

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



**OUTIL DE CONCEPTION ET DE SUIVI DE LA REHABILITATION
ÉCOLOGIQUE DE SITES DÉGRADÉS INTÉGRANT LES
SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE**

EXEMPLES D'APPLICATION EN CONTEXTE URBAIN

RAPPORT FINAL

juin 2021

F. BAPTIST, S. COTILLON – Biotope
J. HELLAL, E. LIMASSET – BRGM
C. ANGLADA, S. BENZEKRI – Vertigo Lab



Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégialement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

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, 2021, 111 p, n°19-1024/1A

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

Comité de suivi de l'étude :

Catherine BAUMGARTNER - EDF, Bénédicte COUFFIGNAL - RECORD, Caroline de ZUTTER - ENGIE, Isabelle DEPORTES - ADEME, Nadia DJEMEL - TOTAL / RETIA, Cécile GRAND - ADEME, Nathalie GUISERIX - RENAULT, Jean-Philippe JAEG - RECORD / Ecole vétérinaire de Toulouse, Roger JACQUET - SOLVAY, Fabien LAURENT - SOLVAY, Loic PIANFETTI - SNCF, Lilian MARCHAND - Le Lyre – Suez eau France, Inès IMBERT - EIFER

© RECORD, 2021

RESUME

La loi pour l'accès au logement et urbanisme rénové (ALUR), la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt (LAAF) ou encore l'engagement fort de la France pour atteindre l'objectif de « zéro artificialisation nette » (ZAN) inscrit au plan biodiversité en 2018 encouragent la reconquête des espaces anciennement industrialisés situés en zone urbaine ou périurbaine dans l'objectif de favoriser la construction de la ville sur la ville et ainsi lutter contre l'artificialisation des sols. Dans ce contexte, la réhabilitation et la dépollution des habitats dégradés en contexte urbain se multiplient depuis quelques années. Un des enjeux de ces projets de réaménagement est de favoriser la création d'espaces de nature en ville et de restaurer leur fonctionnalité générale afin que les habitants et usagers puissent bénéficier des services qui en découlent. Néanmoins, les données sur les expériences combinées de réhabilitation écologique et de dépollution restent limitées notamment au regard du fonctionnement général de l'écosystème restauré. De même, très peu d'outils opérationnels (méthodologie / indicateurs) permettent d'orienter la conception d'un projet de réaménagement de façon à favoriser le rétablissement d'un écosystème fonctionnel, autonome et à l'origine de biens et services rendus à la population.

Cette étude propose une démarche conceptuelle et méthodologique permettant d'orienter un projet de réaménagement de manière à favoriser la réhabilitation écologique d'une partie de l'écosystème urbain par la mise en œuvre de solutions fondées sur la nature. Dans une optique d'opérationnalisation, un outil Excel assorti d'une notice d'utilisation a été élaboré sur la base de cette démarche. Il permet, grâce à des données d'entrée spécifiques à un site et renseignées par son utilisateur (gestionnaire ou industriel), d'avoir accès à une liste des solutions fondées sur la nature pouvant idéalement se substituer à des solutions conventionnelles fortement impactantes. Cet outil propose par ailleurs des indicateurs de suivi des fonctions et services écosystémiques permettant de mesurer le succès de la réhabilitation écologique mise en œuvre sur le site.

MOTS CLES : milieux urbains, réhabilitation, sites et sols pollués, fonctions écologiques, services écosystémiques, indicateurs, solutions fondées sur la nature.

SUMMARY

The law for access to housing and renovated urban planning (ALUR), the law for the future of agriculture, food and forestry (LAAF) and France's strong commitment to achieve the objective of "zero net land take" (ZAN), which is part of the biodiversity plan for 2018, encourage the reclamation of formerly industrialized areas located in urban or peri-urban zones with the aim of encouraging the renewal of the city on itself and thus combating land take and soil degradation. In this context, the rehabilitation and remediation of degraded habitats in an urban context has been increasing in recent years. One of the challenges of these redevelopment projects is to encourage the creation of nature areas in the city and to restore their general functionality so that inhabitants and users can benefit from the resulting services. Nevertheless, data on combined experiences of ecological rehabilitation and remediation remain limited, particularly with regard to the general functioning of the restored ecosystem. Similarly, very few operational tools (methodology/indicators) make it possible to guide the design of a redevelopment project in such a way as to promote the restoration of a functional, autonomous ecosystem that is the source of goods and services for the population.

This study proposes a conceptual and methodological approach to guide a redevelopment project so as to favor the ecological rehabilitation of part of the urban ecosystem through the implementation of nature-based solutions. With a view to operationalization, an Excel tool with instructions for use has been developed on the basis of this approach. Using site-specific input data provided by the user (manager or industrial operators), it provides access to a list of nature-based solutions that can ideally replace conventional, high-impact solutions. This tool also provides indicators for monitoring ecosystem functions and services to measure the success of the ecological rehabilitation implemented on the site.

KEY WORDS : urban environments, rehabilitation, polluted sites and soils, ecological functions, ecosystem services, indicators, nature-based solutions.

SOMMAIRE

CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	8
1- RAPPEL LEGISLATIF ET REGLEMENTAIRE.....	11
Législation et réglementation « Biodiversité »	11
Législation et réglementation « Sol »	11
Législation et réglementation « Sites et sols pollués » et politique nationale de gestion	12
Mise en œuvre d'actions combinées réhabilitation écologique et réhabilitation SSP	12
Vers un contexte juridique de plus en plus favorable pour lutter contre l'artificialisation des sols	13
2- PRESENTATION DE LA DEMARCHE CONCEPTUELLE ET METHODOLOGIQUE	14
Eléments de contexte.....	14
Présentation de la démarche	15
Définition de l'échelle spatiale	17
Définition de l'échelle temporelle	17
3- PRESENTATION DES DIFFERENTES TYPOLOGIES EN APPUI A LA DEMARCHE PROPOSEE	18
Typologie des enjeux urbains	18
Typologie des services écosystémiques.....	19
Typologie des fonctions	21
Typologie des solutions fondées sur la nature (SfN).....	22
Typologie des habitats composant l'écosystème urbain élémentaire.....	29
4- PRESENTATION DES INDICATEURS.....	32
Indicateurs de fonctions.....	32
Focus sur les indicateurs du compartiment souterrain	34
Focus sur les indicateurs du compartiment aérien	35
Indicateurs de services écosystémiques	55
5- SCHEMA D'INTERRELATION PAR ENJEU	60

Adaptation au changement climatique	61
Atténuation au changement climatique	62
Gestion des eaux urbaines et de leur qualité	63
Gestion des inondations.....	64
Gestion de la qualité de l'air	65
Gestion de la qualité des sols	66
Préserver ou restaurer la biodiversité dans les écosystèmes urbains	67
Production de ressources (production agricole)	68
Production de ressources (produits de la cueillette)	69
Production de ressources (apiculture).....	70
Amélioration de la qualité de vie	71
Garantie de santé des populations.....	72
6- PRESENTATION DE L'OUTIL PAR ETAPE.....	73
Etape 1. Ouverture du tableur et démarrage d'un nouveau projet.....	73
Etape 2 : Présentation du tableur avant analyse	74
Etape 3 : Lancement de l'analyse	74
Etape 4 : Remplissage de l'onglet « 1.Contexte »	75
Etape 5 : Remplissage de l'onglet « 2.Enjeux »	76
Etape 6 : Remplissage de l'onglet « 3.Services fournis ».....	76
Etape 7 : Présentation des résultats	78
En synthèse	80
7- CONCLUSION ET PERSPECTIVES	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	82
ANNEXE 1. RAPPEL DES DEFINITIONS CLES.....	85
ANNEXE 2. LISTE DES SE RETENUS DANS LE PROGRAMME EFESE GENERAL ET SPECIFIQUE AUX ECOSYSTEMES URBAINS	91

ANNEXE 3. TABLES DE CORRESPONDANCE ENTRE LES DIFFERENTES MATRICES	92
Matrice Enjeux – SE.....	93
Matrice SE – SFN	94
Matrice SE – Fonctions	98
Matrice SFN - Habitats	99
ANNEXE 4. NOTE SUR LES APPROCHES MOLECULAIRES PROPOSEES POUR CARACTERISER LES FONCTIONS ECOLOGIQUES MICROBIENNES DU SOL DANS LE CADRE D'UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE	103
INTRODUCTION	103
ORIGINE ET CONCEPT DES APPROCHES MOLECULAIRES.....	103
METHODES BASEES SUR L'ADN ET L'ARN (GENOMIQUE ET TRANSCRIPTOMIQUE)	104
FOCUS SUR LES TECHNIQUES PROPOSEES DANS L'ETUDE RECORD	105
AUTRES TECHNOLOGIES OMIQUES : LES OUTILS DE DEMAIN ?	107
QUELLE APPLICATION DE CES APPROCHES DANS LE CADRE D'UNE REHABILITATION ECOLOGIQUE ?	108
CONCLUSION : LES ENJEUX DE DEMAIN	108
REFERENCES	109

Liste des abréviations

ALUR : Loi pour l'accès au logement et urbanisme rénové

ICPE : installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

LAAF : Loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt

MTESS : Ministère de la Transition écologique et de la solidarité

SE : Service écosystémique

SfN : Solution Fondée sur la Nature

SSP : Sites et Sols Pollués

UE : Union Européenne

ZAN : Zéro Artificialisation Nette

Contexte et objectifs de l'étude

En raison de son passé industriel, la France recense plus de 6 800 sites et sols pollués (SSP) ou potentiellement pollués qui nécessitent une action des pouvoirs publics. Une majorité de ces sites se situe en zone urbaine ou péri-urbaine (données BASOL – 2018). En 2014, tant la loi pour l'accès au logement et l'urbanisme rénové (ALUR) que la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt (LAAF) ont souligné la nécessité de repenser la construction des villes sur elles-mêmes, encourageant la reconquête de ces espaces délaissés, souvent dégradés et ce dans l'objectif de lutter contre l'artificialisation¹ des sols. En France, en effet, ces trente dernières années, l'artificialisation des sols a conservé un rythme soutenu (à hauteur de 137 km² / an sur la période 2006 – 2012²), au dépens notamment des terres de très bonne qualité agronomique (CGDD 2018a). Dans ce contexte, la reconquête du foncier dégradé ou contraint est devenue un enjeu majeur de la recomposition des fonctionnalités et des paysages urbains. Cela s'est en particulier concrétisé avec un engagement fort de la France pour atteindre l'objectif de « zéro artificialisation nette » (ZAN) inscrit au plan biodiversité en 2018.

Face à ce constat, les dépenses liées au réaménagement de sites dégradés ou pollués³ sont en très forte augmentation depuis une quinzaine d'années (Bouagal, 2012) et les projets d'aménagement représentent à ce titre environ 70% du marché de la dépollution (études et travaux) (MTES 2017a, MTES 2017b). Un des enjeux de ces projets de réaménagement est de favoriser la création d'espaces de nature en ville et de restaurer leur fonctionnalité générale afin que les habitants et usagers⁴ puissent bénéficier des services qui en découlent (bien-être, réduction des risques liés aux inondations, réduction des risques sanitaires etc., Moll et Petit, 1994). A ce titre, ces personnes constituent les « bénéficiaires » des services rendus par ces espaces de nature. Néanmoins, les données sur les expériences combinées de réhabilitation écologique et de dépollution⁵ restent limitées notamment au regard du fonctionnement général de l'écosystème restauré. De même, très peu d'outils opérationnels (méthodologie / indicateurs) permettent (1) d'orienter la conception d'un projet de réaménagement de façon à favoriser la réhabilitation écologique d'une partie de l'écosystème urbain⁶ et donc la fourniture de services écosystémiques⁷ (SE) et de (2) témoigner du rétablissement d'un écosystème fonctionnel et autonome.

Une première étude, financée par l'association RECORD (Baptist et al., 2018) a abouti à un état de l'art didactique ainsi qu'à un bilan critique des méthodes de mesure de la biodiversité, des fonctions⁸ et des SE dans le contexte particulier de sites dégradés voire pollués réhabilités en prairies. Quarante-six indicateurs de fonction qualifiant le compartiment souterrain et aérien et vingt-et-un indicateurs de SE ont ainsi été identifiés et implémentés dans un prototype d'outil sous format Excel aussi appelé tableau de

¹ D'après le ministère de l'Agriculture, les sols artificialisés comprennent les sols bâtis et les sols revêtus et stabilisés (routes, voies ferrées, parkings, chemins etc.), mais également les chantiers, les terrains vagues et les espaces verts artificiels. L'artificialisation correspond à un changement d'utilisation, laquelle n'est pas nécessairement irréversible (<http://www.gouvernement.fr/indicateur-artificialisation-sols>).

² Source : SOeS-Gis Sol .

³ Pour rappel, un site pollué est un site qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement. Ces situations sont souvent dues à d'anciennes pratiques sommaires d'élimination des déchets, mais aussi à des fuites ou à des épandages de produits chimiques, accidentels ou pas.

⁴ Il est important de noter que suivant les techniques de dépollution retenues, les fonctions du sol peuvent être également impactées (perdues, maintenues, ou améliorées).

⁵ La réhabilitation SSP d'un milieu pollué dans le périmètre d'un site bien défini comprend l'ensemble des opérations effectuées en vue de rendre la qualité d'un milieu pollué compatible avec l'usage du site (actuel ou envisagé). Les opérations de réhabilitation reposent sur des actions et/ou des travaux qui permettront de réduire les risques associés à la pollution du milieu jusqu'à ce qu'ils deviennent acceptables, pour l'usage considéré, vis à de l'homme et de l'environnement.

⁶ Selon le CGDD (2018), l'écosystème urbain est un méta-écosystème composé d'une juxtaposition d'écosystèmes élémentaires sur un territoire urbain défini administrativement. Il se constitue d'espaces très divers dans leurs formes, tailles, leurs degrés de naturalité ou d'artificialité. Les écosystèmes élémentaires constitutifs de ce méta-écosystème urbain incluent notamment les espaces verts, les toitures végétalisées, les forêts urbaines, les friches, les plans d'eau, les aires de loisir, les surfaces imperméabilisées, etc.

⁷ Services que les populations humaines obtiennent directement ou indirectement des fonctions des écosystèmes » (Constanza et al. 1997 ; MEA 2005). Voir définition en annexe 1.

⁸ Les fonctions écologiques désignent les processus naturels inhérents à un écosystème tels que la fonction chlorophyllienne ou le cycle de l'eau.

bord. Produite pour s'appliquer spécifiquement aux milieux prairiaux, il s'agit dans le cadre de cette nouvelle étude de décliner et adapter ce tableau de bord au réaménagement de sites dégradés (dont les sites pollués) en contexte urbain dans l'objectif de favoriser la création d'espaces de nature fonctionnels à l'origine de services pour les usagers.

