol (dont CO₂ et méthane ; traceurs indirects de la consommation d'oxygène, c'est-à-dire d'activités biologiques), indicateurs biologiques (sur le couvert végétal implanté : biomasse aérienne, profondeur racinaire, stade de développement des plantes, suivi qualitatif (oméga 3...), végétation spontanée), indicateurs agronomiques (texture du sol, capacité d'échanges ioniques, teneur en matière organique), nématodes (via laboratoire ELISOL ; fréquence au début du projet : tous les 3 mois ; puis tous les 4 à 5 mois), suivi des communautés bactériennes et fongiques (en lien avec la dégradation des polluants visés, mais pas que ; ARISA bactérienne et fongique (ADN, représentation sous forme de "code-barres" permettant de caractériser la diversité, mais qui ne permet pas de nommer les communautés présentes) ; difficiles à interpréter).

Pour les indicateurs portant sur les nématodes ou le développement du couvert, les référentiels utilisés ont consisté en :

- des parcelles témoins de sol pollué non revégétalisé ;
- des parcelles de sol non pollué et végétalisé « naturellement ».

Si une des fonctions ciblées est d'obtenir un sol pouvant être un support de culture, notamment pour de l'alimentation pour les animaux, alors des mesures de contamination des végétaux peuvent aussi être réalisées.

Utiliser des plantes pour gérer des SSP conduit au retour d'un certain niveau de biodiversité. Par exemple : espèces végétales sauvages, insectes, pollinisateurs, etc.

La méthode RECORD a pu être utilisée pour sélectionner des indicateurs adaptés aux fonctions écosystémiques à restaurer. Mais l'ensemble des indicateurs obtenu en sortie a parfois été trop étoffé pour pouvoir faire l'objet d'une offre commerciale acceptable par un client ; et ceci, même pour les collectivités, qui ont pourtant souvent plus de moyens disponibles pour des projets de renaturation. La sélection initiale a besoin d'être affinée dans un second temps, ce qui n'est pas toujours simple. Il pourrait être intéressant d'identifier un socle de base d'indicateurs pour les projets de renaturation, une sélection réduite d'indicateurs assez transversaux, par exemple pour une première étape de criblage ; les indicateurs complémentaires seraient spécifiques au site et aux fonctions à restaurer.

La demande de renaturation vient principalement des collectivités. Mais grâce à la Directive CSRD, la demande d'industriels commencent à augmenter ; le moteur est ici une contrainte réglementaire.

A ce stade, les aspects liés aux risques sanitaires prévalent assez largement sur les aspects liés aux sols sains. Cela peut être un empêchement à la mise en place de solutions moins destructrices des écosystèmes en présence, car ces dernières sont jugées prendre plus de temps et fournir des résultats plus incertains, ce qui pose des problèmes de responsabilité. Parfois il y a aussi des problèmes d'image, du type « *vous n'avez pas enlevé la pollution, vous l'avez juste cachée sous de la végétation* ».

Une augmentation de la réglementation visant à favoriser la biodiversité permettrait de favoriser la réalisation de projets de renaturation.

A ce stade, le responsable d'une friche polluée, s'il ne la dépollue pas, c'est qu'elle n'a pas de valeur financière ; il faudrait trouver un moyen de mieux valoriser financièrement les zones dédiées à la nature. Aujourd'hui le prix du m² valorisé de nature est bien inférieur au prix du m² construit, donc l'intérêt financier à renaturer est faible.

Matrice SWOT 3 : Usage de renaturation – entretien avec Sébastien Kaskassian, Alexiane Godain et Julie Estival (TAUW France)

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
Les techniques de phytomanagement, techniques déjà connues des bureaux d'études et souvent peu coûteuses, font partie des outils pouvant être retenus pour un projet de renaturation.	A part pour les superficies importantes, le phytomanagement présente des options de gestion qui sont plus rarement choisies par les clients, car même si le transfert et les expositions sont réduits, la pollution reste toujours en place, avec des incertitudes sur son évolution à moyen-long terme. Et en cas de dépollution progressive, les temps associés sont souvent jugés trop grands (potentiellement plusieurs dizaines d'années).
Les actions de maîtrise du développement des espèces invasives (obligation pour les aménageurs) peuvent être considérées comme s'intégrant dans une logique de renaturation.	
La séquence Eviter-Réduire-Compenser, au sein des études d'impact, incite au développement d'actions de renaturation.	
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
La Directive CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) impose aux industriels et aux grandes entreprises de produire des indicateurs de reporting non financier (et de les améliorer), qui portent notamment sur le développement durable et sur la biodiversité à l'échelle de l'entreprise. Cela peut favoriser des prestations visant à augmenter la biodiversité sur des sites industriels, incluant potentiellement des pollutions diffuses (liens avec le contexte SSP).	En dehors des cas où des espèces précises sont ciblées, l'interprétation des résultats de mesure d'ADN environnemental peut être difficile. En particulier, il n'y a pas de référentiels-cibles. Une interprétation par catégories d'espèces pourrait être une piste intéressante à approfondir.
L'acceptabilité d'un usage de renaturation dans la gestion de SSP pourrait s'appuyer sur des actions de communication, afin de rassurer les riverains quant aux risques sanitaires auxquels ils sont exposés.	L'utilisation d'indicateurs écotoxicologiques (vers de terre, daphnies, etc.) peut ne pas être adaptée à certaines situations. Par exemple, ce type d'indicateurs peut ne pas varier en fonction de la teneur du sol en hydrocarbures. Peut-être qu'il faudrait étudier la possibilité d'utiliser d'autres espèces témoins pour caractériser l'écotoxicité.
	La multiplicité des indicateurs potentiellement pertinents s'avère souvent un frein à la contractualisation auprès de clients privés, au regard des délais et des coûts associés. Il pourrait être intéressant d'identifier un socle de base d'indicateurs pour les projets de renaturation, une sélection réduite d'indicateurs assez transversaux. Les indicateurs complémentaires seraient spécifiques au site et aux fonctions à restaurer.
	Les aspects liés aux risques sanitaires prévalent assez largement sur les aspects liés aux sols sains, notamment pour des raisons de responsabilité.

Le prix d'une surface construite est bien supérieur au prix d'une surface équivalente mais valorisée avec de la nature. Il faudrait trouver un moyen de mieux valoriser les zones dédiées à la nature, afin d'augmenter l'intérêt financier à renaturer.

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Battle Karimi - Novasol Experts - Directrice scientifique - 3 octobre 2023

La définition du terme « renaturation » varie significativement en fonction des acteurs rencontrés, et notamment en fonction de leurs objectifs propres. Par exemple : experts du sol, aménageurs, collectivités, architectes, etc. De plus en plus, cela s'inscrit dans le contexte de refunctionalisation des sols.

En milieu urbain, il s'agit plus de « naturation » que de renaturation, car les sols sont souvent totalement artificiels ; ils n'ont jamais vraiment accueilli de végétation, de « nature ». Pour ces sols, dans la même logique, on pourrait parler de fonctionnalisation plutôt que de refunctionalisation, ils n'ont jamais été fonctionnels.

Le processus doit être distingué de la finalité. La renaturation, c'est une finalité, c'est l'observation finale de la présence de nature - la définition du terme « nature » pouvant aussi faire l'objet de discussions - alors que la fonctionnalisation, le fonctionnement, c'est un processus.

Dans le langage courant, la nature renvoie à ce qui est visible à la surface d'un sol, principalement à la végétation. Il est également essentiel de tenir compte de la qualité du sol, et notamment de sa capacité à accueillir et à maintenir la végétation qu'on prévoit d'introduire, dans une optique de durabilité de la renaturation. Cette attention au sol dans les projets de renaturation est une thématique assez nouvelle.

Renaturer des zones très artificielles peut être un moyen d'augmenter leur valeur foncière, ainsi que de les rendre plus attractives pour les populations. Par exemple, c'est l'objectif de certaines actions en cours dans le quartier de La Défense.

Pour le suivi de la qualité des sols dans le cadre d'une renaturation (SSP ou hors SSP), les indicateurs d'intérêt incluent les indicateurs agronomiques classiques (ex : texture du sol, pH, carbone, azote, phosphore) ; les indicateurs microbiologiques (la microbiologie est un des facteurs influençant significativement la fertilité biologique d'un sol), avec des indicateurs d'abondance (ex : biomasse microbienne) et de diversité (c'est cette diversité qui est garante de durabilité, en général, en augmentant le niveau de résilience face à de potentielles perturbations, notamment grâce à des redondances fonctionnelles).

Sont aussi regardés des indicateurs sur le carbone du sol, la matière organique (teneur et qualité), qui a son importance pour le sol en lui-même, ainsi que pour ce qui va être restitué aux végétaux à moyen-long terme. Au début d'un processus de reconstruction, un apport de compost est intéressant, plus intéressant que du biochar par exemple, qui lui pourra être intéressant dans un second temps, plus sur des aspects de structuration du sol (conduisant notamment à une réserve utile de végétation) que sur des aspects de fertilité biologique et chimique. Des apports en certains types de BRF peuvent aussi s'avérer défavorables en termes de microbiologie.

L'objectif n'est pas forcément de conserver dans le temps les mêmes espèces que celles introduites initialement ; l'objectif est plutôt que la végétation, quelle qu'elle soit, puisse continuer à s'installer sur le sol considéré, qu'une dynamique ait été amorcée. Les espèces introduites visent à obtenir un sol avec une bonne capacité à accueillir de la végétation de manière pérenne.

Dans certains cas de SSP, notamment certains sols pollués aux éléments traces métalliques, on trouve une qualité microbiologique satisfaisante, malgré la pollution en présence. C'est une information intéressante à prendre en compte dans le choix de dépolluer ou non, en fonction de l'usage souhaité pour le site. Cela peut être des sols aptes à accueillir de la végétation, en matière de fertilité microbiologique et de matière organique en présence.

Certains clients souhaitent aller au-delà d'une dépollution conventionnelle, au-delà des obligations réglementaires, en restaurant un certain niveau de biodiversité du sol.