Le recours aux solutions dites « fondées sur la nature » (SfN) est un des axes méthodologiques permettant le renforcement de ces liens humains/nature (Figure 1). Cette approche, et la démarche opérationnelle qui lui est associée, permet d'orienter le projet de réaménagement vers une plus forte proportion d'espaces naturels réhabilités contribuant au bien-être des habitants ou encore à l'atténuation des changements climatiques (augmentation de la séquestration du carbone dans les sols, amélioration des conditions climatiques locales, etc.). Elle propose également de s'appuyer sur les écosystèmes naturels et leurs fonctions écologiques pour accélérer le rétablissement d'un écosystème autonome et apparaissent de plus en plus comme une alternative crédible et stratégique aux solutions d'aménagement conventionnelles dites « solutions grises ».

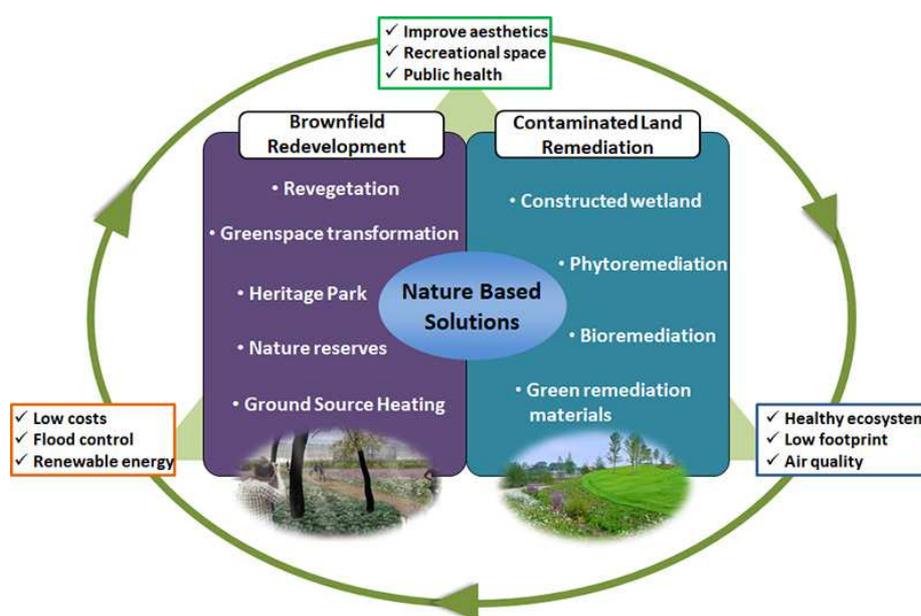


Figure 1. Intérêt des solutions fondées sur la nature dans le contexte des sites dégradés et/ou pollués (Song et al. 2019).

En effet, contrairement aux solutions grises qui s'appuient inévitablement sur une destruction d'habitats naturels (via l'artificialisation des territoires ou l'érosion de la biodiversité), les SfN visent à être efficaces, durables, respectueuses de l'environnement et à avoir un impact à la fois positif pour la biodiversité et pour l'Homme (Tableau 1).

Tableau 1. Exemples de bénéfices socio-économiques et environnementaux et de dommages éventuels engendrés par la mise en place de SfN en milieu urbain (d'après une étude de Song et al. (2019)).

Bénéfices sociaux	Bénéfices économiques	Bénéfices environnementaux	Coûts économiques
Amélioration du paysage urbain	Maîtrise des crues et protection contre les inondations	Création d'un écosystème sain	Coût supplémentaire de maintenance
Opportunités d'activités récréationnelles et de loisirs	Réduction des coûts	Réduction de l'empreinte écologique	Retour sur investissement plus long
Amélioration de la santé humaine	Amélioration de l'économie locale	Maintient la biodiversité terrestre et aquatique	Génère peu de revenus
Amélioration des interactions humaines	Réduction des coûts de remédiation	Recharge des nappes phréatiques et approvisionnement en eau	Coûts de construction supplémentaires
Opportunités éducatives	Réduction des coûts liés au chauffage/rafraîchissement	Maîtrise des crues et protection contre les inondations	-
Préservation culturelle	Éligibilité aux aides publiques	Amélioration de la qualité des eaux douces	-
Préservation de la fraîcheur /	Contribution à l'attractivité du	Régulation des températures	-

Bénéfices sociaux	Bénéfices économiques	Bénéfices environnementaux	Coûts économiques
chaleur urbaine Participation au bien-être physique et mental des riverains -	territoire Amélioration de la performance énergétique Développement possible de l'agriculture urbaine	locales et du climat global Amélioration de la qualité de l'air -	- -

Ainsi dans le cadre de cette étude, il s'agit de proposer une démarche conceptuelle et méthodologique permettant :

- d'orienter le projet de réaménagement de sites dégradés vers une réduction de l'artificialisation des écosystèmes urbains en favorisant la mise en œuvre de solutions fondées sur la nature ;
- de suivre par le biais d'indicateurs la restauration du fonctionnement de ces écosystèmes urbains et des SE qui y sont associés.

La démarche s'applique principalement à l'étape de réhabilitation écologique qui s'opère aujourd'hui le plus souvent après une étape de réhabilitation SSP (mise en œuvre du plan de gestion) si cette dernière était nécessaire sur le site. Il s'agit ici d'orienter le porteur de projet sur le réaménagement d'un site qui ne présenterait qu'une pollution résiduelle (pollution acceptable vis-à-vis des usages prévus après la réhabilitation SSP).

Pour ce faire, les objectifs de l'étude se déclinent comme suit :

- Proposition d'un cadre conceptuel et méthodologique basé sur les solutions fondées sur la nature et la fourniture de SE pour orienter le projet de réaménagement ;
- Construction sous la forme d'un prototype sous Excel d'un outil d'aide à la sélection d'indicateurs de fonctions et de SE les plus pertinents pour suivre l'efficacité du projet de réaménagement (réhabilitation écologique).

Il est également proposé une clarification sémantique des notions et termes utilisés dans le cadre de cette étude ainsi qu'un rappel réglementaire.

Enfin, ce travail est complété par une synthèse bibliographique portant sur l'intérêt des approches moléculaires dans le cadre de la réhabilitation écologique et de dépollution de sites dégradés. Des indicateurs spécialement issus de cette approche sont intégrés à l'outil en précisant leur degré de maturité à partir des travaux notamment de Bouchez *et al.* (2016) et Ademe (2017).

1- Rappel législatif et réglementaire

Législation et réglementation « Biodiversité »

La mise en œuvre des trames vertes et bleues, introduite dès les années 2010 par la loi Grenelle I et II, a permis d'améliorer l'état de conservation des habitats naturels et des espèces et l'état écologique des masses d'eau. Cependant il faudra attendre la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, promulguée en août 2016 (Loi Biodiversité) pour voir inscrit dans le droit français une vision dynamique et renouvelée de la biodiversité. Elle dote ainsi la France de principes renforcés, d'outils nouveaux et de nouvelles mesures pour répondre aux enjeux d'érosion de la biodiversité et de dérèglement climatique. Cette loi résulte également en **une définition réglementaire du terme « biodiversité »** dans l'article L.110-1 du Code de l'environnement.

Depuis 2016, le code de l'environnement précise que la **biodiversité** fait partie du patrimoine commun de la nation, dont la **protection, la mise en valeur, la restauration, la remise en état et la gestion sont d'intérêt général** et concourent à l'objectif de développement durable. La loi biodiversité a pour ambition de mieux concilier activités humaines et biodiversité notamment à travers la prise en compte des SE. La notion de **SE** et des valeurs d'usage⁹ associées à ce patrimoine est également introduite (*Article L. 110-1*). Un des objectifs de développement durable, introduit à l'article L110-1 concerne l'engagement en matière de **préservation de la biodiversité, des milieux, des ressources ainsi que la sauvegarde des services qu'ils fournissent et des usages qui s'y rattachent**.

Législation et réglementation « Sol »

Le code de l'environnement identifie également les sols comme contribuant directement au patrimoine commun de la nation. L'état du sol, et donc sa capacité à assurer ses fonctions et à rendre des services, peut être dégradé relativement rapidement alors que ses processus de formation ou de régénération sont beaucoup plus lents. Néanmoins, il n'existe pas **de politique nationale globale des sols en France** alors qu'elles existent pour d'autres milieux comme l'eau ou les milieux marins. La **gestion des sols en France est abordée de manière sectorielle** : les sites et sols pollués, prévention des risques naturels, urbanisme, politique agricole et forestière etc.

Cependant, on observe tout de même un consensus européen sur le besoin de protéger les sols en luttant contre le processus d'artificialisation qui continue d'augmenter en Europe. La feuille de route pour une « Europe efficace dans l'utilisation de ses ressources » a fixé l'objectif de « supprimer à horizon 2050 toute augmentation nette de la surface des terres occupées » (EC, 2011). **C'est le concept de « zéro artificialisation nette » repris aujourd'hui par un certain nombre de pays**. Compte tenu de l'ampleur du phénomène d'artificialisation sur les sols en France et de ses effets environnementaux négatifs, le Plan biodiversité 2018 a renouvelé l'objectif de lutte contre l'artificialisation (déjà inscrit dans la loi depuis le Grenelle de l'environnement). Il comprend notamment la proposition d'un objectif de zéro artificialisation nette (ZAN) des sols sans objectifs temporels spécifiques. Il appelle à mettre en place des mesures parmi lesquelles figurent la densification des espaces urbains, la lutte contre la vacance de logements ou encore l'augmentation de la valeur des terres agricoles. Depuis, la stratégie nationale bas carbone (SNBC) de 2020, introduite par la Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte (LTECV) prévoit que l'artificialisation des espaces naturels, agricoles et forestiers doit être limitée et son rythme diminué en encourageant l'inscription de nouveaux projets d'aménagement dans l'enveloppe urbaine existante¹⁰. Les propositions de la Convention citoyenne pour le Climat (CCC) poursuivent également le même objectif de limiter drastiquement la consommation d'espace (GT CCC, 2020). Le projet de Loi Climat en cours de discussion prévoit de préciser la mise en application du Plan biodiversité en matière de ZAN.

⁹ Les valeurs d'usage sont les valeurs des bénéfices concrets apportés par l'utilisation effective, envisagée ou possible d'un bien.

¹⁰ <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

En France, différentes réglementations sont susceptibles de s'appliquer dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués : la réglementation **des installations classées** pour la protection de l'environnement (ICPE), la réglementation Déchets et certains articles de la loi ALUR transposés dans le code de l'Environnement. Les **sites et sols pollués** (SSP) au sens large ne font **pas l'objet d'un cadre juridique spécifique ou unique**, comme le sont les installations classées. **Jusqu'à l'arrivée de la loi ALUR de 2014**, les sites pollués sur lesquels aucune ICPE n'a jamais été exploitée connaissaient **un vide réglementaire**. Le seul fondement envisageable pour trouver un responsable était principalement la « réglementation déchets ».

La réglementation dite ICPE s'applique pour les terrains pollués (ou non) qui ont été occupés par une exploitation ICPE. Elle permet de mettre en place des programmes de surveillance de l'impact potentiel de l'exploitation sur l'environnement mais aussi d'établir le responsable des travaux de réhabilitations après l'arrêt d'une exploitation. Dans le cas d'ICPE portant une atteinte possible à la biodiversité, la réglementation ICPE impose que cet intérêt soit pris en compte lors de l'évaluation de dangers ou inconvénients. A noter que la **Loi Responsabilité Environnementale (LRE)**, de 2008 concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux « purs » et graves. Elle peut s'appliquer pour un dommage affectant les sols si celui-ci représente un risque pour la santé humaine.

La Loi ALUR de 2014 a encouragé le renouvellement urbain des friches par le dispositif de tiers demandeur pour accélérer les reconversions. Ce dispositif consiste à confier à un tiers qui en fait la demande les travaux de réhabilitation d'un site ayant accueilli une ICPE en se substituant au dernier exploitant s'il est d'accord. La loi ALUR a également mis en place les Secteurs d'Information sur les Sols (SIS), qui peuvent concerner des sites hors ICPE et qui visent à apporter une connaissance sur les sols le plus en amont possibles, notamment dans les cas de changements d'*usage*¹¹. Les SIS comprennent les terrains où la connaissance de la pollution des sols justifie, notamment en cas de changement d'*usage*, la réalisation d'études de sols et la mise en place de mesures de gestion de la pollution pour préserver la sécurité, la santé ou la salubrité publique et l'environnement. Ils sont mis à disposition du public depuis 2019 (via www.georisques.gouv.fr) après consultation des mairies et information des propriétaires. L'ensemble de ces mesures vont dans le sens des objectifs de ZAN.

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

Mise en œuvre d'actions combinées réhabilitation écologique et réhabilitation SSP

Dans le cadre de la mise en œuvre d'actions combinées « réhabilitation écologique » et « réhabilitation SSP » portant sur un site dégradé, notamment **dans le cadre de remise en état de sites industriels**, la réglementation française des sites et sols pollués et la réglementation biodiversité (code de l'environnement) **n'imposent pas sensu stricto que la fonctionnalité d'habitats soit restaurée et que les SE attendus par ces opérations puissent être effectifs**. La législation française insiste en revanche sur l'importance de la prise en compte de la biodiversité et des services qu'elle fournit dans l'application du **principe d'action préventive et de correction, visant un objectif d'absence de perte nette de biodiversité, voire un gain de biodiversité**. Mais ce principe ne porte **pas précisément sur la fonctionnalité des habitats réhabilités** en dehors des possibilités de compensation écologique.

A l'heure actuelle, la méthodologie nationale de gestion des SSP précise clairement qu'il faut prendre en compte les enjeux pour **les ressources, les milieux naturels, la biodiversité** aussi bien que les enjeux

¹¹ Au sens SSP, voir glossaire.

pour la santé humaine, et ceux pour la ressource en eau (de surface et souterraines). Jusqu'à présent, l'application des outils de gestion des SSP pour l'aide à la décision était (et est toujours) orientée sur les enjeux liés à la santé humaine et à l'évaluation du risque sanitaire¹². Lors de reconversions de sites, notamment des friches de moins de 3 ha, les enjeux écologiques étaient rarement pris en compte dans le projet de reconversion et aucun diagnostic permettant d'évaluer la richesse écologique n'était réalisé (ADEME 2014). Selon le Guide de l'ADEME (2014), le changement d'*usage* du site (reconversion de la friche polluée) est considéré comme le moment opportun pour régler un risque sanitaire potentiel ou avéré en réalisant des travaux de dépollution et s'assurer ainsi de la parfaite compatibilité du milieu avec les nouveaux *usages*.

Les concepteurs d'un futur projet de réaménagement de friche doivent alors réfléchir en amont à la stratégie de dépollution la moins pénalisante pour la biodiversité et s'assurer qu'en cas de réhabilitation SSP et réhabilitation écologique combinée, les nouveaux *usages* et les trajectoires (au sens habitat) soient complémentaires et durable.

Vers un contexte juridique de plus en plus favorable pour lutter contre l'artificialisation des sols

Sur la base des informations présentées précédemment, on constate depuis les années 2010 en France, une évolution juridique de plus en plus favorable à la lutte contre l'artificialisation et à une meilleure prise en compte du compartiment sol et des services qui en sont à l'origine (Figure 2). En effet, le concept de trames verte et bleue a d'abord permis une reconnaissance d'avoir des habitats naturels pouvant assurer leur fonctionnement en ayant notamment une taille suffisante pour une continuité écologique. La Loi ALUR de 2014 a ensuite encouragé la limitation de l'étalement urbain et le renouvellement urbain des friches. La loi biodiversité de 2016 a mis en **avant** la remise en état et la restauration écologique comme d'intérêt général et encourageant à mieux concilier les activités humaines et la biodiversité par le recours aux services écosystémiques. En 2018 est proposé l'objectif de Stratégie « Zéro Artificialisation Nette (ZAN) » dans le plan biodiversité du Ministère en charge de l'environnement. Le projet de Loi climat déposé en 2021 reprend des recommandations de la convention citoyenne sur le climat concernant des objectifs chiffres et temporels du ZAN, notamment diviser par deux le rythme de l'artificialisation sur 10 ans.



Figure 2. Evolution du contexte juridique pour lutter contre l'artificialisation des sols (RECORD, 2021).

¹² Un risque sanitaire est caractérisé par trois éléments : la source de pollution, le vecteur de transfert (sol, eau, air), la cible, c'est-à-dire les milieux exposés (l'Homme, l'environnement).

2- Présentation de la démarche conceptuelle et méthodologique

Compte-tenu des objectifs de l'étude, il apparaît nécessaire de bien définir les termes les plus couramment utilisés sur le sujet de la réhabilitation écologique et de la réhabilitation SSP de sites dégradés en contexte d'écosystème urbain. Une définition de chacun des termes clés employés dans le cadre de cette étude est proposée en annexe 1.

Eléments de contexte

Depuis le Plan Biodiversité de 2018, un cadre de politiques publiques a été institué pour fixer un objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN) en France. Dans ce contexte, les aménageurs sont invités à reconsidérer leurs choix pour aller vers des modes d'aménagement innovants basés sur la réhabilitation et/ou conservation des espaces naturels.

De manière générale, en contexte de réaménagement de sites dégradés, un porteur de projet est amené à se questionner sur les **enjeux** qu'il souhaite prendre en compte dans la conception de son projet de réaménagement. Les enjeux spécifiques à la réhabilitation d'habitats dans des écosystèmes urbains peuvent être d'ordre économique, social ou environnemental, et peuvent s'exprimer à plusieurs échelles : une échelle de la **planification** (par ex. de l'écosystème urbain tel que la commune) ou une échelle plus **locale** (par ex. échelle de l'écosystème urbain élémentaire, du projet d'aménagement, de l'habitat etc.) (Figure 3). Cela peut, par exemple, inclure un enjeu lié à un risque d'inondation (présence d'un plan de prévention du risque d'inondation au droit de l'emprise projet) ou encore un enjeu lié aux conditions climatiques (risque de formation d'îlot de chaleur contre lesquels il sera important de lutter).

Dès lors que le porteur de projet a identifié ces enjeux, il peut alors concevoir le type de solution qu'il va mettre en œuvre afin d'y répondre.

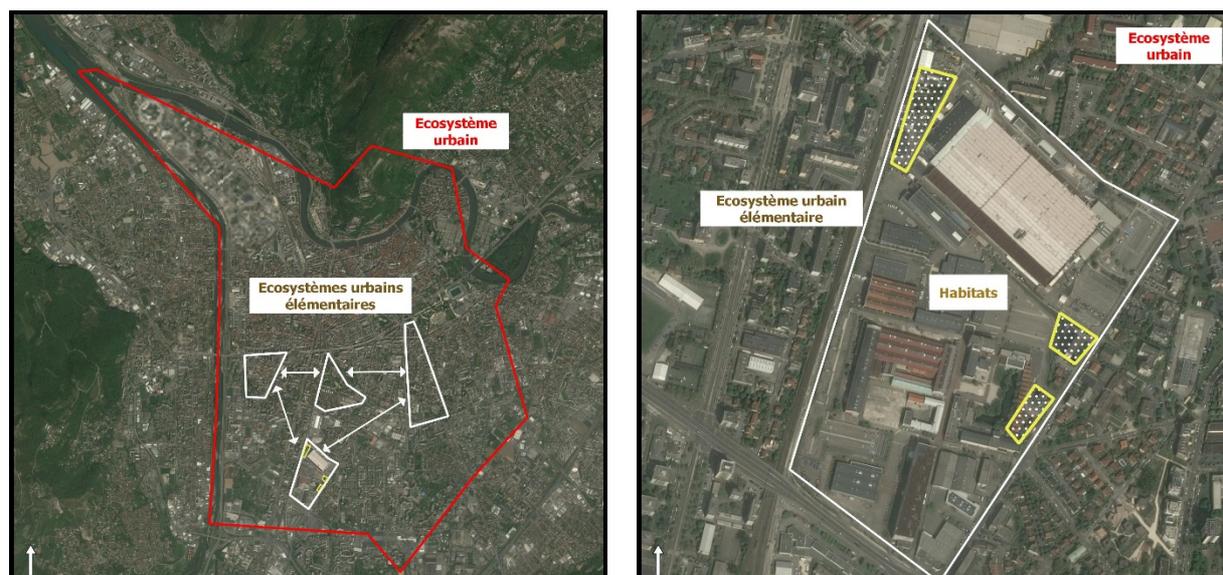


Figure 3. Représentation spatiale des concepts d'écosystème urbain/écosystème urbain élémentaire et habitat. L'**écosystème urbain** est ici considéré comme un méta-écosystème, par exemple la commune de Grenoble. Un quartier ou une friche industrielle correspondent à un **écosystème urbain élémentaire** (Figure de gauche), eux-mêmes constitués d'unités appelées dans le cadre de cette étude « habitats » (Figure de droite). Les écosystèmes urbains éléments sont connectés les uns aux autres (échange de flux) tout comme les habitats (RECORD, 2021).

Deux grands types de solution de réaménagement peuvent être proposés aboutissant à l'établissement de stratégies d'action distinctes.

Un porteur de projet peut s'orienter vers un **scénario de réaménagement conventionnel** en mettant en œuvre des méthodes conventionnelles de réaménagement également appelées dans le cadre de cette étude « Solutions grises ». Si l'on reprend l'exemple ci-dessus, cela peut inclure la construction d'une digue (avec enrochement) pour limiter le risque d'inondation, la création d'un bassin artificiel dit « de

surstockage » pour stocker les excédents d'eau ou encore la mise en place généralisée de climatiseurs dans les nouveaux bâtiments pour limiter les risques sanitaires liés à des températures trop élevées.

Il peut également choisir de s'orienter vers un **scénario de réaménagement fondé sur la nature** basé sur la présence et le fonctionnement des milieux naturels. Toujours dans le cadre de l'exemple, il est possible de proposer un bassin végétalisé permettant de contenir les eaux de submersion en cas de crue, anticiper la préservation des milieux (semi)naturels au plus proche du cours d'eau et dont les agriculteurs pourraient faire l'usage (hors période de crue) ou encore favoriser la plantation d'arbres et de végétation adaptée sur toute l'emprise projet pour limiter l'élévation des températures en période estivale.

Les propositions issues de ce second scénario font appel aux solutions dites fondées sur la nature. Une Solution fondée sur la Nature (SfN) correspond à une action de réhabilitation (écologique ou SSP), de gestion et/ou de préservation visant à maintenir, restaurer ou créer des écosystèmes naturels pour répondre directement aux enjeux de société de manière efficace et adaptative tout en assurant le bien-être humain (fourniture de SE), les avantages pour la biodiversité et le fonctionnement d'autres écosystèmes *in situ* (voir annexe 1 et note en bas de page¹³).

Dans le cadre de la mise en œuvre du ZAN en France, le recours aux SfN n'est pas imposé de manière contraignante mais est désormais vivement encouragé. Des guides méthodologiques, comme celui de l'Évaluation socio-économique des SfN réalisé par CDC Biodiversité et Vertigo Lab¹⁴, permettent par exemple d'attester des implications vertueuses des SfN en termes écologique, économique et sociétal. Au niveau stratégique, la France a également élaboré un Plan National d'Adaptation au Changement Climatique pour la période 2018-2022 (PNACC 2), qui reconnaît l'intérêt des SE pour l'adaptation, et recherche des synergies privilégiant la mise en place de solutions d'adaptation fondées sur la nature et encourageant le traitement de l'enjeu de préservation de la biodiversité. A titre d'exemple, le projet Life intégré ARTISAN (2020-2027) a pour but d'appuyer la mise en œuvre du PNACC 2 en incitant de manière renforcée à la mise en œuvre de solutions d'adaptation au changement climatique fondées sur la nature. Ce projet lancé en décembre 2020 rassemble 29 partenaires pour accompagner la mise en œuvre du PNACC 2 en démontrant et valorisant le potentiel et l'opportunité de ces solutions, sensibilisant et faisant monter en compétences les acteurs clés sur ces thématiques et en accompagnant et amplifiant les projets de SfN en France via le suivi et l'accompagnement poussé de 10 sites pilotes. D'après les dernières actualités sur le projet, les premiers résultats de l'identification des freins à la mise en œuvre des SfN et des leviers à actionner prévues du projet Life lancée en 2020 devraient être disponibles et consultables d'ici la fin de l'année 2021¹⁵.

Présentation de la démarche

Dans le cadre de cette étude, la démarche proposée et l'outil associé reposent en premier lieu sur l'identification, par le porteur de projet, des enjeux observés à l'échelle du projet d'aménagement ou de l'écosystème urbain élémentaire (Figure 4).

En fonction de ces enjeux, l'outil conçu dans le cadre de cette étude lui permet d'avoir connaissance (Figure 4) :

- d'un panel de solutions d'aménagement possibles héritées des Solutions fondées sur la Nature (SfN) pour appuyer la réhabilitation écologique à mettre en œuvre sur les habitats dégradés ;
- d'une liste d'indicateurs lui permettant de suivre l'effectivité des mesures mises en œuvre. Il peut s'agir d'indicateurs relatifs aux Services Ecosystémiques (SE) rendus par le site ou aux fonctions qui s'y expriment.

Le schéma ci-dessous présente de manière très simplifiée les données d'entrée et de sortie de l'outil de sélection des indicateurs.

¹³ Définition modifiée et adaptée d'après la résolution WCC-2016-Res-069 de l'UICN qui indique que les SfN sont des actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés, pour relever directement les enjeux de société de manière efficace et adaptative tout en assurant le bien-être humain et les avantages pour la biodiversité.

¹⁴ <http://www.mission-economie-biodiversite.com/wp-content/uploads/2019/08/BIODIV-2050-N17-FR-MD-WEB.pdf>

¹⁵ Plateforme d'actualités sur le projet Life Artisan, OFB, au 23/04/2021 : <https://ofb.gouv.fr/actualites-life-artisan/les-actions-freins-et-leviers-ont-debute>

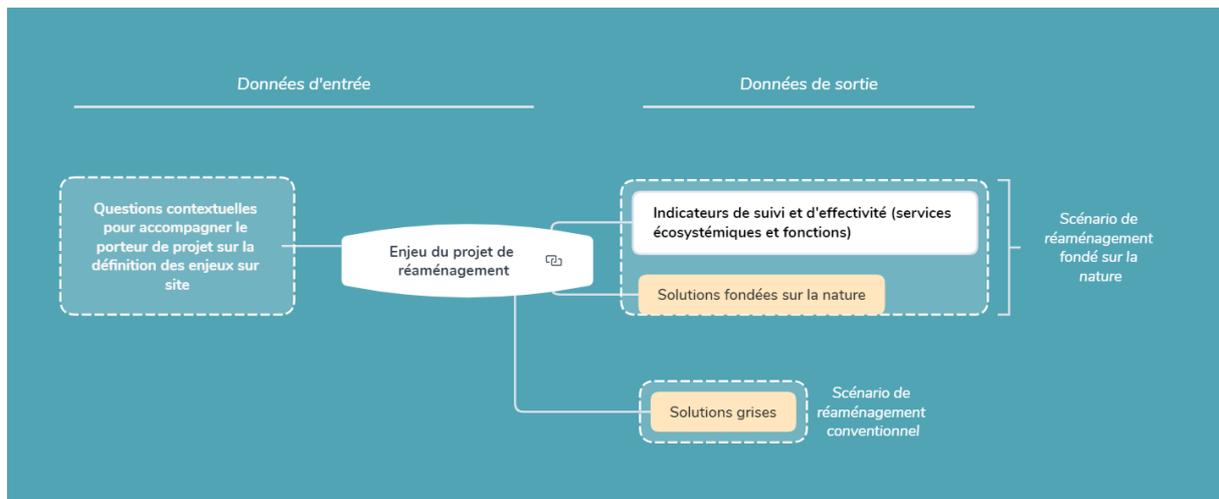


Figure 4. Schéma simplifié de la démarche conceptuelle de l'outil de sélection des indicateurs (RECORD, 2021).

Dans les faits, la mécanique de l'outil se base sur un certain nombre de matrices d'interrelations qui permettent d'associer (Tableaux d'interrelations en Annexe 3) :

- Enjeux et SE ;
- SE et SfN :
- SfN et Habitats naturels finaux ;
- SE et fonctions ;
- SE, fonctions et indicateurs de fonctions;

Ainsi, si l'on reprend la démarche présentée ci-avant : sur la base des enjeux identifiés par le porteur de projet, une liste de SE modifiable est automatiquement proposée. Le porteur de projet peut compléter et modifier cette liste. Selon les SE ciblés, une liste de SfN (de type réhabilitation, gestion et planification) est présentée associée aux indicateurs de SE permettant de suivre l'efficacité de ces solutions. Enfin, selon les SE et fonctions associés, une liste d'indicateurs de fonctions est proposée.

La figure ci-dessous synthétise l'ensemble de la démarche méthodologique (Figure 5). Seul le scénario de réaménagement fondé sur la nature est présenté sur cette figure.