Les parcs et les golfs font partie des potentiels objectifs d'usages du type "sans construction mais pouvant accueillir du public ».

Tous les projets pilotés ont inclus une dépollution préalable, au regard des enjeux de responsabilité liés aux aspects sanitaires. C'est seulement depuis 2 ans environ que les réflexions incluent la possibilité de ne pas dépolluer. A ce stade, cette option n'a pas été retenue dans les projets pilotés.

Pour l'interprétation des indicateurs microbiologiques, l'Inrae de Dijon a élaboré des référentiels par type de sol (texture, pH, etc.), notamment à partir des données du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS).

Matrice SWOT 4 : Usage de renaturation – entretien avec Battle Karimi (Novasol Experts)

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
Renaturer des zones très artificielles peut être un moyen d'augmenter leur valeur foncière et de les rendre plus attractives pour les populations.	Il n'existe pas d'obligation réglementaire à renaturer.
Dans certains cas de SSP, on trouve une qualité microbiologique du sol satisfaisante, malgré la pollution en présence.	
Même s'il n'y a pas d'obligation réglementaire de renaturation, ce sujet intéresse de nombreux acteurs, y compris des grandes entreprises.	
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
Les projets de renaturation pourraient contribuer au développement des trames vertes et brunes, et ainsi s'inscrire dans les dynamiques associées.	Dans le cas de sols pollués présentant des risques sanitaires significatifs et une qualité suffisante pour accueillir de la biodiversité, les enjeux liés aux risques sanitaires conduisent à dépolluer (avec des techniques conventionnelles). L'influence du décret n°2022-1588 pourrait faire évoluer cette situation sur certains sites. Le sol pourrait y être laissé en place, notamment au regard des coûts de dépollution et de valorisation attendue par la suite.
Les acteurs qui s'impliquent dans le développement de la biodiversité aérienne (faune aérienne, végétation...) réalisent souvent à cette occasion toute l'importance de la biodiversité des sols.	En règle générale, la valorisation par un usage de construction (ex : habitat, locaux professionnels) est supérieure à la valorisation par un usage de renaturation. Les aspects financiers sont prépondérants pour les propriétaires fonciers et les promoteurs, à moins que la renaturation ne soit un objectif en tant que tel.
Les outils permettant de caractériser la qualité (micro)biologique des sols sont aujourd'hui davantage disponibles, robustes et opérationnels.	Les outils permettant de caractériser la qualité (micro)biologique des sols restent peu connus des acteurs des domaines des SSP et de l'aménagement urbain.
S'inscrire dans la séquence Eviter-Réduire-Compenser peut augmenter l'aspect attractif d'un projet de renaturation.	

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Cécile LARIVIERE - Écosphère -Responsable pôle ingénierie écologique axé biodiversité - 09 octobre 2023

Mission d'Ecosphère (BE) : étude des milieux naturels, faune, flore, zones humides, habitats naturels - via des projets de conservation de la nature préservée ou vocation à l'être, type Natura 2000, en lien avec impacts du projet sur la biodiversité ; pré-diagnostic pour déterminer les potentiels enjeux écologiques ; inventaires faune/flore ; définition des impacts des projets ; proposition mesures dans le cadre de la séquence ERC (Eviter Réduire Compenser) en phase chantier pour impacter moins les sols ou a posteriori pour le suivi de la restauration en compensation des impacts du projet (suivi de chantier). Répondre aux questions : Comment redonner une fonctionnalité aux sols ? Quels types de milieux faut-il recréer pour qu'ils soient en cohérence avec les milieux et les espèces à enjeux présentes avant le projet. Si projet sur sol pollué, intervention avec BE spécialisé SSP.

Ne connaît pas le décret sur les usages et l'usage de renaturation ni directive santé des sols.

Connaissance du ZAN (via sa participation au GT Sols dans le cadre de l'UPGE).

Définition renaturation : nature ; dépollution éventuelle/ perte de fonctionnalité (cas de sol recouvert de bitume, déchet...) suppose d'enlever ce qui a impacté les sols ; donner un support d'écosystème qui fonctionne le plus naturellement possible pour atteindre in fine une prairie, forêt ou zone humide en fonction des conditions stationnelles alentours. Renaturation diffère de restauration. Renaturation sous-entend une restauration mais pas obligatoirement une dépollution.

REX :

- 1) 25 ans-cas des carrières/sols détruits et refaits : exploitation du sol et mise de côté de ce qui reste. Remplir le trou avec des matériaux inertes (issus de chantiers) puis reconstitution d'un sol avec substrat récupéré avant exploitation (terres de découvertes : couche humifère + sous-couche + triage des substrats par le carrier pour séparer ceux en fonction de leur pH) pour recréer des milieux naturels selon cahier des charges (nature et épaisseur vont différer en fonction du milieu qui doit être reconstitué) puis proposition de mélanges de végétaux (semis) avec des espèces indigènes (présentes dans les milieux voisins) et gestion des milieux créés (suivi pour assurer le succès de la plantation, structuration du sol par les racines, paillage au pied des arbres pour limiter la concurrence/le dessèchement et/ou amendement).
- 2) Terres polluées suite épandage à des boues de STEP (île de France): collectivité a acquis des terrains et a lancé un AO pour renaturer les sols et faire quelque chose de ces terrains (agriculture et reconquête écologique = sols propres avec une nature accessible au public). Usage de parc, forêt...souhaité par les collectivités. En milieu urbain ou péri-urbain, l'espace restant pour ces usages sont souvent des friches industrielles souvent polluées. Les collectivités n'ont pas les moyens de dépolluer car beaucoup trop cher. Stratégie de la collectivité dans ce REX : sous les sols il existe des sables et graviers, matériaux d'intérêt pour un carrier d'où l'idée d'un montage financier qui permettrait la dépollution tout en réalisant la reconquête écologique (le carrier paye la dépollution et en contrepartie prend ces matériaux).
- 3) Zone humide recréée en arrière de plans d'eau laissés par des exploitations alluvionnaires (cas de la compensation) : roselière et prairie humide (gradient), enherbement avec espèces locales anciennes et naturelles (épandage de foin, récolte de graines) ; beaucoup de placettes de 50cm² (obj : inventaire/présence d'espèces) et 20m² (obj : indicateur de recouvrement (abondance-dominance/milieu floristique)) suivies annuellement les 4-5 premières années. En complément, inventaire des grands groupes d'organismes vivants hors sol (insectes, oiseaux, amphibiens, reptiles, mammifères) et relevés pédologiques. La récurrence dans le temps de ces mesures permet de mesurer l'évolution des milieux et de prouver l'efficacité de la compensation (sols caractéristiques de zones humides – cf arrêté de zone humide/existence d'un référentiel officiel).

Mesure du succès de la renaturation :

-Atteinte d'objectif écologique : pas de référentiel officiel, milieux naturels en bon état de conservation (description phytosociologique, connaissances d'écologues = dires d'experts). Réglementation sur les espèces protégées et leurs habitats (cf interdiction de destruction...): si destruction, mesures compensatoires. Indicateurs normés avec indices (MNHN).

-utilisation d'indicateurs biologiques (au-dessus du sol pour en déduire si ça a bien fonctionné en dessous) et agro-physico-pédologiques :

1^{er} indicateur : végétation (visible à l'œil nu) différent du sol (décret, future directive)

Indicateurs systématiques et réguliers pour le suivi de l'évolution des milieux dans le temps :-inventaire faune/flore pour vérifier l'installation des espèces visées par la renaturation (flore [présence d'espèce remarquable, indicatrice de tel ou tel type de milieu ; diversité végétale (indices) ; description phytosociologique], insectes (orthoptères, libellules, papillons jour-nuit), oiseaux, amphibiens, reptiles, mammifères.

- relevé pédologique : description du profil de sol (fosse et/ou carottage pour évaluer texture, structure, couleur, quantité de microfissures liées à la présence de racines et de galeries), pH, test à l'acide (présence de calcaire), test du boudin (présence d'argile)

Indicateurs optionnels :

-tests agronomiques (sous-traitance) comme fertilité ou compaction.

Levier : Application du ZAN. Besoin de réglementation (ex : Compensation boisement liée à la production sylvicole). Prise en compte de la perte des services écosystémiques (besoin de réglementation). Ne pas faire de généralité sur la qualité des sols (fertilité n'est pas le seul critère : forêt riche ; sol pauvre avec grande richesse écologique) ; sol riche et fertile n'est pas un objectif à atteindre. Prise en compte de l'écologie dans les expertises nécessaires à la réalisation de la renaturation. Un sol peut être bon même s'il est pauvre car dépend de l'objectif qu'on leur donne.

Freins : imperméabilisation, bétonnage = pas de compensation. Même dans un sol agricole cultivé en intensif il y a plus de vie que sur un sol bétonné. Prise en compte/attention/compensation uniquement quand il y a un enjeu réglementaire (ex : espèce protégée). La nature ordinaire n'est pas compensée.

Matrice SWOT 5 : Usage de renaturation – entretien avec Cécile Larivière (Écosphère)

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
Utilisation d'indicateurs hors sol descriptifs de la fonctionnalité du sol (au-dessus du sol pour en déduire si ça a bien fonctionné en dessous) utilisés par les écologues hors sol.	Prise en compte des espèces protégées soumises à un cadre réglementaire et non des espèces ordinaires non réglementées.
Un sol pollué non recouvert est un sol vivant. Pas nécessité de le dépolluer car la nature existe déjà dans le sol. Le sol pollué peut être restauré (=améliorer).	La santé d'un sol (« bon sol ») se réduit souvent à sa fertilité. Besoin d'indicateurs écologiques dont la connaissance et l'interprétation nécessite des experts en écologie (écologie du sol versus écologie hors sol), peu nombreux en fonction des domaines (ex : insectes).
	Le système de compensation n'est réglementé que dans quelques cas (les zones humides, boisements).
	Reconstituer un sol est une opération complexe qui nécessite des expertises diverses (Ecologie, pédologie, SSP, paysagiste, ...).
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
	Besoin de réglementation et d'application de la réglementation pour encourager la renaturation, c'est-à-dire la prise en compte de la nature ordinaire et pas seulement protégée (ex : prise en compte de la perte des services écosystémiques).
	Prise en compte de l'écologie dans les expertises nécessaires à la réalisation de la renaturation.
	La qualité d'un sol ne se définit pas que par sa fertilité. Nécessité de prendre en compte l'usage que l'on veut donner au sol.
	Utilisation d'indicateurs normés avec indices issus principalement du MNHN. Porter à connaissance et acculturer les autres acteurs que les écologues à l'existence de ces normes et d'expertise pour l'interprétation.
	Définir renaturation en tenant compte de toutes les dimensions de la nature et en le différenciant de termes utilisés à tort comme synonymes tel que restauration.