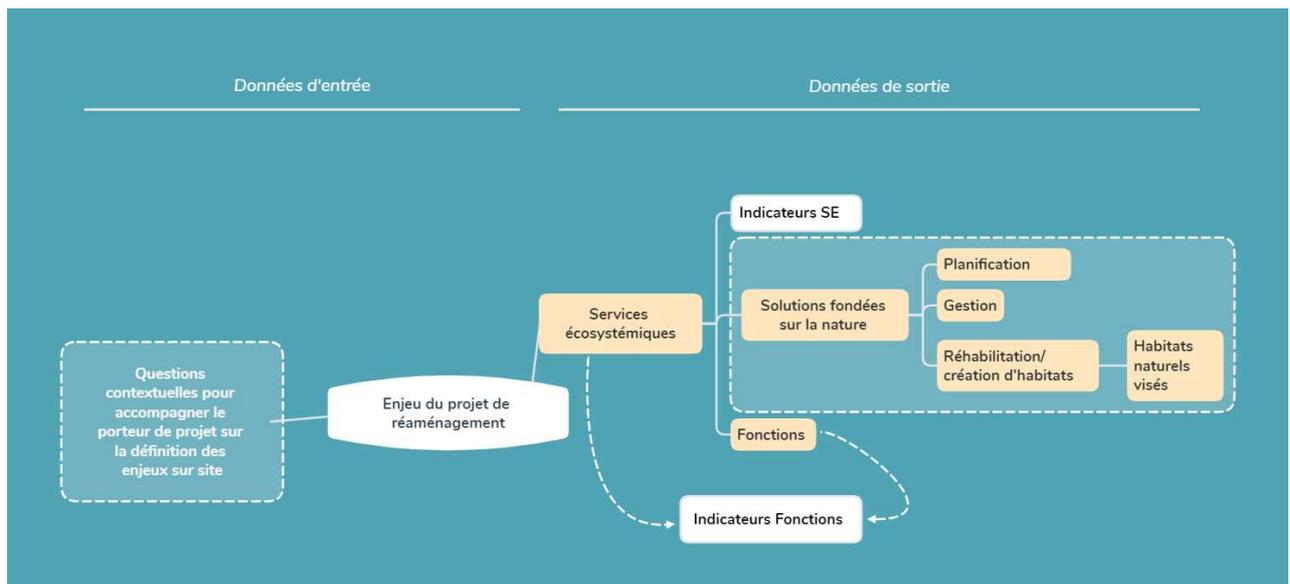


Figure 5. Synthèse de la démarche méthodologique proposée dans le cadre de cette étude. Les traits pleins indiquent un lien direct entre SE les composantes de type « Indicateurs SE », « Solutions fondée sur la nature » et « Fonctions ». Les traits en

pointillés mettent en avant le fait que les indicateurs de fonctions proposés par l'outil dépendent à la fois du SE visé et des fonctions qui lui sont associées (RECORD, 2021).

Définition de l'échelle spatiale

Selon le type d'enjeu ou selon le type de SfN, l'échelle à laquelle est évaluée l'effectivité des mesures diffère. Certaines SfN sont par exemple menées à l'échelle du projet de réaménagement. C'est le cas de la mise en œuvre de stratégies d'aménagement spécifiques telle que la densification ou encore de la mise en place de corridors boisés pour répondre la réglementation du Schéma Régional de Cohérence Ecologique. C'est donc, selon la définition donnée par EFESE, à **l'échelle de l'écosystème urbain élémentaire** qu'il faudra réaliser un suivi (Figure 3).

En revanche, d'autres types de SfN ne peuvent être évalués qu'à l'échelle de l'habitat. Il en est de même pour le suivi de la restauration de certaines fonctions et SE. C'est par exemple le cas d'une action de phytoremédiation ou encore la recréation d'une prairie humide.

Les indicateurs proposés dans cette étude devront donc être renseignés à l'échelle de l'habitat (Figure 3).

Définition de l'échelle temporelle

Afin de vérifier le succès de la réhabilitation écologique, les indicateurs proposés dans le cadre de cette étude doivent être collectés à *minima* avant le démarrage du projet et une fois le projet de réaménagement mis en œuvre et effectif. Il est également possible de collecter ces indicateurs durant toute la mise en œuvre du projet pour s'assurer d'être sur la trajectoire souhaitée de réhabilitation¹⁶.

¹⁶ Pour s'assurer d'être sur une trajectoire souhaitée, il faut néanmoins pouvoir fixer, pour chaque indicateur sélectionné, l'objectif cible qui peut être fixé par rapport à une référence nationale (si existante) ou locale (site de référence local) (Marchand et al. 2021).

3- Présentation des différentes typologies en appui à la démarche proposée

Typologie des enjeux urbains

La démarche méthodologique de l'étude exposée précédemment propose une entrée par les enjeux urbains visés par le projet. Il s'agit donc ici de définir et lister les enjeux rencontrés classiquement dans le cadre d'un projet de réaménagement urbain. Ce travail a été réalisé sur la base des résultats obtenus dans le cadre du projet « Nature4cities ¹⁷ » (voir annexe 1 pour une description du projet).

On distingue ainsi les enjeux urbains selon le type de problématique qu'ils adressent (climatique, environnemental, social, relatif aux ressources) et l'échelle à laquelle ils ont des répercussions (locale, ou en amont, celle de la planification) (Tableau 2). Qu'ils concernent une échelle locale ou de planification « stratégique », ces enjeux sont potentiellement à prendre en compte en contexte de réhabilitation d'habitats d'écosystèmes urbains.

La liste des enjeux pertinents pour l'étude est présentée ci-après.

Tableau 2. Typologie des enjeux urbains retenus dans le cadre de cette étude.

Catégorie	Grand enjeu	Enjeu	Problématique visée par l'enjeu
CLIMAT	Problèmes climatiques	Atténuation du changement climatique	Éliminer ou réduire le risque ou danger à long terme du changement climatique sur la vie humaine, la propriété. Réduire les sources d'émission ou améliorer les puits de carbone (GIEC).
		Adaptation au changement climatique	Limiter les dommages potentiels, tirer profit des opportunités, ou gérer les conséquences du changement climatique (variations climatiques et extrêmes).
ENVIRONNEMENT	Gestion de l'eau et de sa qualité	Gestion des eaux urbaines et de leur qualité	Modifier le cycle de l'eau urbain pour améliorer la recharge des eaux souterraines et limiter les relargages du réseau d'égouts dans les rivières via des actions ciblant la qualité des eaux urbaines.
		Gestion des inondations	Limiter le ruissellement en favorisant l'infiltration, aider au stockage d'eau et réguler les inondations.
	Gestion de la qualité de l'air	Gestion de la qualité de l'air	Améliorer la qualité de l'air en ville et réduire ses possibles effets sur la santé humaine. A l'échelle locale, améliorer la qualité de l'air ou parer à la pollution de l'air provenant d'une source plus importante.
	Gestion de la qualité des sols	Gestion de la qualité des sols	Améliorer la qualité des sols en ville.
	Organisation de l'espace urbain et biodiversité urbaine	Préservation et restauration de la biodiversité dans les écosystèmes urbains	Conserver et régénérer la biodiversité (composition, structure et fonctions) dans les écosystèmes urbains. Gérer durablement les espaces verts urbains. Maintenir et améliorer la continuité des espaces naturels avec le réseau écologique.
RESSOURCES	Efficacité des ressources	Production de ressources (eau, énergie, alimentation)	Assurer efficacement la production d'énergie, l'apport d'eau, produire des biens agricoles et agro-alimentaires.
SOCIAL	Santé publique et bien-être	Amélioration de la qualité de vie	Améliorer la qualité de vie des personnes (santé physique, état psychologique, croyances personnelles, relations sociales et relations à l'environnement). Assurer le bien-être des populations dans un objectif d'équité sociale.
		Garantie de santé des populations	Réduire l'exposition des populations aux événements climatiques, pollutions environnementales nocifs pour la santé humaine ou encore nuisances sonores. Traiter la problématique sanitaire en milieu urbain.

¹⁷ <https://geocluster4nbs.nature4cities-platform.eu/#/nbs>

Typologie des services écosystémiques

Comme mentionné précédemment, les services écosystémiques (SE) se définissent comme « *les services que les populations humaines obtiennent directement ou indirectement des fonctions des écosystèmes* » (Constanza et al. 1997 ; MEA 2005). La gamme de biens et services est large et variée, des biens matériels (médicaments) aux bénéfiques non matériels (lutte contre l'érosion et les inondations, éco-tourisme) voire intrinsèques des écosystèmes (qualité d'exister).

La classification des SE proposée dans le cadre de l'évaluation des écosystèmes du millénaire – *Millenium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005) - est la plus communément admise par la communauté scientifique et les entités gouvernementales pour structurer les évaluations économiques des SE (Brahic et Terreaux 2009; DSS 2010; Reveret 2011).

Elle distingue quatre catégories de services (Figure 6) :

- **Les services d'approvisionnement** : il s'agit des produits obtenus directement des écosystèmes pour l'alimentation (cultures, produits d'élevage, pêcheries, produits aquacoles, aliments sauvages, eau douce), l'énergie combustible (bois de chauffage, céréales pour la production d'éthanol), la fabrication de matériaux (bois d'œuvre, fibres) et la pharmacopée ;
- **Les services culturels** : les services culturels comprennent l'ensemble des bénéfiques récréatifs, esthétiques, existentiels, spirituels, scientifiques, éducationnels et patrimoniaux procurés par les écosystèmes ;
- **Les services de régulation** : ce sont les fonctions de régulation de processus naturels exercées par les écosystèmes qui bénéficient à l'Homme. Ils incluent des services aussi divers que la régulation du climat, le cycle de l'eau, la qualité de l'air, la lutte contre l'érosion, la régulation de certaines maladies, la prévention des risques naturels, la pollinisation, le traitement des déchets organiques et des polluants, etc. ;
- **Les services de support** : ces services ne bénéficient pas directement à l'Homme mais conditionnent le bon fonctionnement des écosystèmes. Ces services peuvent inclure le recyclage des nutriments, la formation des sols, la production primaire de biomasse, etc.

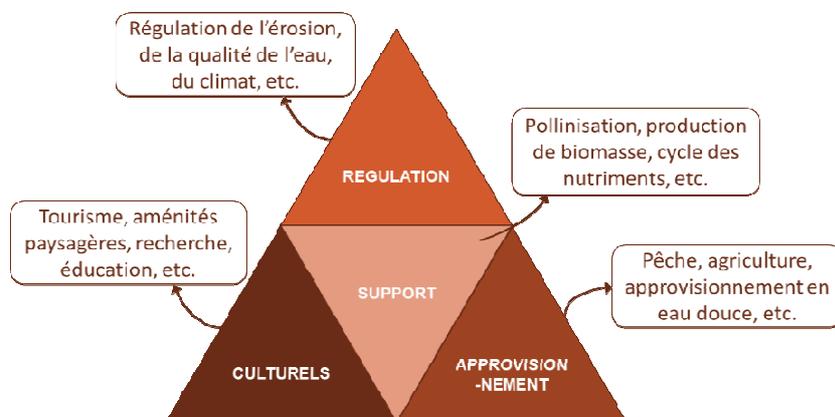


Figure 6. Catégories de services identifiées par le Millenium Ecosystem Assessment et exemples de SE associés (MEA, 2005).

Depuis la publication du Millenium Ecosystem Assessment en 2005, le concept de SE a évolué et sa définition a été précisée. La Stratégie nationale pour la biodiversité (2011-2020) parle notamment de « l'utilisation par l'Homme des fonctions de certains écosystèmes, à travers des usages et une réglementation qui encadrent cette utilisation » (MEDDE, 2012). L'Évaluation Française des Ecosystèmes et Services Ecosystémiques (EFESE), initiée en 2012 par le ministère chargé de l'environnement, a par ailleurs récemment proposé une nouvelle classification des SE (Puydarrieux, Beyou 2017). Contrairement au MEA, cette classification ne retient que trois catégories de biens et services :

- Biens produits par les écosystèmes ;
- Services écosystémiques de régulation ;

- Services écosystémiques culturels.

L'EFESE considère en effet les services de support comme des fonctions écologiques. Par ailleurs, une partie des services culturels (au sens du MEA) ne sont plus assimilés à des SE. En effet, certains d'entre eux reposant sur le non-usage (identification, legs, altruisme, etc.), la notion de SE, associée à un usage, n'est plus appropriée. Ils sont par conséquent regroupés dans une catégorie spécifique intitulée « Patrimoine naturel » (Tableau 3).

Tableau 3. Tableau de correspondance entre les typologies du MEA et de l'EFESE (Puydarrieux et Beyou 2017).

Typologie de l'EFESE	Typologie du MEA (2005)
Fonctions écologiques	Services de support
Biens produits par les écosystèmes	Services d'approvisionnement
Services écosystémiques de régulation	Services de régulation
Services écosystémiques culturels	Services culturels et spirituels
Patrimoine naturel	

La démarche méthodologique proposée dans le cadre de cette étude reprend la typologie des SE proposée par le groupe de travail EFESE pour le volet « milieux urbains » spécifiquement (Tableau 4). Cependant, la notion de patrimoine naturel (biodiversité ordinaire et endémique) proposé dans le cadre général EFESE (non repris dans EFESE écosystème urbain) a été rajoutée dans la typologie retenue. La liste exhaustive des adaptations proposées entre les deux typologies EFESE « générale » et EFESE « écosystèmes urbains » est présentée en Annexe 2.

Tableau 4. Typologie de SE retenus dans le cadre de cette étude (adapté de la typologie du groupe de travail EFESE).

Catégorie de SE	Intitulé des SE
Biens issus des écosystèmes	Produits de l'agriculture
	Produits de la cueillette
	Apiculture
Services de régulation	Régulation du climat global
	Régulation du climat local
	Régulation de la qualité de l'air
	Régulation des nuisances sonores
	Régulation des inondations
	Régulation de la ressource en eau
Services culturels	Régulation de la qualité des sols
	Intérêt récréatif, de loisir
	Aménités paysagères
Patrimoine naturel	Intérêt éducatif, scientifique et pédagogique
	Eléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire

Typologie des fonctions

Les **fonctions écologiques** désignent les processus naturels inhérents à un écosystème tels que la fonction chlorophyllienne ou le cycle de l'eau. Chacune des fonctions d'un écosystème peut être caractérisée par un ou plusieurs processus chimiques, physiques ou biologiques, qui peuvent être générateurs de SE.

On distingue généralement trois grandes catégories de fonctions :

- Les fonctions hydrogéomorphologiques (ex : ralentissement des ruissellements, rétention des sédiments, recharge de nappes, stabilisation des sols etc.) ;
- Les fonctions biogéochimiques (ex : fonctions épuratoires, séquestration du carbone) ;
- Les fonctions biologiques (ex : habitats d'espèces, connectivité).

La démarche méthodologique intègre cette notion de fonctions écologiques, en retenant seulement les fonctions qui peuvent être exprimées par des milieux naturels présents en contexte d'écosystèmes urbains. La liste des fonctions retenues est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 5).

Tableau 5. Typologie des fonctions retenues dans le cadre de cette étude.