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Olivier de Montety et Sophie Grenier - Treeseve - Co-fondateurs – 15 septembre 2023

La méthode Miyawaki est une technique de reforestation qui consiste notamment à planter à très forte densité (en général, 3 pieds par m²) des espèces ligneuses locales très variées.

Les collectivités les plus intéressées par des projets de reforestation se trouvent très majoritairement au nord de la France.

La méthode Miyawaki permet de planter sur des sols abimés. Ex : par l'érosion, suite à un historique urbain ou industriel, par une artificialisation (ex : béton), par des pollutions, etc.

L'objectif est de reconstruire, sur un sol abîmé, un écosystème proche d'un écosystème naturel.

La forêt créée par-dessus le sol pollué permet de l'empêcher de se répandre, notamment par réenvol de poussières, et possiblement par diminution des phénomènes de lixiviation (grâce au développement du réseau racinaire).

Un projet a pu être mis en œuvre après une étape de désimperméabilisation, en enlevant une ancienne dalle de béton et la couche de gravats superficielle. L'objectif de la collectivité était de faire une zone de verdure en centre-ville (« poumon vert »), avec des allées de promenade.

La densité de la forêt de type Miyawaki fait qu'on ne peut pas rentrer dans la forêt (et donc potentiellement s'exposer aux zones polluées), que les personnes restent sur les chemins prévus. Toujours dans cette logique, aucun arbre fruitier n'a été retenu dans la sélection initiale des espèces à introduire.

Les indicateurs suivis incluent un suivi annuel, sur la base de parcelles de suivi représentatives (ensoleillement, humidité...), qui consistait en une mesure à la fin de la période de croissance (septembre), pour chaque arbre, de sa hauteur et de son diamètre à 10 cm (pour avoir une mesure de croissance dès le début de la plantation) et en une mesure du taux de survie.

Les indicateurs projetés incluaient les microorganismes bactériens et fongiques, les vers de terre, les collemboles. Il s'agit d'un compromis entre des besoins d'interprétation, de coûts maîtrisés et de simplicité.

Le suivi visait à caractériser l'évolution temporelle des caractéristiques des plantations, et de comparer avec une zone témoin non boisée située à proximité, dans le même espace pédoclimatique.

Pour les projets suivis, les enjeux des collectivités étaient avant tout environnementaux, et assez peu sanitaires. Les objectifs incluent l'augmentation de la présence de nature en ville, le rafraîchissement, le bien être des habitants, le développement de la biodiversité. En résumé, il s'agit de recréer une vraie zone de nature, pas juste un espace vert avec de la pelouse et quelques arbres. Mais il est aussi probable que les risques sanitaires aient été jugés assez faibles, puisque les sols considérés étaient a priori faiblement pollués.

De manière plus anecdotique, un projet de forêt a aussi visé à constituer une barrière anti-bruit.

La densité des forêts Miyawaki favorise aussi l'atteinte d'engagements électoraux en termes de nombre d'arbres plantés.

Matrice SWOT 6 : Usage de renaturation – entretien avec Olivier de Montety et Sophie Grenier (Treeseve)

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
La densité de la forêt de type Miyawaki fait que des personnes ne peuvent pas y rentrer (et donc potentiellement s'exposer aux zones polluées) : les personnes restent sur les chemins prévus et construits sur des matériaux non pollués.	En cas de période d'inflation, comme celle qui a suivi le début de la guerre en Ukraine, les projets de renaturation ne font pas des projets à maintenir en priorité.
Certaines collectivités ont des objectifs avant tout environnementaux, pointant vers la création d'une « vraie » zone de nature, et pas juste un espace vert avec de la pelouse et quelques arbres, lorsque la pollution du sol est jugée assez faible.	Il n'existe pas d'obligation réglementaire de renaturer.
Les entreprises peuvent financer certains projets locaux de renaturation, pour des raisons de communication interne et externe.	Au niveau des entreprises, il n'y a pas d'incitation comptable ou fiscale en faveur de projets de renaturation.
L'implantation d'une forêt permet aussi de favoriser le développement de la microfaune et de la macrofaune. Par exemple : oiseaux, mammifères, reptiles.	
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
Il est techniquement faisable de mesurer les effets bénéfiques sur le bien-être des habitants, et cela serait très utiles pour favoriser les projets de renaturation.	La « forêt naturelle » n'existe plus vraiment en France, les forêts se rapprochent de zones cultivées. Ce n'est donc pas simple d'établir un référentiel.
	En France, les mécanismes de compensation carbone sont assez inadaptés aux besoins des entreprises, et en plus, ils sont orientés vers les forêts de production de bois, et non sur les forêts s'inscrivant dans une démarche de renaturation.

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Quentin Vincent - Sol &co (structure en cours d'évolution) - Directeur Scientifique, co-fondateur - 19 septembre 2023

Les diagnostics sont réalisés dans un contexte d'aménagement. Ils incluent des indicateurs agronomiques et des indicateurs biologiques. L'objectif est notamment d'avoir un éclairage sur les options ayant le moins d'impact sur les fonctions des sols.

La renaturation, c'est partir d'un sol avec des fonctions dégradés, et c'est mettre en place un processus de génie écologique visant à retrouver ces fonctions. Renaturer est différent de revégétaliser, dans le sens où il y a un objectif écologique. Renaturer implique de considérer le milieu écologique qu'on vise à retrouver, l'écosystème qu'on se propose de reconstruire (habitats, ressources, fonctions, etc.).

Les quatre principales fonctions des sols sont le support à la biodiversité, la fertilité (production de biomasse végétale ; notion variable au regard du milieu considéré), le stockage de carbone et le potentiel hydrique (les aspects liés à l'eau, tels que l'infiltration et la rétention). D'autres fonctions peuvent être considérées ; par exemple : la rétention de polluants.

Les indicateurs utilisés incluent des indicateurs de biodiversité (inventaires (diversité, abondance, structure des communautés (équilibre des populations), diversités des communautés du point de vue fonctionnel (ex : organismes décomposeurs, espèces-ingénieures du sol, biophages... capacité à se disperser dans la trame brune) des grands groupes de la macrofaune. Ex : insectes, millepattes, araignées, etc. jusqu'à l'ordre ou la famille, en cohérence avec ce qui est disponible dans la littérature scientifique – les lombriciens (abondance, diversité jusqu'à l'espèce, catégories écomorphologiques (épigés, endogés, anéciques) aussi dans une optique fonctionnelle – la mésofaune, avec les collemboles (abondance, diversité, équilibre des populations, groupes fonctionnels) – indicateurs microbiens (biomasse microbienne, respiration microbienne, séquençage), même si ce sont plus des indicateurs biologiques que des indicateurs de biodiversité), des indicateurs agro-pédologiques, etc. qui peuvent être mis en regard de référentiels génériques, et conduire à des aides à la décision, en complément de dires d'experts, par exemple des écologues connaissant bien la zone considérée.

Ces indicateurs sont déployés de manière proportionnée, notamment au regard des objectifs du projet et des moyens disponibles. Le format minimum inclut la macrofaune et les lombriciens. Une dimension de renaturation dans un projet conduit à proposer une sélection d'indicateurs plus fournie.

Il existe quelques référentiels génériques, par exemple pour les fonctions d'infiltration d'eau ou de stockage du carbone. Pour la fertilité, des référentiels peuvent être caractéristiques d'un contexte de grandes cultures : ils doivent être adaptés si on se trouve dans d'autres contextes. Pour la partie biodiversité, des guides ont été créés en interne pour la macrofaune et la mésofaune, ainsi que pour le microbien.

Dans des contextes plus spécifiques, comme dans un projet de renaturation, l'idéal est d'avoir un milieu de référence, une déclinaison locale du milieu générique qu'on se propose d'atteindre. Les états des fonctions associées seront spécifiques à ce milieu de référence. Par exemple, si on veut recréer une garrigue dans la zone de Marseille, les niveaux de biodiversité, d'infiltration et de rétention seront spécifiques ; c'est ce qui en fait un milieu singulier.

Dans le cas où on n'a pas un milieu écologique cible, par exemple par manque d'information sur ce qui est adapté au contexte dans lequel on se trouve, une démarche générale pour renaturer peut consister à rétablir le meilleur niveau possible pour le plus grand nombre de fonctions possibles, et en particulier pour les fonctions principales du sol ; cela correspond à retrouver un sol aussi multifonctionnel que possible.

Des clients (collectivités et entreprises) prennent contact avec une volonté de « renaturer », sur des SSP ou sur des sites non pollués, avec un souhait de retrouver de la nature, plus qu'un simple beau paysage. La notion d'écosystème est quand même peu présente de manière explicite dans les demandes.

Ces clients sont généralement conscients du côté expérimental de la démarche, qu'il est souvent difficile de garantir un résultat en amont du projet.

Pour répondre à ces demandes, les notions de fonctions sont d'abord mises en avant, et dans un second temps, on peut parler de milieu écologique à viser, dans le cadre des préconisations concluant la phase de diagnostic écologique. A partir des caractéristiques agro-pédologiques et biologiques du sol considéré, ainsi que de son contexte pédoclimatique, on peut identifier un ou des milieu(x) écologique(s) qui pourraient constituer une cible adaptée pour la renaturation. Et en fonction du milieu retenu, notamment sur de potentiels critères autres qu'écologiques (ex : socio-économiques, politiques), on peut aller chercher une zone locale pour préciser le détail de ses caractéristiques. Donc il y a deux temps : on identifie un objectif de milieu type, avec des référentiels génériques caractérisant les principaux milieux types, puis on va faire des mesures en local pour obtenir une caractérisation détaillée du milieu cible retenu comme référence pour le projet.

Quand on parle de milieu, on se positionne à l'échelle du paysage ; quand on parle d'habitat, on se positionne au niveau de la faune du sol. Ex : litière, roches, racines, rhizosphère, etc. (on parle aussi de « micro-habitats » quand on se positionne à une échelle de quelques centimètres). Il s'agit ici de notions assez proches, correspondant à des échelles différentes. D'ailleurs, pour caractériser un milieu, la typologie EUNIS peut être utilisée, et cette typologie porte explicitement sur les « *habitats terrestres et marins*. »

Un travail interne a été mené pour associer un type de sol à une vingtaine de milieux types issus de la typologie EUNIS. Ce travail est en cours d'affinage et de consolidation, par des entretiens avec des écologues et par des campagnes de mesures de terrain.

Les sollicitations des clients s'inscrivent souvent dans un contexte ZAN, peu voire pas du tout dans un contexte de compensation.

S'il y a des aspects sanitaires à traiter, un autre bureau d'études, spécialisé SSP, intervient pour l'évaluation des risques. Hors SSP, les projets de renaturation s'accompagnent, notamment à la demande des clients, d'opérations de sensibilisation du grand public, et d'ateliers pédagogiques dédiés à l'information sur les milieux recréés, notamment lorsque la richesse associée n'est pas très visible.

Un engouement pour les projets de désimperméabilisation peut être observé actuellement.

La présence d'un écologue est importante pour augmenter la qualité des projets, notamment pour que l'objectif de renaturation ne se réduise pas à de la revégétalisation.

Les systèmes créés sont basés sur des organismes vivants, complexes, et donc ils nécessitent des opérations de suivi.

En règle générale, la réappropriation du site par les personnes habitant aux alentours est un critère important dans les projets de renaturation. Ceci présuppose la possibilité pour le public d'un accès au site, qui peut s'articuler avec l'interdiction de l'accès à certaines zones restreintes du site.

Matrice SWOT 7 : Usage de renaturation – entretien avec Quentin Vincent (Sol &co (structure en cours d'évolution))

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
Il existe quelques référentiels génériques, par exemple pour les fonctions d'infiltration d'eau ou de stockage du carbone.	Les termes « biologique » et « diversité » n'apparaissent pas dans la définition du décret n°2022-1588.
Un travail a été mené pour associer un type de sol à une vingtaine de milieux types issus de la typologie EUNIS.	La définition du décret inclut la restauration d'habitat. Mais uniquement restaurer des habitats ne suffit pas : il faut faire en sorte que des espèces s'y réinstallent, et suivre ce processus.
Des clients (collectivités et entreprises) prennent contact avec une volonté de renaturer - notamment sur des SSP - avec un souhait de retrouver de la « vraie » nature, plus qu'un simple beau paysage. Ces clients sont généralement conscients du côté expérimental de la démarche, qu'il est souvent difficile de garantir un résultat en amont des projets.	Il n'y a pas de réglementation obligeant à renaturer.
Les projets de renaturation peuvent s'accompagner d'opérations de sensibilisation du grand public, portant sur les milieux recréés.	Il n'y a pas d'espèce protégée dans la faune du sol.
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
Les fonctions considérées pour les sols pourraient inclure la fonction « rétention de polluants ».	Les différents acteurs des sols ont besoin d'être informés sur la différence entre une renaturation et une simple re-végétalisation.
La notion de renaturation présuppose une intention écologique : une démarche de renaturation gagnerait donc à intégrer des écologues.	Pour les indicateurs microbiens, le séquençage est associé à des délais assez élevés, au regard des contraintes classiques liées aux projets d'aménagement.
Proposer un objectif en termes de milieu écologique, plutôt qu'en termes d'espèces à planter, peut générer un plus grand attrait pour les aménageurs.	Il n'y a pas de méthode de référence pour caractériser la biodiversité d'un sol, un cadre du même type que la méthode SSP. Ce manque de cadrage méthodologique conduit notamment à l'élaboration de cahiers de charge inadaptés du point de vue opérationnel, de la part de clients.
En milieu urbain, il est important que le public puisse avoir accès au site renaturé, ce qui favoriserait la promotion de l'usage de renaturation.	Les sollicitations des clients s'inscrivent peu dans un contexte de compensation.
Augmenter les activités de suivi permettrait de pouvoir capitaliser des retours d'expériences, ce qui est essentiel pour comprendre les systèmes complexes recréés.	

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Violaine Lamoureux-Var (ingénieur recherche, caractérisation MO des sols avec la méthode Rock-Eval®), Maira Alves Fortunato (chimiste analytique, chef de projet étude des sols), David Sebag (anthropisation des milieux naturels), Isabelle Kowalewski (géochimiste, modélisatrice de bassins) - IFPEN - 18 septembre 2023

Missions IFPEN : Développe la méthode Rock-Eval® (recherche, prestation) déjà utilisée dans des projets opérationnels (site dépendant) pour rendre compte de la qualité de la MO et de certaines pollutions aux hydrocarbures et plastiques. Développement de nouveaux indicateurs pertinents et adaptation des méthodes analytiques pour les domaines des sols et les différentes situations de sol. Tester des indicateurs dans le monde réel pour les mettre à disposition des utilisateurs finaux.

Définition renaturation : l'approche des écologues se base sur la mesure d'indicateurs fauniques de diversité et de composition des populations. L'anthropisation entraîne une dégradation des fonctions écologiques des sols. La question qui se pose est la suivante : la reconstitution d'une biocénose naturelle s'accompagne-t-elle d'une restauration des fonctions écologiques des sols, et en particulier les fonctions associées à la dynamique de la MO ?

IFPEN utilise renaturation/réhabilitation/restauration sans différencier les termes.

Thèse en cours ceinture verte île de France.

Sol agricole : recarbonation = gain de fonction.

Friche industrielle : Lieu de pollution. Restauration des services = suivre la dépollution/décontamination

REX :

- 1) Sols de carrière et de grands chantiers (demande client Valhoriz/) : suite à la pratique de départ, est-ce qu'on suit bien le processus naturel d'évolution des sols dans le contexte pédo-bioclimatique ? Suivi de l'évolution d'échantillons de référence (initiaux) et à 6 mois. Naturels (relation entre certains indicateurs caractéristiques des milieux naturels) vs perturbés par les activités anthropiques ; avec le temps on revient vers des sols de plus en plus proches de l'initial (cible) grâce au suivi des signatures en termes de profils.
- 2) Sols agricoles : comparaison de plusieurs modalités (labour, apport de compost et de fumier), suivi de l'évolution entre culture conventionnelle (sols très dégradés et dé-fonctionnalisés) vs sans labour et apport d'amendement. Cible : évolution des sols non labourés/amendés vers des sols de surface avec des signatures spécifiques aux sols de surface ; comparaison des profils à la base de références IFPEN (profil de la litière au sous-sol) corrélées avec les fonctions (en surface plus de fonction qu'en profondeur).
- 3) Sols construits (projet coordonné par BRGM) : est-ce que la tendance va vers un sol naturel ? Comparaison d'un sol témoin et de technosols issus de remblais de plus de 30 ans avec des « référentiels » obtenus sur de nombreux sols de contextes pédo-climatiques variés (de la litière au sous-sol en profondeur). On observe une diminution du C organique et des liaisons C-H en fonction de la profondeur ce qui traduit l'évolution naturelle de la décomposition et de la minéralisation de la MO. Les résultats sont interprétés par rapport à la qualité et à la quantité de C organique dans ces sols. Cette information qui peut être utilisée dans le bilan coût-avantage d'un plan de gestion pour un sol pollué tenant compte de l'enjeu santé des sols.
- 4) Remplacement de cultures annuelles par des cultures pérennes (foresterie/demande): les indicateurs Rock-Eval® permettent de savoir au bout de 4-5 ans si le processus qualitatif attendu par ce remplacement est enclenché (amorce d'une modification dynamique de la MO en milieu forestier) et de gagner du temps par rapport aux techniques classique de mesurage des arbres pour vérifier le succès du remplacement (gain de temps de 20-25 ans ; pas besoin d'attendre que la plantation se soit développée).

Mesure du succès de la renaturation :

-Indicateurs Rock-Eval®, déjà utilisés dans des projets opérationnels, qui renseignent sur la qualité de la MO et sur certaines pollutions aux hydrocarbures et plastiques.

- Cible fixée par le client : mesurer la quantité de C dans un sol et interpréter la valeur en fonction de la cible correspondant à l'usage défini pour le sol. Méthode rapide, fiable, sensible en partie automatisée, utilisable dans diverses situations (différents sols, évolution court-long terme) et normalisée (ISO 23400 :2021 recommandations pour l'estimation du stock de C organique à l'échelle de parcelles – mention de la méthode Rock-Eval® pour quantifier la teneur en C organique et en déduire les stocks de C organique ; commence à être mise en pratique ; nouvelle proposition de norme pour quantifier la teneur en C organique en fonction de sa stabilité biogéochimique et de son temps de résidence portée par la France à l'ISO). En France, proposer par laboratoires académiques essentiellement (pas d'analyse en routine, création de laboratoire commun en cours, prestations proposées par Vinci Technologies, IFPEN, universités Sorbonne, Rouen et Orléans, Lausanne]. Projet de guide associée à la nouvelle norme pour choisir la méthode en fonction des objectifs. Elle ne prévoit pas d'inclure des référentiels (base de données). Méthode intéressante pour des sols à faible teneur en C (ex : sols pollués, sableux) car marge d'erreur/incertitudes faibles en comparaison des méthodes classiques (thermiques, chimiques) qui se réalisent avec nombreuses étapes de décarbonatation/fractionnement ce qui augmente l'incertitude analytique.
- Usage détourné : Quantification de la MO pour distinguer les formes organique et minérale de la MO dans les sols ; méthode appliquée dans des cas concrets dans des projets avec PME (refonctionnalisation des sols) et groupes industriels (agri-photovoltaïsme, friches industrielles).