Grands types de fonctions	Intitulé des fonctions
Fonctions hydrogéomorphologiques	Rétention, circulation et infiltration de l'eau
	Rétention des sédiments
	Support physique stable
Fonctions biogéochimiques	Stockage, recyclage et transformation des matières organiques (carbone)
	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau, air, sol)
	Rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux
	Contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques (température, hygrométrie)
Fonctions biologiques	Habitats d'espèces
	Connectivité

Présentation des différents types de SfN

Notre étude se propose de reprendre et adapter la typologie d'actions SfN notamment proposée par les projets européens Nature4cities et ThinkNature qui définissent trois grands types de SfN¹⁸. Cette typologie a pour la première fois été proposée par Balian, Eggermont et Le Roux (2014) dans le cadre d'un groupe de travail d'experts reconnu sur les SfN.

Depuis lors, l'UICN a essayé cette classification en trois types dans le cadre de ses différentes participations à des travaux sur les SfN (Biodiversa, Nature4cities, ThinkNature, publications de l'UICN).

Dernièrement, l'UICN a instauré une norme et un standard portant sur les Solutions Fondées sur la Nature ([Global Standard](#), juillet 2020) pour préciser le concept et améliorer son adoption par les acteurs de terrain, ainsi que son intégration au sein des politiques de planification. Le Global Standard est structuré par huit critères dont l'un concerne les avantages nets des SfN vis-à-vis de la biodiversité et les écosystèmes. Ce gain net de biodiversité s'appuie sur la relation entre le degré de complexité écologique ou l'optimisation des services écosystémiques permise par ces SfN, et le degré d'ingénierie appliqué aux écosystèmes par ces SfN. Cette relation détermine donc trois types de SfN : services issus des écosystèmes naturels (type 1), écosystème géré ou restauré (type 2), ou création d'un nouvel écosystème (type 3).

Notre approche reprend cette typologie partagée par les parties prenantes majeures de l'opérationnalisation du concept de SfN au niveau international de l'UICN. Les trois grands types sur lesquels portent le travail sont résumés ci-dessus et détaillés ci-après.

- **SfN de type 1 : Actions en lien avec les stratégies de réaménagement urbain et/ou de conservation des écosystèmes.** Ces solutions nécessitent en général *peu ou pas d'intervention et d'ingénierie* car l'écosystème concerné est aujourd'hui peu anthropisé. Elles sont à l'origine d'une *grande diversité de SE, sans en maximiser la fourniture* et impliquent de nombreuses parties prenantes (gouvernements locaux et nationaux, municipalités, opérateurs privés). Ce sont concrètement **de grandes orientations** qui induisent une utilisation optimisée des écosystèmes naturels pour maintenir ou améliorer les SE rendus par l'écosystème considéré (voir exemple encadré 1). Ces solutions peuvent être assimilées à des actions de planification ou de gestion au sens de l'organisation de l'espace et de son encadrement. Elles sont appliquées en général à l'échelle de l'écosystème urbain. Elles vont intéresser des porteurs de projets de type collectivités territoriales mais elles s'imposent parfois aux opérateurs d'installations classées ou aménageurs (mise en compatibilité ou conformité).
- **SfN de type 2 : Actions de gestion durable des écosystèmes.** Ces solutions nécessitent *une intervention modérée* sur les écosystèmes, répondent à des *SE d'une variété moins importante* que le type 1, et donc de manière plus *ciblée et maximisée à ces SE* que le type 1. Ce sont de grands ensembles de modes de gestion basés sur la nature qui garantissent la durabilité et la multifonctionnalité des écosystèmes. Ces actions ont pour objectif de rendre des SE de meilleure qualité (en termes économiques, sociaux et environnementaux) que ceux qui seraient obtenus avec une intervention dite conventionnelle (voir exemple encadré 2). Ce sont principalement des actions de gestion au sens technique du terme. Elles peuvent être appliquées autant à l'échelle d'un écosystème urbain, d'un écosystème urbain élémentaire ou d'un habitat. Elles peuvent intéresser des porteurs de projets de type collectivités territoriales ou opérateurs d'installations classées ou aménageurs.
- **Type 3 : Actions de création de nouveaux écosystèmes.** Ces solutions nécessitent une intervention avancée sur les écosystèmes et répondent à peu de services écosystémiques ciblés et impactent donc d'autant plus fortement la fourniture de ces SE. Ce sont des solutions matérielles directement implémentables qui s'intègrent dans des programmes de réorganisations territoriales ou sectorielles plus larges. Ces SfN exercent une gestion des écosystèmes par des moyens d'ingénierie fortement intrusifs ou par la création-même d'écosystèmes artificiels dont le

¹⁸ Cette typologie est reconnue par les experts de l'UICN et reprise dans plusieurs travaux de projets européens sur les SfN (Annexe 1).

fonctionnement mime la nature (voir exemple encadré 3). Les solutions de ce type peuvent comprendre des actions de réhabilitation SSP (par ex. de dépollution en ayant recours aux technologies de phytoremédiation) et également des actions de réhabilitation écologique visant la création d'habitats spécifiques (par ex. aménagement d'un jardin d'infiltration ou jardin pluvial). Ces SfN sont donc des actions qui visent à créer ou maintenir des habitats, ou à réhabiliter des milieux naturels et écosystèmes pollués ou dégradés. Elles sont généralement appliquées à l'échelle d'un écosystème urbain élémentaire ou d'un habitat. Elles peuvent autant intéresser des porteurs de projets de type collectivités territoriales ou opérateurs d'installations classées ou aménageurs.

En règle générale, les coûts engagés pour la mise en œuvre de SfN sont d'autant plus importants que le niveau d'ingénierie entrepris sur les écosystèmes est fort. En effet, en mettant en place des SfN de type 2 ou 3, on se concentrera sur un nombre réduit de SE, en général sur une échelle spatiale réduite, où la qualité d'amélioration du SE sera optimisée.

La taille des bulles présentées au schéma ci-après rend compte de ces coûts (Figure 7).

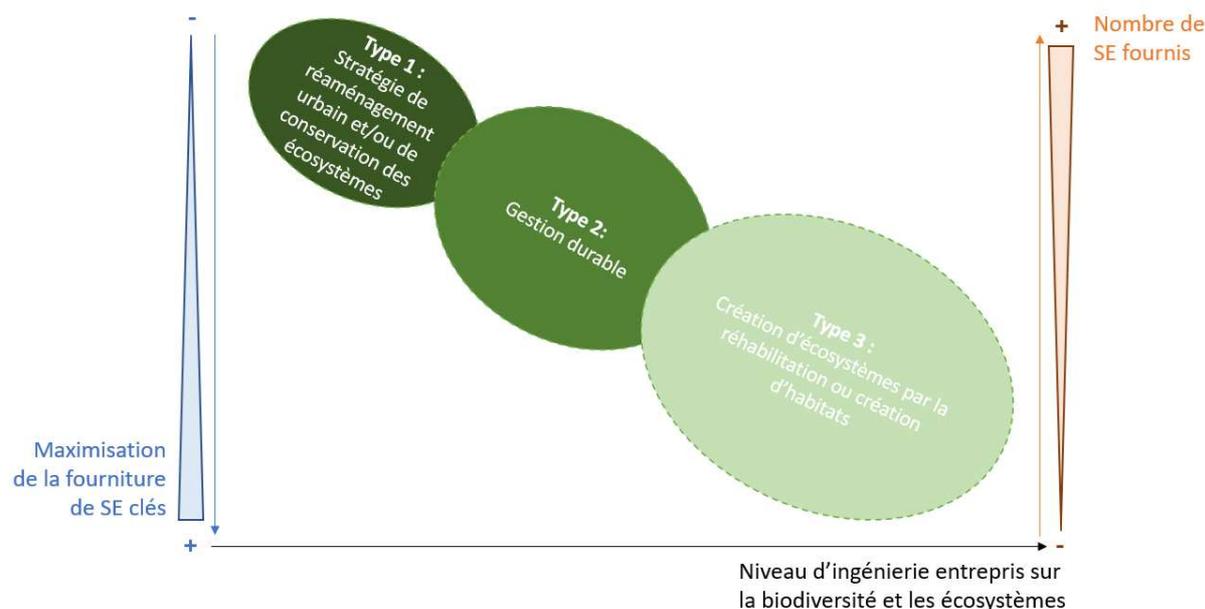


Figure 7. Relation entre la fourniture de SE et le niveau d'ingénierie entrepris. La taille croissante des bulles indique une augmentation des coûts liés à l'ingénierie mise en œuvre (adapté de Somarakis et al. 2015).

Par exemple, l'aménagement d'un jardin d'infiltration est une SfN de type 3 qui permet de réguler les inondations à l'échelle d'un quartier. Une gestion intégrée des espaces verts d'une ville est une SfN de type 2 qui permet d'éviter l'utilisation de phytosanitaires, améliorer l'infiltration de l'eau dans les sols ou encore favoriser le bien-être des populations. Ce type de SfN visera donc plus de SE en nombre, mais contribuera moins intensément à chacun de ces SE.

Description des SfN par type

SfN de type 1 : Stratégies de réaménagement urbain et/ou de conservation des écosystèmes

Une SfN de type 1 vise généralement à optimiser l'utilisation de l'espace pour maximiser les espaces de nature et *in fine* la fourniture de SE. A une échelle territoriale, une démarche de la part de la collectivité de densification du bâti et de désimperméabilisation de la surface restante peut par exemple permettre de recréer des îlots de fraîcheur lors des épisodes de canicule et préserver les continuités écologiques. Cette stratégie de réaménagement suit donc une orientation multifonctionnelle : sa mise en œuvre permet de répondre à des enjeux ciblés mais génère également d'autres impacts (aménités paysagères, activités socio-économiques, etc.) que ne peuvent produire les «infrastructures grises», c'est-à-dire les ouvrages conventionnels créés par l'homme. Ces 5 SfN de type 1 sont identifiées dans le tableau suivant.

Tableau 6. Typologie de SfN de Type 1 retenue dans le cadre de cette étude (adaptée de la plateforme de Nature4Cities pour les projets de réaménagement en écosystèmes urbains).

Type d'action	Sous-type	Type	Exemple de SfN
Type 1	Stratégies de conservation	Gestion	Restrictions ou interdiction d'accès à un espace donné
		Gestion	Restrictions ou interdiction de certains usages et pratiques
	Stratégies d'aménagement urbain	-	Maintien et amélioration de la continuité avec le réseau écologique
		-	Prise en compte de la répartition des espaces verts publics à travers la ville
		-	Outils de planification contrôlant l'expansion urbaine
		-	

Encadré 1. Exemples de la mise en œuvre de SfN de type 1 dans le cadre d'un projet de réaménagement en écosystème urbain

Afin de mieux appréhender la notion de réaménagement urbain et conservation des écosystèmes pour un choix d'un scénario fondé sur la nature, nous prenons l'exemple des outils de planification territoriale contrôlant l'expansion urbaine et opérés par des collectivités. Cette stratégie correspond à l'application d'outils dont le cadre et la nature peuvent différer, mais dont la combinaison amène à la lutte contre l'expansion urbaine.

On distingue deux types d'outils participant à cette même finalité.

D'une part, les outils de planification directs constituent des régulations strictes limitant ou interdisant la construction sur des terrains vierges en ville. Ce sont par exemple :

- Les plans locaux d'urbanisme, à l'échelle locale le plus souvent;
- Les régulations régionales, dont les politiques spécifiques sont mises en place par des entités décisionnelles à l'échelle régionale afin d'assurer la cohérence au sein du territoire;
- Les processus d'autorisation, gérés par les autorités agricole et environnementales attestant du besoin de régulation selon les objectifs de changement d'occupation des sols visés et en concertation avec les professionnels sectoriels compétents.

D'autre part, les outils de planification indirects constituent une approche intégrée de la maîtrise de l'expansion urbaine car ils utilisent des mesures de concentration du développement en dehors des terrains vierges. Ils sont utilisés en accompagnement avec d'autres politiques et mesures de natures diverses. Ce sont par exemple :

- Les programmes d'appui à la reconversion de friches industrielles situées en ville, sur lesquelles des réaménagements peuvent être attractifs pour des investisseurs et réaménageurs;
- La décentralisation par l'attention particulière apportée aux zones proches des gares et à leur connexion avec l'espace construit existant de la ville;
- La décentralisation par le développement compact de la ville avec des infrastructures de transport vers les zones péri-urbaines adaptées aux besoins.

Cette approche de contrôle de l'expansion urbaine a un impact direct sur l'organisation urbaine, car elle permet de rendre l'espace urbanisé plus compact, d'optimiser les transports sur des distances plus courtes, et donc de réduire la densité des émissions de gaz à effet de serre dues au transport routier. La végétation et les sols ainsi préservés qui stockent du carbone participent de surcroît à l'atténuation du changement climatique. La conservation des espaces verts permet également de réduire l'îlot de chaleur urbain et donc d'améliorer la qualité de l'air à l'échelle de la ville. L'organisation optimisée du réseau de transport urbain découlant de ce choix de stratégie induit une diminution du trafic routier, donc de la pollution atmosphérique et sonore, et amène à une diminution du temps de trajet, tout cela concordant pour améliorer la qualité de vie globale et la santé des habitants.

Plus indirectement, ces mesures peuvent participer à la protection des espaces verts ouverts et représenter des vecteurs d'amélioration de la connectivité entre ceux-ci, et donc de la biodiversité et des sols.

Selon les besoins des villes, la durée de mise en place de ces actions varie de 0 à 5 ans en fonction des autres stratégies en cours, des moyens utilisés pour les procédures d'élaboration de

plans (par exemple, la participation du public). Selon l'acceptation sociale et politique des outils utilisés, l'action choisie peut être durable sur le long terme (10-50 ans pour les stratégies qui répondent aux demandes de la population, moins en cas de résistances et désaccords de la part de la société civile à l'échelle locale ou régionale).

SfN de Type 2 : Actions de gestion durable des écosystèmes

Une SfN de type 2 correspond à une action de gestion durable des écosystèmes. On entend par action de gestion durable, le recours à des solutions qui garantissent la durabilité et la multifonctionnalité des écosystèmes. Par exemple une action de gestion durable peut correspondre à la mise en place d'une gestion intégrée des espaces verts, l'utilisation durable de fertilisants etc. Ce type d'action cible certains processus et organismes précis, et a pour but d'améliorer la réponse à une sélection plus précise de SE par rapport à une solution conventionnelle. *In fine*, la gestion entreprise a pour but d'obtenir des écosystèmes durables et multifonctionnels. Ces 8 SfN de type 2 sont identifiées dans le tableau suivant.

Tableau 7. Typologie de SfN de Type 2 (adaptée de la plateforme de Nature4Cities pour les projets de réaménagement en écosystème urbain).