-Caractérisation de la MO (outils différents en fonction des objectifs) : indices compositionnels, indices dérivés pour caractériser la dynamique (stabilité/réactivité de la MO pour stockage du C dans les sols).

-En complément, indicateurs microbiens qui renseignent sur le cycle carbone (recherche) : biomasse microbienne, respiration basale, diversité et composition microbienne (bactéries et champignons).

Leviers : Prendre en compte les services écosystémiques et les fonctions du sol : fonction de production (fertilité du sol), régulation du climat (stockage du C dans le sol), épuration/filtration/rétention de l'eau du sol (ex : des polluants), fonction patrimoniale (paysage, biodiversité), fonction récréative (recréer un écosystème accueillant du public).

Freins : Attention à ne pas opposer les différentes fonctions du sol, c'est-à-dire : est-ce que tous les sols ont vocation à stocker du carbone ? Associer une fonction optimale avec une typologie de sol.

Opportunités : fonction alimentation (Santé humaine) et One health (écologie/écotox – ex : parcs nationaux font appel aux Indicateurs Rock-Eval® pour connaître la santé de leurs sols ; impact de l'utilisation des intrants en agriculture, impact des microplastiques sur les sols). Etudes plutôt microbio. Tout début (recherche, pas de cas concret).

Matrice SWOT 8 : Usage de renaturation – entretien avec Violaine Lamoureux-Var, Maira Alves Fortunato, David Sebag, Isabelle Kowalewski (IFPEN)

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
Méthode Rock-Eval® rapide, fiable, sensible normalisée (ISO 23400 :2021), en partie automatisée.	Coût (quelques laboratoires prestataires).
Possibilité de suivre l'évolution de la MO dans un sol sur le court (quelques mois) et long terme (quelques années).	Non disponible en routine
Plasticité dans son usage (différents sols).	Référentiels internes à l'IFPEN
Existence de référentiels	
Demande client existante	
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
Laboratoire commun avec matériel pour faire analyse en routine.	Connaissance de la MO et du carbone : toutes les sources de carbone ne sont pas équivalentes. Ne pas se contenter d'un enjeu quantitatif (ex : remplacer du C labile par un biochar ok d'un point de vue quantitatif mais la dynamique de décomposition sera très différente). Bien identifier les enjeux et objectifs de renaturation.
Impact des polluants sur la décomposition et la minéralisation de la MO (contextes One health et santé humaine).	Prendre en compte les services écosystémiques et les fonctions du sol
Normalisation et guide associé.	

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Gaylor Machinet (Directeur adjoint) et Alexandre Perlein (Ingénieur phytomanagement) - MICROHUMUS - 15 septembre 2023

Missions Microhumus (BE issu d'un transfert de technologie de l'université de Lorraine) : historiquement, expertise fine des MO (composts, supports de culture, litières forestières, etc.) et de la prévision de leur comportement dans les sols à l'aide de l'outil microscopie électronique à transmission. Etude pour des clients (producteurs d'amendements organiques) en pilote pour évaluer par des suivis les effets des amendements sur la qualité du sol en termes de structure et de biofonctionnement. Hébergé par le laboratoire Sols et Environnement (LSE, université de Lorraine), Microhumus s'est dirigé vers l'étude des milieux dégradés et pollués et a mis à profit ses connaissances sur la MO et le végétal pour se positionner sur deux domaines d'expertise, l'ingénierie pédologique (formuler des terres végétales normalisables en support de culture via la valorisation de matériaux invendus de carrière et de terres inertes après refunctionalisation pour en faire des terres végétales dites de substitution – réseau national SubsTer) et la gestion des SSP par phytomanagement. Renaturation par le procédé AgroPhyto®.

Définition renaturation : refunctionalisation des sols suite dégradation des sols par la pollution qui a entraîné une perte de fonction de ces sols. Retrouver des fonctions nécessite de fertiliser (fertilité physique, chimique et biologique). Diagnostic initial de la qualité du sol de point de vue environnemental et agronomique pour trouver les verrous techniques (apport d'amendement, travail du sol) à mettre en face d'un usage/objectif pour le sol. Renaturation = refunctionalisation = réhabilitation d'un sol pour qu'il rende des bienfaits pour l'homme via les services (approvisionnement, culturels, etc). renaturation = végétalisation avec diversité végétale (strates, diversité végétale au sein d'une strate, milieu équilibré) = remettre de la vie dans les sols et du végétal = pour que le végétal se maintienne c'est remettre de la fertilité du point de vue végétal et microbien. Ne veut pas dire revenir à un état initial avant sa dégradation, c'est utopique. C'est améliorer son état. Peut servir à diversifier son usage.

Santé d'un sol ?

Qu'est-ce qu'un sol ? Si pas d'usage : 3 compartiments composés de « vivant » : sol, végétation (structuration du sol, apport de microorganismes et nourriture pour les microorganismes). Sol = sol vivant. Remettre de la vie dans le sol. En bonne santé et résilient (s'auto-entretient).

Connaît le décret sur les usages avec l'usage de renaturation.

REX :

- 1) Contexte urbain dégradé pollué (hydrocarbures HCT c10-c40) : pollution d'une lagune suite activité usine papetière et rhizodégradation sur 7 ans pour maintenir des matériaux sur sites. Economie financière par évitement d'excavation des terres. Obj : gérer les sédiments in situ en abattant la pollution, végétaliser le site de manière maîtrisée. Qualité du sol, eau, biomasse (disponibilité des polluants, paramètres agronomiques). Vérifier qu'il n'y a pas de forte contrainte physicochimique pour la renaturation (ex : pH > 10, trop de calcaire, salinité, problème de conductivité, carence en oligoélément, couverture végétale inexistante). Observation de la colonisation par les vers de terre lors des prélèvements (tests moutarde et bêche non faits car pour le client l'objectif principal était l'abattement de la pollution qui a atteint 85% donc n'a pas vu la nécessité de payer pour avoir ce type d'analyses). Suivi des oiseaux et de la cistude (espèce protégée) par des naturalistes. Création d'une saulaie par un paysagiste. Pas d'impact sur les milieux extérieurs. A proximité Natura 2000 (tortues peuvent venir nager dans la lagune car les conditions environnementales pour la tortue ont été améliorées). Promeneurs en périphérie du site (échange avec la DREAL).
- 2) Friche sidérurgique polluée par les métaux (Arcelor Mital) : obj : mise en sécurité durable de 2 bassins contenant des boues sidérurgiques (absence de végétation, bassins soumis à l'érosion éolienne). B1 : étanchéification + végétalisation ; B2 : remise en état agronomique des boues + végétalisation. Obj végétalisation : 100% de couverture végétale pérenne dans le temps. Atteinte de l'obj via ingénierie pédologique de formulation pour répondre à l'usage de végétalisation pérenne des bassins sidérurgiques. Essais internes de germination de graines

pour les espaces verts et bon début de croissance (phytotoxicité) sur les boues. Lixiviation et percolation (sous-traitance). Matériaux du site (laitiers, matériaux terreux) sont fonctionnalisés par ingénierie de formulation ([fonction fertilité visée] en fonction des caractéristiques des matériaux, ajout de MO et d'azote pour augmenter la fertilité du technosol ou modifier sa texture) et vérification que ces matériaux déposés sur les boues n'ont pas d'impact sur la mobilisation des polluants dans les boues (sous-traitance essais de percolation ascendante en colonne (EN 14405 – comportement des déchets/matériaux soumis à des conditions standards de percolation). Fort pouvoir couvrant avec mélange d'espèces végétales (meilleur résultat avec un prix le plus équilibré possible pour le client – on peut faire mieux mais compromis). Suivi des eaux de percolation (pollution).

- 3) Création de jardins (ferme urbaine pour maraîchage) sur site contaminé (laitiers sidérurgiques) mis en sécurité via la valorisation de matériaux non contaminés issus du site (Arcelor Mital propriétaire du site, Luxembourg) : obj : produire des denrées alimentaires saines et construire des sols à partir des matériaux du site (demande du client). Stock de métaux dans les produits bruts importants mais peu lixiviables. Matériau naturel sous-jacent : potentiel après diagnostic de pollution de ces matériaux (référentiels : témoin naturel à proximité du site, fond géochimique local, norme terre végétale, guide refuge). Dépassement en Zn et mise en évidence de lacunes en fertilités physique, chimique [N, P, K, MO] et biologique (vie) (cause : terres profondes). Apport MO et éléments fertilisants. Inversion de couche pédologiques ou apport de terres végétales extérieures et fonctionnalisation sur site par apport de compost. Production de denrées saines validée (fin de la demande du client). Site contaminé avec stockage de laitiers transformé en jardin potager avec plantes mellifères, fleurs, du végétal = renaturation d'un site industriel. Usagers du jardin= maraîchage, jardiniers, domaine pédagogique, lien social.

Mesure du succès de la renaturation :

Indicateurs physicochimiques : concentrations totales en polluants, mobilité des ETM vers les eaux souterraines (lixiviation à l'eau des produits bruts [test normé, facile à faire et peu cher])

Indicateurs agronomiques : structure, texture, pH, conductivité, salinité, état humique, capacité hydrique, éléments fertilisants (évaluation des contraintes éventuelles de végétalisation, capacité de vie dans les sols). Référentiels agricoles.

Indicateur biologique :

-Observation des écosystèmes

-biomasse microbienne (disponible, bon marché mais limite en termes d'interprétation car ne distingue pas les microorganismes morts des vivants, des champignons des bactéries) par fumigation/extraction corrélée au taux de MO. Augmente avec le temps=indicateur de la fonctionnalisation du sol. Référentiel du laboratoire (2 à 4% de C_{org} microbien= souhaitable).

-phytotoxicité : tests de germination à 3 semaines (trèfle, ray-gras/fétuque, basilic, menthe, tomate laitue) (potentiel de végétalisation)

-analyse des concentrations en polluants dans les denrées : comparaison avec les concentrations des mêmes denrées commercialisées et règlement Européen (Cd, Pb) (1881/2006 annexe 6) pour valeurs de gestion des aliments comestibles

Santé humaine :

-EQRS : sur tomate uniquement, aucun risque. Teneurs mesurées en polluants inférieures ou similaires aux valeurs des denrées commercialisées pour les autres productions donc a priori aucun risque.

Leviers : détermination des clients (écoute, communication, envie) pour réussite du projet. Rôle pédagogique des BE. Moyens techniques et financiers pour mettre en œuvre les indicateurs pertinents. Besoin de démocratisation de toutes les analyses (les rendre abordables).

Freins : compétences transversales – savoir chercher les compétences externes. Coût de mise en œuvre des indicateurs/essais. Manque d'expertise (écologue, botaniste, écotoxicologue) et de

laboratoires pouvant réaliser les essais/analyses. Actuellement les clients ne sont pas en demande de ces analyses.

Opportunités : S'entourer des expertises qui ne sont pas présentes en interne (montage de partenariat pour anticiper les futurs besoins des clients).

Matrice SWOT 9 : Usage de renaturation – entretien avec Gaylord Erwan Machinet et Alexandre Perleïn (MICROHUMUS)

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
Multiplication des projets (augmentation du REX)	Coût (quelques laboratoires prestataires).
Existence de référentiels agricoles (indicateurs agronomiques)	Peu de laboratoires en capacité de réaliser les essais/analyses
	Demande client inexistante.
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
Changement d'usage (site industriel en jardin y compris potager)	Prendre en compte les services écosystémiques et les fonctions du sol
Acculturation et engagement des clients	Rendre abordables les essais/analyses (augmenter le nombre de laboratoires prestataires, diminuer les coûts)
Communication sur les REX	
Montage de partenariat pour anticiper les futurs besoins des clients	

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Philippe OUDIN (gérant BE, chimiste de la microbiologie de l'eau, écologue) (SEMACO Environnement) – 18 septembre 2023

Missions SEMACO Environnement : AMO SSP zones naturelles pour l'EPF Grand Est.

Définition renaturation : réserve de biodiversité = on ne fait rien (dynamique naturelle avec possible arrivée de plantes invasives, taillis, ronces). Créer un espace de diversité végétale de qualité et stable dans le temps (écosystème à l'équilibre – plusieurs strates) à partir de l'observation de la flore indigène et faciliter son développement.

Connaît le décret. Important car clarifie les usages.

REX :

-Friche de Milleville (complexe sidérurgique) : Création d'un trou dans une carrière pour prendre de la terre qui a abouti à la création d'une zone humide riche en biodiversité (sans rien faire) sur un milieu pauvre. Attention si création d'un sol riche : arrivée de plante invasive (renouée du Japon).

-renaturation d'un sol pollué (métaux et hydrocarbures) (client producteur/transporteur de courant) : tests sur site en lysimètres sur sol du site sans amendement. Laisser la végétation se développer à partir de la banque de graines pour obtenir une végétation adaptée au site.

-ancienne usine à gaz (métaux, cyanures) : pas de confinement possible. Obj : mise en sécurité du site ; fixer les cyanures et métaux, ne pas imperméabiliser le site et permettre la circulation de véhicules légers (contraintes du client). Tests de lixiviation en colonne long terme et de composition de sols (gré, granit, calcaire) adéquate pour trouver le pH idéal pour fixer les cyanures sans mobiliser les métaux. Tests avec des plantes grasses de sols pauvres et prairies fleuries (mélange de graines - semenciers) pérennes d'avril à octobre. Pas d'analyse des plantes (pas de budget). Pour vérifier l'absence de dispersion des métaux dans l'environnement, deux ruches ont été posées sur le site industriel. Les abeilles ont servi de bioindicateurs ; Les pollen, cire et miel produits par les abeilles ont été analysés. L'apiculteur perdait des abeilles en dehors du site mais celles du site se portaient bien. Des graviers ont été mis pour éviter l'imperméabilisation avec une sélection d'espèces adaptées. Sans gestion du site, les espèces sélectionnées ont disparu au profit d'espèces colonisatrices.

-Etude avec EPF de Lorraine : technosol très pollué (goudrons) mais très diversifié. EQRS a montré que l'usage promenade n'était pas compatible avec la présence de la pollution. Le site a été clôturé et mis en réserve naturelle sans accès du public.

Mesure du succès de la renaturation :

-Observation des écosystèmes : primordiale ! (regarder, écouter)

-Indicateurs biologiques :

Prélèvements d'espèces protégées (faune, flore) sous couvert de dérogation pour mesurer la bioaccumulation des polluants dans ces espèces.

Santé humaine :

-Sur un terrain non clôturé, usage promenade considéré *a minima*. Caractère infranchissable de certaine végétation reconnu par DREAL. Dans ce cas, pas de nécessité de clôturer le site.

Leviers : augmenter la transversalité et l'acculturation sur la renaturation (méconnaissance des espèces et de leur comportement). Dans un projet de renaturation, mettre les personnes de formation différente autour de la table. Communiquer auprès des DREALs pour faire entendre l'aspect environnemental et pas que l'aspect sanitaire.

Freins : prévoir un budget sur 3 ans avec des corrections car vivant. On ne peut pas penser à tout et on peut se tromper. Pas de protocole clef en main. Site dépendant des conditions pédogéoclimatiques. Nécessité d'anticiper les potentiels problèmes dus à la synergie renaturation/changement climatique

(ex : risque incendie surtout en ville conséquence du changement climatique). Nécessité d'avoir de l'eau pour avoir de la biodiversité. Piloter les premières années la végétation pour obtenir une diversité végétale de qualité et stable dans le temps (écosystème à l'équilibre – plusieurs strates).

Opportunités : renaturation fait oublier la pollution au client. Objectif de réappropriation du site. Redonner le site aux promeneurs (service écosystémique : faire profiter les personnes de la biodiversité).

Matrice SWOT 10 : Usage de renaturation – entretien avec Philippe Oudin (SEMACO Environnement)

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
Observation des écosystèmes	Coût du suivi du projet (prévoir le suivi sur 3 ans et des aléas)
	Pas de protocole clef en main
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
Renaturation fait oublier la pollution au client	Former à l'observation des écosystèmes
Contexte One health et réglementaire (ex : décret usages en SSP)	Prendre en compte les services écosystémiques et les fonctions du sol
Augmenter la transversalité en termes de compétences	Faire connaître le concept du one health à l'administration
Communiquer sur la renaturation	

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Florence Baptist (écologue, biogéochimiste) - SOLTIS Environnement – 16 octobre 2023

Missions Soltis Environnement : gérante du BE (pédologie, hydraulique, bioindication des sols). Réalise des suivis de réhabilitation écologique de sites décontaminés avec une pollution résiduelle pour les industriels ; accompagner les collectivités en aménagement du territoire à une meilleure prise en compte des sols ; études institutionnelles pour l'inclusion de la biodiversité dans l'IEM ; études R&D. Positionn2 entre interface entre monde de la recherche et les opérationnels.

Définition renaturation : effet de mode. Avant on parlait de restauration écologique. On a compris qu'on ne pouvait pas revenir à un état initial naturel. Préférence pour réhabilitation écologique. Remettre de la nature. Mais quel est l'écosystème cible et les fonctions ciblées ? Remettre du végétal (en ville) pour permettre de rendre certains services (au service de la population) ? Re-rendre un écosystème autonome et résilient mais pas forcément naturel au sens d'un écologue (il n'a pas besoin d'être irrigué et fertilisé tous les ans) ? Définition du décret nature centrée et pas homme centré=c'est bien. La renaturation n'implique pas un usage, n'est pas là pour répondre à un besoin sociétal. Ere en parallèle de l'EQRS si services écosystémiques.

Connaît le décret et la directive santé des sols.

REX :

1) mesure compensatoire pour répondre à la réglementation : Compenser la perte dans le cadre de la séquence ERC : demande de restauration de l'habitat initialement dégradé (site de référence systématique – le plus souvent à proximité). Les clients parlent de restauration, restauration des fonctions, création et recréation de milieu. L'important est de bien définir la cible (renaturation pour quel usage et quelle fonction ?). Compensation : Restaurer un milieu naturel qui correspond à la référence. Composante sol commence juste à être pris en compte.

2) client urbain (collectivité) : demande de renaturer une friche, c'est-à-dire de fixer la pollution par de la végétalisation ; restauration d'un corridor écologique (au service des espèces) ; réduction des îlots de chaleur (au service des populations) ; service récréatifs (permettre la balade des usagers) ; jardin partagé. Difficulté de trouver un site de référence dans le cadre SSP.

3) Planification écologique tenant compte de la qualité des sols (ZAN) : peu d'étude. Demande des collectivités : « on va devoir réduire notre consommation d'espace, dites nous ce qu'il va falloir renaturer pour qu'on puisse gagner en crédit à artificialiser ». Comment concilier îlots de fraîcheur avec déplacement des espèces et crues ? Trouver les secteurs qui remplissent ces critères.

Mesure du succès de la renaturation :

-outil RECORD (en 2016 réponse AO commun Soltis-Environnement/BRGM/VertigoLab « identifier les indicateurs de succès de la réhabilitation des milieux prairiaux ») : outil excel qui s'applique sur tous les milieux ; description des enjeux et usages futurs du site ; services et fonctions à restaurer ; proposition automatique d'indicateurs de suivi des services écosystémiques et de fonctions de l'écosystème végétal-sol ainsi que des solutions fondées sur la nature (ex : phytomanagement quand pollution résiduelle sur site). Liste d'indicateurs disponibles en fonction de leurs niveaux de maturité, d'opérationnalité et de coûts. Démarche : proposition d'indicateurs les plus simples à mettre en place puis indicateurs disponibles pour que l'opérateur puisse suivre la réhabilitation et la refonctionnalisation du site (indicateurs associés à la fonction et au service). Onglet qui vise à présenter la TRIADE (diagnostic risque pour l'environnement avant de lancer la réhabilitation). Ouverture au public de l'outil, gratuit et diffusable (vers une plateforme web).