Type d'action	Sous-type		Type de SfN	Exemple de SfN
Type 2	Gestion des espaces verts urbains	Interventions humaines directes	Gestion	Mise en œuvre d'une fertilisation raisonnée et utilisation de fertilisants organiques
			Gestion	Ajout de paillage
			Gestion	Gestion différenciée
			Gestion	Gestion intégrée des adventices et des ravageurs
		Utilisation de la faune	Gestion	Utilisation d'animaux de pâturage
			Gestion	Mise en place d'hôtels à insectes
			Gestion	Mise en place de ruches
	Gestion des déchets	Compost	Gestion	Compost, recyclage des déchets organiques compostables

Encadré 2. Exemple de la mise en œuvre d'une action de SfN de type 2 dans le cadre d'un projet de réaménagement en écosystème urbain

Afin de mieux appréhender la notion d'action de gestion durable, nous avons pris comme exemple la gestion intégrée des adventices. Celle-ci correspond à la combinaison des méthodes de contrôle des adventices d'une manière optimisée et raisonnée. Elle peut inclure la lutte biologique, le désherbage mécanique et chimique, le pâturage ou encore l'application d'herbicides. L'objectif de ce mode d'action appliqué à un site pollué est de maintenir la population d'adventices à un niveau acceptable d'un point de vue social, sanitaire et économique, non pas de l'éliminer totalement. Une préconisation importante est d'associer ce type de gestion à un plan de communication pour s'assurer d'une meilleure acceptation du maintien des "mauvaises herbes" de moindre gêne et d'une mise en garde au sujet des espèces invasives à éradiquer nécessairement. Afin de parvenir à ses fins, ce mode de gestion intégrée favorise le fonctionnement écologique naturel des espaces verts et minimise l'utilisation des herbicides. C'est cet usage raisonné, mesuré et suivi par des indicateurs spécifiques et ayant vocation à durer dans le temps qui permet de qualifier cette stratégie de solution fondée sur la nature.

Il existe plusieurs méthodes de contrôle des adventices consciencieuses dont nous donnons ci-dessous quelques exemples.

La lutte prophylactique est une technique de gestion préventive à long terme qui consiste en la combinaison d'un ensemble de mesures de prévention additives et à effets partiels. Ces mesures ont pour but de limiter l'expansion de plantes invasives indésirables au-delà de la parcelle.

Le recours à un traitement constitue une approche curative permettant le maintien des adventices sous un seuil de tolérance défini grâce à la mesure et au suivi d'indicateurs adaptés (surface de couverture du sol par l'espèce invasive par exemple). Plusieurs méthodes à associer existent, telles que :

- la lutte biologique faisant intervenir des objets naturels tels que les plantes, animaux, produits minéraux, ou encore les micro-organismes.
- le pâturage d'animaux qui peut être utilisé comme une méthode de désherbage permanent ou bien en réponse à un besoin ponctuel de contrôle d'espèces invasives.
- l'usage de matériel de désherbage mécanique innovant faisant appel au travail manuel humain.
- le contrôle conventionnel par l'application d'herbicides chimiques qui doit être un choix de dernier recours et ne doit pas constituer une solution à part entière pour entrer dans le cadre de la gestion intégrée.

Ces actions ont un impact direct sur l'écosystème urbain dans la mesure où elles permettent de maintenir ou d'améliorer la qualité de l'espace vert considéré et de limiter le relargage de produits chimiques dans l'environnement qui serait engendré dans un scénario alternatif non basé sur la nature. De manière plus indirecte, la renonciation à l'usage d'herbicides de synthèse évite leur production et donc la consommation de ressources fossiles et les émissions de gaz à effet de serre qui en découlent. La présence et le maintien de plantes de manière raisonnée contribuent également à enrichir la biodiversité urbaine (à la fois floristique et faunistique) et à entretenir la qualité structurelle et biogéochimique des sols.

De fait, le choix de cette orientation permet de réguler la qualité des sols, d'assurer la conservation de la biodiversité urbaine, mais aussi de garantir un environnement sain pour les habitants de la ville.

Le temps nécessaire à l'effectivité de cette action de gestion intégrée dépend de l'état initial de l'habitat urbain, des techniques choisies pour procéder à leur restauration, ainsi que de leur combinaison. Son succès est conditionné par l'assurance d'un suivi et d'une maintenance pour assurer que la croissance des adventices n'échappe pas au porteur de projet.

Une solution grise alternative à la gestion intégrée des adventices pourrait par exemple consister en l'usage du contrôle par produits de l'industrie chimique (herbicides) seuls, sans combinaison à une solution basée sur l'utilisation de techniques naturelles.

Une réflexion sur les coûts de ces actions permet d'appréhender les aspects économiques de l'action. D'après l'estimation proposée par Nature4cities, certaines approches comme la prophylaxie qui consiste à limiter la population d'adventices sous un seuil économique et sanitaire acceptable nécessite peu d'intervention et est donc peu onéreux. Pour les habitats urbains considérés, le temps de travail nécessaire à l'intervention est internalisé par les jardiniers municipaux et demande simplement l'acquisition de matériel adapté. Un cas d'étude a été documenté pour la ville de Laxou en France ayant déployé une stratégie de gestion intégrée contre l'espèce invasive *Fallopia japonica*. Le travail de revue de littérature, de retours d'expériences, de mise en place d'une phase d'expérimentation, d'implémentation de contrôle non chimique par le pâturage de chèvre, de campagne de communication à destination du public et d'information aux autres municipalités et professionnels intéressés s'est tenu pendant 6 ans et a été chiffré à 63 640€.

SfN de Type 3: Actions de création d'écosystème par la réhabilitation ou la création d'habitats

Une SfN de type 3 peut concerner des actions de création d'écosystèmes ou des solutions d'ingénierie écologique remplaçant des techniques plus classiques. Ce sont des actions reposant en partie sur le vivant mais s'intégrant dans des programmes de développement, de réorganisations territoriales ou sectorielles plus larges. C'est par exemple le cas des techniques de phytoremédiation ou de la bioremédiation. En dehors de la technique de la phytostabilisation, elles permettent d'abattre la concentration en polluants d'un site par le biais de l'utilisation de végétaux ou microorganismes. Ces technologies peuvent s'avérer dans certaines situations particulièrement efficaces et limiter les coûts liés à l'excavation des sols et l'apport de terres non polluées.

26 catégories d'actions de type 3 ont été retenues dans le cadre de l'étude et concernent la création d'habitats et sont reconnues comme pouvant contribuer à une réhabilitation écologique, la remédiation et

la réhabilitation en milieu urbain. Nous les avons identifiées en les classant dans le tableau suivant. Selon leur nature, elles peuvent correspondre à des actions de création d'écosystèmes par des techniques d'ingénierie de réhabilitation ou par la création d'habitats (Tableau 8).

Tableau 8. Typologie de SFN de type 3 (création d'habitats/réhabilitation) adaptée de la plateforme de Nature4Cities pour des projets de réaménagement en milieu urbain.

Type d'action	Sous-type		Type de SfN	Exemples de SfN	
Type 3	Hors sol	Parcs et jardins	Création d'habitat	Création d'un parc public, jardin botanique (place, square, terrain de sport, aire de jeu)	
			Création d'habitat	Création d'une haie et clôture végétale	
			Création d'habitat	Création de jardins privatifs	
			Création d'habitat	Aménagement de champs de fleurs	
			Création d'habitat	Création d'une pelouse, prairie	
			Création d'habitat	Plantation d'un arbre isolé	
			Création d'habitat	Création d'un boisement	
		Structure du réseau urbain	Création d'habitat	Création d'une voie verte autour des voiries communes (tram, routes, etc.)	
			Création d'habitat	Création d'espaces verts d'accompagnement des infrastructures	
			Création d'habitat	Plantation d'arbres le long des voiries communes	
		Structure caractérisée par la production alimentaire et de ressources	Création d'habitat	Aménagement d'une ferme urbaine (jardin potager, verger, vignes)	
		Restauration écologique	Réhabilitation	Gestion des sols pollués par phytoremediation/phytostabilisation, bioremédiation, mycoremédiation	
		Choix des espèces de plantes	Réhabilitation	Utilisation de la végétation pré-existante	
			Réhabilitation	Introduction d'espèces indigènes et diversification de la végétation	
		Système de maîtrise de l'érosion	Réhabilitation	Système d'ingénierie de revégétalisation pour le contrôle de l'érosion par la pente	
			Réhabilitation	Actions d'amélioration de la qualité du sol	
			Réhabilitation	Actions de renforcement et de structuration du sol	
		Eau	Habitats aquatiques naturels et semi-naturels et réseau hydrographique	Réhabilitation	Reprofilage des berges par techniques végétales
				Création d'habitat	Mise en place de structures végétalisées pour le contrôle de l'érosion des berges
	Zones humides artificielles et structures construites pour la gestion de l'eau		Création d'habitat	Création de zones humides artificielles pour favoriser l'épuration des eaux (phytoépuration)	
			Création d'habitat	Aménagement d'un jardin d'infiltration ou jardin pluvial	
			Création d'habitat	Aménagement d'un espace désimperméabilisé (et systèmes associés, comme le dallage perméable)	
			Création d'habitat	Réalisation d'un champ d'expansion des crues	
Sur les structures construites	Toits végétalisés		Création d'habitat	Aménagement d'un toit végétalisé (extensif, intensif, semi-intensif)	
		Création d'habitat	Création d'un système de mur végétalisé		

Type d'action	Sous-type	Type de SfN	Exemples de SfN
		Création d'habitat	Création d'une pergola végétalisée

Encadré 3. Exemple de la mise en œuvre d'une action de SfN de type 3 dans le cadre d'un projet de réaménagement en écosystème urbain.

Un exemple pour illustrer notre propos concerne la SfN dédiée à la gestion d'une pollution résiduelle par phytoremédiation. La phytoremédiation comprend l'ensemble des techniques qui utilisent des espèces végétales pour selon le cas, extraire, contenir ou dégrader des polluants inorganiques ou organiques. Dans un écosystème urbain, cette solution peut être mise en œuvre sur des anciens sites industriels, ou des parcelles à proximité de sites industriels en activité ou ayant cessé leur activité. Plus précisément on peut avoir recours aux techniques de phytostabilisation (séquestration des métaux et métalloïdes dans la rhizosphère), phytoextraction (collecte et stockage dans la biomasse avant exportation en filière dédiée), et rhizodégradation (dégradation des contaminants organiques dans la rhizosphère). Il est à noter que la phytostabilisation est une technique *in situ* de stabilisation. Elle n'est pas considérée comme une technique de dépollution mais comme un mode de gestion destiné à stabiliser les polluants présents dans le sol.

Lorsque mises en œuvre, ces phytotechnologies peuvent avoir un impact direct sur l'écosystème urbain puisqu'elles peuvent contribuer à extraire, contenir ou dégrader des polluants présents dans le sol. Elles permettent donc de favoriser des SE de régulation de la qualité de l'eau et des sols de manière ciblée, en maximisant l'intensité de leur réponse à ces problématiques de pollution. Ce type de solution peut être comparé au scénario d'aménagement conventionnel qui consisterait par exemple à excaver le sol pollué et le traiter hors site, ou encore à confiner le sol pollué dans un objectif d'acceptabilité des risques en vue des *usages*¹⁹ futurs.

En termes de coûts, les techniques conventionnelles de dépollution *in situ* sont estimées à une fourchette de 15 à 50 €/tonne (aération), 40 à 120 €/tonne (oxydation-réduction), 15 à 50 €/tonne (par bio-aération). Les coûts de la phytoremédiation sont de l'ordre de 2 à 12 €/m² par la technique de phytostabilisation et 18 à 40 €/m² par la technique de phytoextraction (Ademe, Ineris 2012). Le choix d'une de ces techniques et donc la variation de coût dépend des conditions du site, des polluants présents sur le site, des plantes utilisées et donc du temps nécessaire à l'élimination de la pollution.

¹⁹ Au sens SSP, voir glossaire.

Synthèse des typologies existantes et typologie retenue

Différentes typologies d'habitats ont d'ores et déjà été proposées dans la littérature, incluant la nomenclature Corine Land Cover, la typologie Corine Biotope, la typologie Européenne Eunis, CESBIO, COPERNICUS, la typologie des espaces verts de l'AIVF (1995) ou encore celle proposée par Richard et al. (2005). Néanmoins ces différentes typologies ne s'avèrent pas assez résolutive pour permettre de faire le lien avec les fonctions et SE.

L'exercice EFESE a proposé une typologie adaptée à l'évaluation des SE et qui résulte d'une synthèse de ces différentes typologies (CGDD 2018b). Comparativement à la typologie de l'AIVF, elle présente l'intérêt de considérer les milieux aquatiques et humides, deux types de milieux source de SE importants pour la société.

Cette typologie présente différents niveaux dont le premier niveau se décline en 5 catégories :

- Espaces à surface majoritairement végétalisée
- Eaux de surface et zones littorales
- Zones productives, culture ou élevage
- Linéaires végétalisés / arbres isolés
- Surfaces fortement artificialisées ou imperméabilisées ou hors-sol

C'est cette dernière typologie qui est retenue dans cette étude (Tableau 9).

Tableau 9. Typologie des habitats urbains retenus dans le cadre de cette étude (adapté selon EFESE (CGDD 2018b)).