-Indicateurs agropédologiques : « pack agro », fosse pédologique (profil de sol, description des horizons de sol)

-Indicateurs physico-chimiques : mesure des métaux dans les sols, « pack ISDI » (problématique sanitaire)

-Indicateurs biologiques :

Recouvrement et diversité végétal, présence d'espèces exotiques envahissantes

Sol vivant (biodiversité dans les sols) : inventaire/abondance des vers de terre, nématodes (très mature), biomasse microbienne (socle de base). En complément, indicateurs qui renseignent sur le cycle carbone et caractérisation de la MO (ratio bactéries/champignons – connu en agriculture), ADN environnemental (R&D, référentiel RMQS agro/culture).

Santé humaine :

-EQRS (partenaire SSP) : absence de risque sanitaire au regard de l'usage visé. Phytostabilisation peut être proposée si pollution résiduelle (fixation de la pollution, réalisation par partenaire SSP).

Leviers : en milieu urbain - objectifs à atteindre (différent de compensation règlementée où le suivi est obligatoire, obligation de résultats, contrôles potentiels). Visuellement, est-ce qu'on a le recouvrement végétal attendu ? est-ce que l'écosystème est autonome ? n'y a t'il pas un problème d'irrigation (coûts supplémentaires) ? comment faire pour que ça marche et qu'on n'y revienne pas (que ça pousse, que les arbres plantés ne meurent pas à 2-3 ans pour réduire les coûts, évitement des espèces exotiques envahissantes, le succès dans le temps, les différentes strates, espèces protégées, grande diversité d'espèces, MO dans les sols et carbone, sol vivant monte). Réduire l'irrigation /ne plus irriguer (sécheresse, coût). Encadrement réglementaire. Augmenter le REX ; Améliorer les pratiques raisonnées pour gestion parcs et jardins (ne pas trop augmenter la fertilité pour éviter les couverts monospécifiques) et quels végétaux mettre pour que ça tienne dans le temps, adapter la végétation au sol. Diffusion de l'outil RECORD ;

Freins : les clients financent très rarement le suivi. Suivi coût supplémentaire pour les clients. Difficulté à appliquer la norme TRIADE en l'état ; Besoin de gagner en opérationnalité (aucun client ne le demande mais parce que Soltis n'est pas SSP vs Envisol utilise la TRIADE et évalue le risque pour l'écosystème en faisant des tests écotox sans passer par la TRIADE).

Opportunités : structuration de la demande des clients (quelles fonctions, quels services réhabilités ?) peu de REX ; acculturer les clients au rôle des sols pour la renaturation (générer une demande d'indicateurs pour la biodiversité des sols et l'activité métabolique des sols) et au risque pour l'environnement (mesure de la biodisponibilité des polluants dans le sol). Suivi de l'évolution dans le temps (référentiel T0 pour comparaison). Objectif de renaturation dans le cadre de la désimperméabilisation = contexte émergent du ZAN. Fonctions mises en avant par les clients : production du végétal (réduction des îlots de chaleur, bien-être des populations avec parcs...) et infiltration des eaux (réduire les crues et recharger les nappes). Carbone très émergent (collectivité ne voit pas comment faire le lien avec leur PCAET). Communiquer sur les solutions innovantes qui fonctionnent et qui permettent d'éviter des coûts (terres fertiles à partir de matériaux inertes du site, éviter de faire venir des terres végétales « économie circulaire à l'échelle de l'agglomération- petit cycle des terres »), vérifier l'innocuité sur la biodiversité, accompagner les élus pour leur montrer l'intérêt d'une stratégie de renaturation par rapport aux exigences réglementaires et au fait de pouvoir répondre aux souhaits des populations (pendant de l'aménagement du territoire tenant compte des enjeux économiques, répondre aux enjeux sociétaux et climatiques).

Matrice SWOT 11 : Usage de renaturation – entretien avec Florence Baptist (Soltis-Environnement)

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
Indicateur visuel du succès de la renaturation (recouvrement végétal)	Coût (quid du suivi ?)
	Peu de REX (suivi dans le temps)
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
Compensation (cadre réglementaire)	Bien identifier les enjeux et objectifs de renaturation.
Loi ZAN (désimperméabilisation), changement climatique	Acculturer les clients au rôle des sols pour la renaturation (générer une demande d'indicateurs pour la biodiversité et l'activité métabolique des sols) et au risque pour l'environnement (mesure de la biodisponibilité des polluants dans le sol).
Limitation des espèces exotiques envahissantes	Communiquer sur les solutions innovantes qui fonctionnent, permettent d'éviter des coûts (« petit cycle des terres ») et de répondre aux exigences réglementaires et enjeux sociétaux et climatiques.

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Xavier Marié – Sol Paysage – 3 octobre 2023

Missions Sol Paysage : BE diagnostic agro-pédologique et cartographie pour l'aménagement du territoire ; réemploi de matériaux pour la renaturation (Vocabulaire technosol pas adapté) ; maître d'œuvre paysagiste (artificialisation/désartificialisation de sols). Urbanisme opérationnel. Pas de travaux dans le cadre de réhabilitation écologique de milieux/friches. Ne fait pas de la renaturation pour elle-même.

Définition renaturation : terme arrive comme une ambiguïté via code de l'urbanisme article L101-2-1 qui définit l'artificialisation/désartificialisation de sols avec le mot clef désartificialiser=renaturer les sols (« 7° La renaturation des sols artificialisés. L'artificialisation est définie comme l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage. La renaturation d'un sol, ou désartificialisation, consiste en des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé. »). Mot clef d'évitement de désartificialisation. N'existe pratiquement pas dans les champs sémantiques des cahiers des charges quand il s'agit de faire des études préalables et de faire de la maîtrise d'œuvre. Remettre en place de la nature là où elle n'était pas. Suppose un sol originel qu'on aurait dénaturé et suppose de revenir au sol pédologique originel. Compréhension de l'état originel d'un sol qui ne l'est plus=travailler par approximation ou par proximité ? besoin d'aménagement ? nature=origine. Différent de réhabilitation de certaines fonctions écologiques du sol ou du système sol-plante-animaux.

REX

- 1) Trame urbaine (verte et bleue, corridor) : objectif : utiliser des espaces structurants, plus ou moins interstitiels et larges pour faire de la nature en ville. Faire du paysage et proposer des usages liés à ces paysages. Aboutir à un état fonctionnel compatible avec les usages (plus à l'aise avec la terminologie réhabilitation écologique que renaturation). Il ne s'agit pas de proposer une approche strictement écologique qui n'a de sens que pour elle-même mais de défendre un point de vue de remise en fonctionnement de nature supposée originelle.
- 2) Aménagements Métropole de Lyon : Objectif : Répondre au besoin de réemploi des matériaux (« démontage et remontage » des sols) sur la base d'une typologie de matériaux et de sols. Proposition d'une cartographie des sols à l'état initial confrontée au plan de projet qui peut aboutir au besoin de reconstitution de sols fertiles fonctionnels permettant la réussite du projet paysager et la mise en place des fonctions écologiques dans le tissu urbain. Diagnostic amont agro-pédologique des sols en parallèle d'un diagnostic SSP aboutissant à la définition d'itinéraire technique de réemploi (principe de reconstitution de sols avec des matériaux issus ou non du site) et choix des essences végétales en fonction des objectifs et des sols en place.
- 3) Aménagements écoquartier ville de Dieppe/Rouen : Objectif : tester des indicateurs fonctionnels à l'état initial (sol constitué de remblais) et 2 ans après pour évaluer leur pertinence et opérationnalité. Diagnostic agropédologique sur 1m20 de profondeur (description paramètres physiques et biophysiques de deux horizons de sol- surface et sous-surface – ayant des fonctions spécifiques (nutrition, habitat pour la biodiversité, stockage/recyclage du C pour l'horizon de surface vs potentiel d'enracinement, rétention en eau [réserve utile pour les plantes]), infiltration [perméabilité à saturation] pour l'horizon de sous-surface), mesures et prélèvements sur le terrain (infiltration, vers de terre), analyses au laboratoire (éléments nutritifs, granulométrie, rétention en eau, analyse microbienne) et calcul d'un score fonctionnel moyen agrégé par fonction (0 à 3 à partir de référentiels agronomiques disponibles / référentiel pédologique national).

Mesure du succès de la renaturation :

-observation du recouvrement et du développement du végétal (aérien et racinaire pour structurer le sol, les premières années – période la plus critique). Traduction de « ça a marché=ça pousse ».

-Indicateurs agro-pédologiques (paramètres)

Fosse pédologique pour connaissance des sols (lacunaire, en silo) en dehors de l'aspect contamination pour dégager une évaluation fonctionnelle de l'état initial.

« Pack agro » [+ état fertilisant des sols=succès de l'implantation du végétal]

Fiche pédologique des sols (description normée des profils de sols par horizon et photos) : profondeur, texture, humidité, couleur, hydromorphie, test HCl, structure, porosité, présence de racines/galeries (bioturbation)/déjections

-Indicateurs biologiques :

Biomasse microbienne, nématofaune (renseigne sur la chaîne trophique), vers de terre (abondance, diversité, biomasse)

-intégration des indicateurs aide à la décision) : calcul d'un score fonctionnel moyen agrégé par fonction (0 à 3 à partir de référentiels agronomiques disponibles / référentiel pédologique national).

Leviers : Porté à connaissance de la contamination des sols (code de l'environnement [Article L556-1](#) et [Article L556-2](#))=obligation réglementaire. Nécessité de développer une méthodologie unanime/consensuelle et faisable économiquement provenant de REX de terrain (les réponses ne viendront pas de la recherche). Intégration des indicateurs=Comment évaluer la fonction de contamination (évaluation négative cf score ?). Besoin d'une expertise transversale sur les sols et globale sur le projet d'aménagement.