Niveau 1	Niveau 2		Niveau 3	
Espaces à surface majoritairement végétalisée	1.1	Espaces boisés	1.1.1	Espaces boisés composés majoritairement de feuillus
			1.1.2	Espaces boisés composés majoritairement de conifères
			1.1.3	Espaces boisés des zones riveraines ou espaces boisés marécageux
	1.2	Parcs, squares et aires de jeu (jardins d'agrément, jardins botaniques et horticoles)	1.2.1	Grands parcs urbains
			1.2.2	Parcs publics, squares et aires de jeux
			1.2.3	jardins botaniques, jardins horticoles
	1.3	Espaces verts d'accompagnement des infrastructures (bâtiments publics, commerciaux, industriels, habitations, monuments historiques etc.)	-	-
	1.4	Installations sportives tels que terrain de sport, golf, hippodrome etc.	-	-
	1.5	Zones d'habitats temporaires (campings, aire d'installation des gens du voyage etc.)	-	-
	1.6	<i>Terrains vacants, terrains vagues, friches agricoles ou industrielles, jachères abandonnées</i>	-	-
1.7	Jardins privés à vocation ornementale	-	-	
1.8	Cimetières et jardins du souvenir	-	-	
1.9	Autres espaces correspondant à des habitats plus naturels	1.9.1	Affleurement rocheux	
		1.9.2	Landes et fourrés	
		1.9.3	Pelouses et prairies sèches	
		1.9.4	Prairies mésophiles et humides	
		1.9.5	Prairies améliorées fortement fertilisées	
		1.9.6	Groupements herbacés et héliophytes de bord de cours d'eau	
		1.9.7	Autre (à préciser)	
Eaux de surface	2.1	Eaux courantes : cours	2.1.1	Cours d'eau non permanents

Niveau 1	Niveau 2		Niveau 3	
et zones littorales		d'eau, fleuves, canaux	2.1.2	Cours d'eau permanents, soumis aux entrées maritimes
			2.1.3	Fleuve et rivières
			2.1.4	Canaux
	2.2	Eaux stagnantes	2.2.1	Plans d'eau artificialisés
			2.2.2	Autres eaux stagnantes
	2.3	Éléments artificiels comme des points d'eau, des fontaines, cascades, jets d'eau, miroirs d'eau etc.	-	-
	2.4	Système de gestion et de traitement des eaux pluviales et résiduelles urbaines	2.4.1	Noues
			2.4.2	Bassins de stockage temporaire des eaux pluviales
			2.4.3	Lagunes (dont lagunes industrielles)
			2.4.4	Stations d'épuration
	2.5	Littoral et habitats côtiers	2.5.1	Dunes côtières et rivages sableux
			2.5.2	Galets côtiers
2.5.3			Falaises, corniches et rivages rocheux, incluant le supra-littoral	
2.5.4			Autres habitats du littoral	
Zones productives, culture ou élevage	3.1	Jardins collectifs (familiaux, partagés, insertion, pédagogique)	-	-
	3.2	Maraichage, serre, horticulture, verger, pépinière	3.2.1	En pleine terre
			3.2.2	En hors sol (sauf potager sur toiture)
	3.3	Autres cultures	-	-
3.4	Élevage (dont apiculture)	3.4.1	Apiculture	
		3.4.2	Autre élevage (ex. poulailler)	
Linéaires végétalisés / arbres isolés	4.1	Alignements d'arbres, haies arbustives en bord de cours d'eau (milieux rivulaires)	4.1.1	Majoritairement composé d'espèces indigènes
			4.1.2	Majoritairement composé d'espèces non indigènes
	4.2	Alignements d'arbres, haies arbustives (hors milieux rivulaires)	4.2.1	Majoritairement composé d'espèces indigènes
			4.2.2	Majoritairement composé d'espèces non indigènes
	4.3	Bandes enherbées, bordure des infrastructures linéaires routières et ferroviaires, vélo route, tramway	-	-
	4.4	Arbres d'alignement sur les voiries communes groupés ou non	4.4.1	Espèces indigènes
			4.4.2	Espèces non-indigènes
	Surfaces fortement artificialisées ou imperméabilisées ou hors-sol	5.1	Habitations collectives ou individuelles	5.1.1
5.2		Autres bâtiments publics ou privés : administration, commerces, industries, entrepôts, monuments historiques etc.	5.2.1	Avec toiture et/ou murs végétalisés (non productifs) et/ou aménagement ponctuel en faveur de la biodiversité
			5.2.2	Constructions et bâtiments anciens (ex. châteaux, églises, fortifications) servant d'habitat pour des espèces faunistiques et floristiques (ex. zones d'habitats pour des chiroptères etc.)

Adaptation de la typologie retenue aux objectifs de l'étude

Le suivi de l'effectivité des actions mises en œuvre par un porteur de projet peut se faire à différentes échelles de l'écosystème urbain élémentaire ou encore à l'échelle de l'habitat. Dans le cadre de cette étude, il a été nécessaire de recourir à une sélection d'habitats espérés à l'issue d'un projet de réaménagement.

Théoriquement tous les autres types d'habitats peuvent être visés dans un projet de réhabilitation écologique. Pour certaines SfN ou certains SE qui seraient visés ou recherchés par un porteur de projet, le premier niveau de résolution voire le second de la typologie retenue (voir niveau 1 et 2 dans Tableau 9) apparaissent suffisants pour proposer et calculer les indicateurs associés. En revanche, pour d'autres SfN ou pour les fonctions et certains SE qui seraient visés ou recherchés, les habitats du deuxième ou du troisième niveau sont les plus pertinents car ils tiennent compte par exemple de la composition en espèces indigènes / exogènes ou encore du degré d'hygrophilie des habitats ; des caractéristiques de l'habitat importantes à prendre en compte pour évaluer, par exemple, les fonctions ou le SE de régulation de la ressource en eau.

Ainsi selon les SE visés, la typologie des habitats au niveau 1 est suffisante. En revanche pour d'autre, il est nécessaire de faire appel à la typologie 2 ou 3.

La typologie retenue est présentée dans le tableau suivant (Tableau 10).

Tableau 10. Typologie des habitats potentiellement visés par un projet de réhabilitation écologique en milieu urbain.

Niveau 1	Code	Niveau 2 ou 3
Espaces à surface majoritairement végétalisée	1.1.1	Espaces boisés composés majoritairement de feuillus
	1.1.2	Espaces boisés composés majoritairement de conifères
	1.1.3	Espaces boisés des zones riveraines ou espaces boisés marécageux
	1.2	Parcs, squares et aires de jeu (jardins d'agrément, jardins botaniques et horticoles)
	1.3	Espaces verts d'accompagnement des infrastructures (bâtiments publics, commerciaux, industriels, habitations, monuments historiques etc.)
	1.9.3	Pelouses et prairies sèches
	1.9.4	Prairies mésophiles et humides
	1.9.5	Prairies améliorées fortement fertilisées
	1.9.6	Groupements herbacés et héliophytes de bord de cours d'eau
Eaux de surface et zones littorales	2.4	Système de gestion et de traitement des eaux pluviales et résiduelles urbaines
Zones productives, culture ou élevage	3.1	Jardins collectifs (familiaux, partagés, insertion, pédagogique)
Linéaires végétalisés / arbres isolés	4.1	Alignements d'arbres, haies arbustives en bord de cours d'eau (milieux rivulaires)
	4.2	Alignements d'arbres, haies arbustives (hors milieux rivulaires)
	4.3	Bandes enherbées, bordure des infrastructures linéaires routières et ferroviaires, vélo route, tramway
	4.4	Arbres d'alignement sur les voiries communes groupés ou non
Surfaces fortement artificialisées ou imperméabilisées ou hors-sol	5.1.1	Habitations collectives ou individuelles avec toiture et/ou murs végétalisés (non productifs) et/ou aménagement ponctuel en faveur de la biodiversité

A noter que les habitats dégradés (ou pollués) typiquement présents dans les écosystèmes urbains et qui font l'objet d'une réhabilitation SSP et écologique concernent en général les catégories 1.6 et 5.2 à savoir (Tableau 11) :

- 1.6 : Terrains vacants, terrains vagues, friches agricoles ou industrielles, jachères abandonnées
- 5.2 : Autres bâtiments publics ou privés : administration, commerces, industries, entrepôts, monuments historiques etc.

Tableau 11. Typologie des habitats initiaux (avant réhabilitation).

Niveau 1	Code	Niveau 2 ou 3
Espaces à surface majoritairement végétalisée	1.6	Terrains vacants, terrains vagues, friches agricoles ou industrielles, jachères abandonnées
Surfaces fortement artificialisées ou imperméabilisées ou hors-sol	5.2	Autres bâtiments publics ou privés : administration, commerces, industries, entrepôts, monuments historiques etc.

4- Présentation des indicateurs

L'objectif de cette étude est d'aboutir à une liste d'indicateurs qui puisse être intégrée dans l'outil afin de permettre à un porteur de projet en fonction du projet de réaménagement d'avoir une sélection d'indicateurs pertinents pour le suivi de la réhabilitation écologique et d'attester du succès de son aménagement au regard des enjeux initialement identifiés.

Ces indicateurs sont mesurés avant la mise en œuvre de la réhabilitation, durant toute la durée de l'aménagement pour vérifier que la trajectoire visée est la bonne et en fin de projet.

Indicateurs de fonctions

Les indicateurs de fonctions ont été choisis sur la base des indicateurs proposés dans le cadre de l'étude RECORD1 (Baptist et al. 2018) lorsqu'ils étaient mesurables et pertinents pour une application en écosystème urbain. Des indicateurs supplémentaires ont été sélectionnés sur la base de la littérature disponible.

Un indicateur, ou bioindicateur lorsque le paramètre mesuré est lié à la diversité ou à la fonctionnalité d'un organisme ou ensemble d'organismes, peut consister en une seule mesure reflétant directement une fonction du milieu (par exemple la quantité d'eau infiltrée dans le sol reflète directement la capacité d'infiltration du sol), de plusieurs paramètres qui renseignent sur une dynamique tel que le ratio C/N qui renseigne sur la minéralisation du carbone, ou bien une association de plusieurs paramètres dont l'association a permis le développement d'indices de la « qualité d'un sol ». Ces dernières n'ont pas été considérés dans cet étude.

Dans le contexte qui nous intéresse, les indicateurs des fonctions écologiques retenus doivent permettre soit d'établir un diagnostic initial du milieu, soit de contrôler la bonne restauration des fonctionnalités au cours d'une réhabilitation écologique, soit de valider la réussite et donc la pérennité d'une réhabilitation « verte ». Les indicateurs doivent répondre à un nombre de critères de faisabilité, de coût, de facilité de mise en œuvre leur attribuant une opérationnalité suffisante pour envisager leur application courante, mais également pouvoir être interprétés soit au regard d'un référentiel établi, soit en comparaison avec un état optimal visé par la réhabilitation.

Dans le contexte qui nous intéresse, les indicateurs des fonctions écologiques retenus doivent permettre soit :

- d'établir un diagnostic initial du milieu,
- de contrôler la bonne restauration des fonctionnalités au cours d'une réhabilitation écologique,
- de valider la réussite et donc la pérennité d'une réhabilitation « verte ».

Les indicateurs doivent répondre à un nombre de critères de faisabilité, de coût, de facilité de mise en œuvre leur attribuant une opérationnalité suffisante pour envisager leur application courante, mais également pouvoir être interprétés soit au regard d'un référentiel établi, soit en comparaison avec un état optimal (par exemple par rapport à un site de référence local) visé par la réhabilitation.

Une attention particulière a été appliquée pour ne retenir que les indicateurs dont la mesure associée témoigne directement de la fonction visée. Dans un second temps il pourra être envisagé d'approfondir le diagnostic du milieu pour identifier les causes d'un mauvais fonctionnement du sol (par exemple : pour le fonctionnement hydrique du sol, il est possible de proposer de mesurer la réserve utile en eau pour les plantes ou le taux d'infiltration). Si celui-ci est convenable au vu du référentiel/optimum attendu, on peut poursuivre, sinon il est nécessaire d'identifier les causes de ce mauvais fonctionnement qui peuvent être liées à d'autres paramètres du sol tels que la texture, la teneur en matière organique etc. qu'il faudra identifier afin d'y remédier. Le lien entre chaque indicateur et la fonction associée est indiqué dans le tableau suivant. Une note spécifique au sujet des approches innovantes de suivi des communautés microbiennes avec des approches moléculaires est proposée en annexe 4.

Pour chaque indicateur est indiqué :

- La fonction associée ;
- Le SE associé ;

- La question à laquelle il permet de répondre ;
- L'intitulé de l'indicateur ;
- Les méthodes de mesure ;
- Le complément ;
- L'existence ou non d'une gamme connue de variation de la valeur de l'indicateur ;
- La gamme de variation observée (si connue) ;
- Le degré de maturité selon trois catégories :
 - Catégorie 1 : opérationnel, actuellement proposé par les bureaux d'études et laboratoires d'analyse privés ;
 - Catégorie 2 : quasi opérationnel, en cours de transfert vers la sphère opérationnelle ;
 - Catégorie 3 : encore au stade de développement, non disponibles pour les opérateurs de la restauration dans un cadre classique ;
- Une estimation du coût : faible (< 100 euros) : €, modéré (< 1000 euros) : €, élevé (> 1000 euros) : €€€ ;
- Les sources disponibles.

Focus sur les indicateurs du compartiment souterrain

Le sol est issu de l'altération des couches superficielles de la roche mère auquel s'incorpore la matière organique. La capacité d'un sol à réaliser ses fonctions est intimement lié à ses propriétés physico-chimiques et biologiques (Tableau 12). On peut distinguer d'une part les propriétés inhérentes aux sols, c'est-à-dire définies par la nature de la roche mère, le climat ou la topographie, telles que la texture, la minéralogie ou la profondeur et qui sont utilisés pour qualifier différents usages du sol (Seybold et al 1999). Ils sont constants à échelle de temps humaine (Robinson et al 2009). D'autre part, on peut qualifier de paramètres dynamiques les propriétés du sol tels que la teneur en matière organique, la disponibilité des nutriments, les activités biologiques, la structure des communautés d'organismes ou encore la teneur en polluants plus ou moins disponibles (Obriot et al 2016). Ces paramètres biotiques ou abiotiques permettent d'évaluer l'impact des plans de gestion des sols et peuvent être rapidement modifiés par les activités humaines.

Tableau 12. Liste des propriétés des sols reliés aux SE ou fonctions de support et de régulation (Extrait d'Adhikari et al, 2016).

Paramètres du sol/services écosystémiques	Services de régulation						Services support			
	Régulation du climat et des gaz à effet de serre	Régulation de l'eau	Erosion et contrôle des inondations	Pollinisation et dispersion des semences	Contrôle biologique (maladies et invasives)	Séquestration du carbone	purification de l'eau	altération, formation des sols	Cycles biogéochimiques	Support pour la diversité
Teneur en carbone organique du sol	x	x	x		x	x		x	x	x
Texture (% sable, limons et argiles)	x	x	x			x	x	x	x	
pH					x		x	x	x	
Profondeur de l'horizon d'altération		x	x				x			
Densité	x									
Réserve d'eau utile	x	x	x				x			
CEC (Capacité d'échange cationique)							x		x	
Conductivité électrique									x	
Porosité et perméabilité à l'air	x									
Conductivité hydraulique et infiltration de l'eau	x	x	x				x			
Composante biologique des sols	x			x	x	x	x	x	x	x
Structure et agrégation du sol	x	x	x					x		x
Température du sol					x			x	x	
Minéralogie des argiles								x	x	
Nature du sous-sol		x	x							

L'évaluation de la qualité d'un sol dépend donc d'un ensemble de propriétés qui peuvent être évaluées par la mesure de paramètres (données physico-chimiques, biologiques) dont certains peuvent directement faire l'objet « d'indicateurs » d'une fonction donnée ou être intégré dans le calcul d'un « indice de qualité » (indices multiparamétriques).

Le Tableau 13 liste un ensemble d'indicateurs qui permettent de témoigner de manière directe des différentes fonctions exprimées par le sol.

Focus sur les indicateurs du compartiment aérien

A l'image du compartiment souterrain, le compartiment aérien (végétation et macrofaune) peut faire l'objet de différents relevés et indicateurs afin d'évaluer si la trajectoire observée répond aux objectifs initiaux de réhabilitation (par rapport par exemple à une référence locale) et si les fonctions visées sont effectivement restaurées.