Freins : Difficulté pour les acteurs de l'aménagement à gérer la réglementation du droit de l'environnement sur la biodiversité (espèces protégées/destruction d'habitat). Le terme de renaturation ne veut pas dire la même chose en fonction des publics (ex : route, autoroute, logement avec un espace vert vs une friche non gérée dégradée avec des espèces protégées et on laisse la nature évoluer naturellement. Intérêts divergents entre aménageurs et défenseurs de l'environnement). Peut faire croire qu'on est capable de renaturer alors que ce n'est pas le cas. Gestion des terres pour reconstituer des sols, bon réemploi des terres excavées = moteur économique, économie de l'aménagement. Si l'objectif de l'aménagement urbain est d'être écologique (preuve de fonctionnement écologique) alors en complément des indicateurs pédologiques, il faudra des indicateurs biologiques (précision de la compréhension pédologique des sols) mais ça veut dire acter un consentement à payer des indicateurs biologiques. Fonctionnement des écosystèmes urbains s'opère à travers le paysage urbain (différentes strates végétales qui ont leur dynamique) et leur gestion pour assurer la durabilité du paysage. Coûts analytiques. Limites des référentiels génériques et agronomiques.

Opportunités : Nécessité de réaliser une étude de sol dans les études d'impact. Les opérateurs se retrouvent avec une étude SSP obligatoire et une étude géotechnique en lien avec le moteur économique de la constructibilité. Augmenter la transversalité de la compréhension des sols par une connaissance agro-pédologique des situations de projets en plus du porté à connaissance SSP et géotechnique. La renaturation s'inscrit dans une chaîne de valeur de l'aménagement car il faut un moteur économique pour renaturer. Objectif principal de la renaturation=adaptation au changement climatique (écosystème en bonne santé qui permet d'apporter des services qui concourent à la santé des habitants) et non la biodiversité pour elle-même (il n'y a pas que les espèces protégées et patrimoniales). Comment pour les générations futures proposer une solution de renaturation qui permettra l'adaptation au changement climatique ? Vivant ne veut pas dire biodiversité. Il faut que le sol existe dans le débat citoyen (documents d'urbanisme, enquête publique, ZAN, etc.) ce qui n'est pas le cas aujourd'hui. Faire appliquer le ZAN.

Matrice SWOT 12 : Usage de renaturation – entretien avec Xavier Marié (Sol Paysage)

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
Indicateur visuel du succès de la renaturation (recouvrement végétal)	Coût - consentement à payer des indicateurs biologiques - coûts analytiques (économie de l'aménagement)
	Difficulté pour les acteurs de l'aménagement à gérer la réglementation du droit de l'environnement sur la biodiversité (espèces protégées/destruction d'habitat)
	Limites des référentiels génériques et agronomiques
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
Réemploi des terres excavées	Bien identifier les enjeux et objectifs de renaturation (lever l'ambiguïté de la définition de renaturation).
Réaliser systématiquement des études de sol dans les études d'impact	Prendre en compte les services écosystémiques et les fonctions du sol
Adaptation au changement climatique	Acculturation (porté à connaissance) à la compréhension des sols (connaissance agro-pédologique en plus du porté à connaissance SSP et géotechnique) - Mettre le sol dans le débat citoyen
Faire appliquer le ZAN	Développer une méthodologie unanime/consensuelle et faisable économiquement provenant de REX de terrain
	Besoin d'une expertise transversale sur les sols et globale lors de projet d'aménagement.

Compte-rendu de l'entretien réalisé avec Julien Laurette (ingénieur agronome et compétence transferts sol-plante de métaux) Terra Innova – 19 septembre 2023

Missions Terra Innova : valorisation des terres excavées non polluées (dans la plupart des cas) pour des agriculteurs majoritairement. Renaturation/redynamisation des terres profondes non/peu fertiles (pas de structure, peu d'activité biologique et de MO) pour réaliser des infrastructures écopaysagères. Valorisation des déblais/terres polluées sur site pour fabriquer des substrats fertiles (fosses d'arbres, travaux de verdissement) afin d'éviter de faire venir/transporter des terres hors du site. Economie circulaire/de ressource. Amélioration/reconstruction/épaississement de sol= vocable technosol pas adapté. Assistance à maîtrise d'ouvrage. Suivi pendant 3 ans des parcelles. BE avec sensibilités écologique, pédologique et agricole et compétence travaux publics. Paiement pour services environnementaux en réflexion (monétisation des services écosystémiques).

Définition renaturation : redonner une fonctionnalité à des terres scellées ou polluées par exemple via un biotraitement pour les rendre plus vivantes et pour qu'elles fournissent des services écosystémiques.

REX :

- 1) Traitement sur site par phytoremédiation (client promoteur) : Objectif/ réaliser un espace vert. Evitement de l'excavation et du transport de ces terres hors site pour traitement en site de stockage de déchets. Gestion des aspects sanitaires (contamination), techniques (temps, espace), agronomiques (nécessité d'amendement du sol, maturation du substrat) pour définir un itinéraire technique adapté. Proposition d'un itinéraire technique et suivi de l'efficacité des mesures de gestion.
- 2) Renaturation parcelle agricole (client agriculteur/Tours, Lyon) : agriculture de conservation des sols. Objectif : augmenter la rétention d'eau (réserve utile) sur un substrat calcaire. Mise en sous-couche de matériaux profonds sur des parcelles en surface pour augmenter l'épaisseur de sols et la rétention en eau. Redynamisation rapide en 2-3 ans. Définir un itinéraire technique adapté pour remise en culture des terres (production pour alimentation humaine ou animale, grande culture, élevage en prairie, maraîchage). Proposition d'un itinéraire technique et suivi.
- 3) Utilisation de terres excavées pour faire des infrastructures écopaysagères (client agriculteur/ouest de la France): objectif : haies sur talus. Talus en terre minérale=oligotrophe, plus complexe et plus riche en biodiversité que les milieux riches. Partie prix de ne pas ajouter massivement de compost ou de terre végétale. Croissance plus lente mais arbres plus résilients car système racinaire en profondeur. Observation de la végétation naturelle pour sélection des espèces (garantie de succès). Proposition d'un itinéraire technique et suivi.

Mesure du succès de la renaturation :

-observation du recouvrement et du développement du végétal (aérien et racinaire pour structurer le sol, les premières années – période la plus critique). Traduction de « ça a marché=ça pousse ». Taux de croissance, taux de survie (suivi au cours du temps). Définition des facteurs de succès et d'échec (choix d'espèces, d'amendements en fonction du REX).

-Indicateurs agro-pédologiques (paramètres)

Fosse pédologique pour connaissance des sols et de la fonction rétention d'eau : profil pédologique à la bêche et mesure point de flétrissement (pf) en labo ou calcul avec abaque (comparaison avec parcelle adjacente comme témoin). Estimation de gain (observation - pas de mesure quantitative ; mise en culture d'espèce qui n'était pas possible de cultiver précédemment).

Estimation de la fonction d'érosion

« Pack agro » [+ état fertilisant des sols=succès de l'implantation du végétal]

-Indicateurs biologiques :

Macro et microfaune du sol (proposé mais pas de demande du client). Présence de mycorhizes.

-Contamination

Décroissance des hydrocarbures dans le sol (abattement de la pollution).

Biodisponibilité des polluants dans les sols : proposée mais très peu acceptée par le client (surcoût).

Concentrations dans les parties aériennes de la végétation : proposée mais très peu acceptée par le client (surcoût).

Risque sanitaire (principe de base : pas de terre polluée en zone agricole) : Problématique fluorures et sulfates dans les sols. Pas de valeur seuil pour ces substances (ESR et hypothèses majorantes) et hydrocarbures. Autres polluants=appel à un BE SSP pour recommandations en fonction de l'usage. Usage émergent à prendre en compte (ex : écopâturage avec production de lait ou de viande).

Leviers : Paiement des agriculteurs pour services environnementaux (monétisation des services écosystémiques) en contrepartie de changer ses pratiques (absorption du risque qu'il prend – perte de rendement la 1^{ère} année par ex). Mesure des impacts pour apporter encore plus de crédibilité à ces solutions (caution scientifique).

Freins : Coûts analytiques. Coûts associés à la sous-traitance des dossiers d'autorisation environnementale (garantie sur la valorisation des terres excavées, justifier de la non-destruction d'habitat et d'espèces protégées – BE spécialisée en écologie) et d'impact des travaux (prévoir des compensations). Tension captation ressource en déchets verts et MO en général.

Opportunités : financier (solution moins chère que l'excavation) ; sensibilité au côté environnemental pour les collectivités (économie de ressource) ; faire connaître les REX positifs ; réaliser des bilans coûts-bénéfices pour avoir des fourchettes de coûts et faire connaître les avantages de ces solutions. Faire de la pédagogie sur la renaturation et leurs avantages pour les rendre plus visibles.

Matrice SWOT 13 : Usage de renaturation – entretien avec Julien Laurette (TerraInnova)

POINTS POSITIFS (+)	POINTS NÉGATIFS (-)
FORCES	FAIBLESSES
Indicateur visuel du succès de la renaturation (recouvrement végétal)	Coût - consentement à payer des indicateurs biologiques - coûts analytiques et associés à la sous-traitance des dossiers d'autorisation environnementale et d'impact des travaux.
	Tension captation ressource en déchets verts et MO en général.
OPPORTUNITÉS	VERROUS À LEVER
Réemploi des terres excavées économie de ressource ; sensibilité environnementale)	Paiement des agriculteurs pour services environnementaux (monétisation des services écosystémiques) en contrepartie de changer ses pratiques (absorption du risque qu'il prend – perte de rendement la 1 ^{ère} année par ex). Mesure des impacts pour apporter encore plus de crédibilité à ces solutions (caution scientifique).
Financier (solution moins chère que l'excavation)	Prendre en compte les services écosystémiques et les fonctions du sol
Faire connaître les REX positifs ;	Acculturation (porté à connaissance) à la renaturation ;
Réaliser des bilans coûts-bénéfices pour avoir des fourchettes de coûts et faire connaître les avantages de ces solutions.	Mesure des impacts pour apporter encore plus de crédibilité à ces solutions (caution scientifique).
Faire de la pédagogie sur la renaturation et leurs avantages pour les rendre plus visibles.	