Les indicateurs proposés dans le cadre de cette étude se basent sur des suivis reproductibles des espèces et des communautés végétales et animales présentes par placette échantillon (Tableau 13). Certains indicateurs dans leur calibration renseignent sur les conditions édaphiques du site (par exemple le degré d'engorgement d'un sol de zones humides), d'autres permettent de vérifier si la composition végétale ou animale observée est indicatrice d'un milieu ou d'une trajectoire écologique qui correspond aux objectifs visés (restauration d'une fonction donnée). Ces derniers se basent en général sur une comparaison avec des milieux référentiels ou sur un assemblage structurel (par exemple, recouvrement en graminée) ou qualitatif (cortèges de couleurs de papillon révélateur d'un paramètre donné comme par exemple le degré d'eutrophisation, l'état d'une pelouse ou d'une prairie, la qualité de la gestion par fauche ou pâturage etc.).

Remarque

Nous n'avons pas retenu les indicateurs dont la finalité principale est d'établir un indice de qualité biologique ou écologique (IQE de Delzons et al., 2013) basé essentiellement sur la diversité des espèces, des cortèges et des habitats (macro et micro), la patrimonialité et la fonctionnalité. Cet indice est en effet destiné à l'évaluation et au suivi de milieux terrestres sur des sites localisés en France métropolitaine (Corse comprise), d'une surface allant de 10 à 100 ha, surface généralement bien plus importante que celle concernée par les projets de réaménagement ciblés dans le cadre de cette étude.

Tableau 13. Indicateurs permettant le suivi des fonctions. Le niveau d'opérationnalité est évalué sur une échelle de 1 à 3 (Catégorie 1 : opérationnel, actuellement proposé par les bureaux d'études et laboratoires d'analyse privés ; Catégorie 2 : quasi opérationnel actuellement proposé par les bureaux d'études et laboratoires d'analyse privés ; Catégorie 3 : encore au stade de développement, non disponibles pour les opérateurs de la restauration dans un cadre classique). Le tableau dans sa forme exhaustive (incluant les sources notamment) est présenté dans l'outil Excel accompagnement ce rapport. La taille du tableau présenté ici a été réduite pour une question de lisibilité.

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
Connectivité	Éléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire	Evaluer le niveau de fragmentation des habitats naturels	Fragmentation des habitats naturels (indicateur « Rareté de la fragmentation »)	Evaluation du linéaire de lisière qui concoure à fragmenter le site et empêcher le déplacement des espèces	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1	1	€
		Evaluer le niveau de connexion au paysage environnant	Connexion au paysage environnant (indicateur « Similarité avec le paysage »)	Indicateur visant à vérifier le niveau de similarité des habitats du site avec ceux présents à proximité afin de maximiser la connectivité.	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1	1	€
Contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques (température, hygrométrie)	Régulation du climat local	Connaître la contribution d'un habitat ou plusieurs habitats à abaisser la température en ville (îlot de fraîcheur)	Indice de verdissement	Estimation de la superficie végétalisée par rapport à la surface totale du site (par exemple calcul du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) par imagerie satellitale ou cartographie des habitats Estimation de la superficie d'espaces verts par habitant	Non connu	-	1	€
			Densité d'arbres	Nombre d'arbres par habitant, nombre d'arbres par logement	Non connu	Variable selon l'échelle d'étude	1	€
			Indice de canopée	Superficie rapportée au sol de la couronne des arbres de plus de 3 m par rapport à celle du territoire considéré. Cet indice correspond donc au couvert forestier d'un territoire et permet d'étudier la croissance /décroissance de la foresterie urbaine	Oui	Indicateur compris entre 0 et 100% (proportion de la superficie de la couronne des arbres par rapport à la superficie du territoire considéré)	1	€
			Suivi hygrométrique et thermique de l'air	Suivi par le biais de stations météorologiques ou suivis satellites	Non connu	-	1	€€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
Habitats d'espèces	Éléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire	Evaluer la dynamique du retour du vivant (succession secondaire)	Diversité de la faune du sol (micro, méso et macrofaune) à partir de l'ADN environnemental	Mesure de la diversité de la micro-, méso- et macrofaune par analyse de l'ADN environnemental ou par PCR	Variable selon la cible	Les connaissances de la biodiversité microbienne des sols progressent (voir atlas de la biodiversité microbienne en France). Selon les études portées par le RMQS, la richesse taxonomique bactérienne varie entre 2045 et 2708 taxons.	2-3	€/€/€€
		Evaluer la dynamique du retour du vivant (succession secondaire)	Diversité fonctionnelle de la faune du sol (micro, méso et macrofaune) par une analyse des gènes fonctionnels	Mesure de la diversité fonctionnelle des sols.	Variable selon la cible		2-3	€/€/€€
	Apiculture	Evaluer la capacité d'accueil des milieux pour les abeilles	Potentiel d'accueil de la végétation pour les pollinisateurs	L'évaluation du potentiel d'accueil est basée sur trois indicateurs : - Capacités d'accueil des pollinisateurs favorable : indicateur de 8 ou 9 (note maximale possible) ; - Capacité d'accueil des pollinisateurs altérée : indicateur entre 5 et 7 ; - Capacité d'accueil des pollinisateurs mauvaise : indicateur avec une note de 3 ou 4.	Oui	Indicateur composite allant de 3 à 9	2	€€
	Éléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire	Evaluer la dynamique du retour du vivant (succession secondaire)	Densité et biodiversité des vers de terre et enchytréides	Méthode basée sur l'ADNe ou par observation / identification visuelle. La diversité et l'abondance des vers de terre ou des enchytréides varient fortement avec le niveau de perturbation d'un sol. Le long d'un gradient de succession secondaire, le retour de ces organismes semblent assez rapide (moins de 5 ans)	Non connu	Selon Ademe (2017), abondance lombricienne comprise entre 0 et 350 individus / m ² La biomasse lombricienne est comprise entre 0 et 200 g/m ²	1/2	€/ €€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
		Evaluer la dynamique du retour du vivant (succession secondaire)	Taux de recouvrement de la végétation sur le site (%)	Evaluation de la superficie végétalisée versus mise à nu ou imperméabilisée	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1 (proportion de la superficie végétalisée par rapport à la superficie totale du site)	1	€
		Evaluer la dynamique du retour du vivant (succession secondaire)	Composition des communautés végétales avec estimation de l'abondance des espèces végétales considérées comme pionnières tout au long de la succession végétale	Analyse phytosociologique des communautés végétales	Non connu	-	1	€€
		Evaluer la dynamique du retour du vivant (succession secondaire)	Biomasse des organismes du sol (g C / g sol)	Biomasse microbienne (bactérie, champignons) par méthode fumigation, extraction et ergostérol ou biomasse moléculaire microbienne du sol. Estimation de la biomasse totale des organismes vivants du sol par analyse moléculaire ou mesure directe (lombriciens, nématodes...)	oui	La biomasse moléculaire microbienne mesurée dans les sols français dans le cadre du RMQS varie entre 5 et 173 µg d'ADN/g de sol	1	€€
		Evaluer la dynamique du retour du vivant (succession secondaire)	Richesse fongique et abondance relative des différents taxons	Méthode basée sur l'ADNe. La littérature rapporte dans certains cas une augmentation de la richesse taxonomiques des champignons dans les premiers stades d'une succession secondaire (avec la prédominance des ascomycètes) puis une diminution dans les stades plus tardifs (avec la prédominance des basidiomycètes (voir par exemple Zhang et al. 2018). La diversité des champignons semble également se structurer selon le type de végétation (prairie, arbustif ou arboré)	Non connu	-	2	€€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
		Evaluer la dynamique du retour du vivant (succession secondaire)	Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI) des communautés de nématodes	Méthode basée sur une identification visuelle des communautés de nématodes. SI : cet indicateur reflète la stabilité du milieu. Plus SI est élevé, moins le milieu est perturbé. EI : cet indicateur donne une indication sur la dynamique des nutriments. Il augmente avec la disponibilité en éléments nutritifs.	Oui	Indicateurs compris entre 0 et 100	1	€€
		Evaluer la qualité générale des milieux	Diversité des microarthropodes du sol et abondance relative de différents groupes	Méthode basée sur l'ADNe ou par observation / identification visuelle. Cet indicateur nécessite une situation de référence pour l'interprétation des résultats. Une perturbation diminue le nombre et la diversité des microarthropodes du sol. L'indicateur QBS-ar fait référence à ce groupe dans la littérature.	Oui	Gamme de variation entre 0 et 12 000 individus par m ² (après analyse visuelle)	2	€€
		Evaluer la qualité générale des milieux	Ratio acarien / collembole	Méthode basée sur l'ADNe ou par observation / identification visuelle.	Non connu	Entre 0 et 30 dans l'étude de Menta et al (2014)	2	€€
		Evaluer la qualité générale des milieux	Indices de structure (SI) et de maturité (IM) des communautés de nématodes	Méthode basée sur une identification visuelle des communautés de nématodes. SI : cet indicateur reflète la stabilité du milieu. Plus SI est élevé, moins le milieu est perturbé. IM : indicateur de maturité donne une indication de perturbations	Oui	Indicateur SI compris entre 0 et 100	1	€€
		Evaluer la qualité générale des milieux	Indice de qualité écologique (IQE) et l'indice de potentialité écologique (IPE)	Ces indices permettent d'évaluer à l'échelle d'un site dans sa globalité, la biodiversité, la fonctionnalité écologique, et l'efficacité des mesures d'aménagements et de gestion écologiques, dans une optique de suivi temporel. Reposant sur une expertise de terrain, il doit être mis en œuvre par des naturalistes expérimentés. L'IQE repose	Non connu	Chaque indicateur composant l'indice est évalué entre 0 et 100	1	€/€€€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
				sur un inventaire complet du site (sur 6 jours). L'IPE repose sur les mêmes critères mais peut se réaliser en un seul jour d'inventaire.				
		Evaluer la qualité générale des milieux	Richesse en habitats	Nombre d'habitats naturels selon la typologie Eunis niveau 3 par unité de surface du site	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1	1	€
		Evaluer la qualité générale des milieux	Nombre d'espèces patrimoniales (et/ou protégées)	Nombre d'espèces patrimoniales (et/ou protégées) identifiées par des inventaires faune - flore	Non connu	-	1	€€
		Evaluer la qualité générale des milieux	Recouvrement par les espèces végétales envahissantes	Superficie des foyers d'espèces végétales exotiques envahissantes observés (en m ² ou en % de recouvrement du site)	Oui (pour indicateur MNEFZH)	Indicateur compris entre 0 et 1	1	€€
		Evaluer la qualité générale des milieux		Nombre de stations d'espèces végétales envahissantes (ou nombre de stations)	Non connu	-	1	€€
		Evaluer la qualité générale des milieux	Indicateur "Odonates"	Mesure de la diversité spécifique au sein des communautés d'odonates.	Oui	L'indicateur du programme Rhomeo évolue de 0 (aucune espèce au rendez-vous) à 100% (toutes les espèces attendues au rendez-vous).	1	€€€
		Evaluer la qualité générale des milieux	Indicateur "Lepidoptères"	Test de la qualité d'un milieu herbacé (eutrophe à mésotrophe) obtenu à partir d'une catégorisation des cortèges relevés dans 4 types de liste : généralistes ubiquistes (milieu dégradé), moyennement généralistes, bonne proportion de spécialistes (milieu en bon état, restauration correcte), majorité de spécialistes et espèces rares (très bon état, restauration réussie)	Oui	Note de -15 à +5 selon les 4 types de cortèges observés sur site	2	€€€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
Rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux	Régulation de la qualité de l'eau	Evaluer les risques d'eutrophisation	Teneur en phosphore dans les sols	Mesure de P total, P assimilable.	Oui	Teneur moyenne : 600 mg/kg	1	€
			Teneur en azote dans les sols	Mesure de N total, N minéral	Oui	Les teneurs en azote total dans les sols de surface varient entre <1 et 16 g/Kg	1	€
			Teneur en phosphore dans les eaux de surface	Mesure de P total, P assimilable	Oui	Un cours d'eau en "bon état" d'un point de vu du phosphore contient <0.2 mg.L ⁻¹ de phosphore (grille d'évaluation SeqEau)	1	€
			Teneur en azote dans les eaux de surface	Mesure de N total, N minéral	Oui	Les eaux naturelles non polluées contiennent généralement très peu de nitrates. L'eutrophisation peut être déclenchée à partir de 1 mg.L ⁻¹ de NO3 ce qui est très en dessous des teneurs autorisées pour l'eau de consommation.	1	€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
			Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie	Etude phytosociologique des communautés végétales. Cet indicateur permet de suivre la trophie des milieux présents. La proportion des espèces nitrophiles de valeur ≥ 7 sur le nombre total d'espèces donne une indication de l'évolution positive ou négative d'une réhabilitation	Oui	Variable selon protocole	1	€€€
			Indicateur "Odonates"	Mesure de la diversité spécifique au sein des communautés d'odonates.	Oui	L'indicateur proposé dans Record (2018) peut être calculé à partir de 3 cortèges (tolérants, moyennement tolérants et sensibles). La gamme de valeur s'étend de 1 (faible), 2 (moyen), jusqu'au maximum de 3 (très fort).	1	€€€
Rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux	Régulation de la qualité des sols	Evaluer l'état général du sol	Mesure de la respiration du sol témoin d'une activité de minéralisation du sol et de sa "santé" globale	Différentes approches sont proposées dans le commerce. In fine, il s'agit de quantifier le CO ₂ émis par le sol au cours du temps soit par une mesure directe (type spectromètre infra-rouge) soit indirect (par colorimétrie). Voir par exemple les dispositifs Oxitop®, SOLVITA®, MicroResp(R).	Oui (nombreuses références dans la littérature)	Variable selon type de sol et nature du couvert végétale	1	€
			Densité et diversité des vers de terre et enchytréides	Méthode basée sur l'ADNe ou par observation / identification visuelle. La diversité et l'abondance des vers de terre ou des enchytréides varient fortement avec le niveau de perturbation d'un sol. Le long d'un gradient de succession secondaire, le retour de ces organismes semblent assez rapide (moins de 5 ans)	Non connu	Selon Ademe (2017), abondance lombricienne comprise entre 0 et 350 individus / m ² . La biomasse lombricienne est comprise entre 0 et 200 g/m ²	1/2	€ / €€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
			Test de Baït-lamina	Le test du bait-lamina (test avec bandelettes appâtées en PVC mesure l'activité alimentaire de la faune du sol (pas d'observation différenciée des groupes d'invertébrés). L'indicateur est basé sur le nombre d'orifices dont le contenu (appât en cellulose, charbon actif et son de blé) a été consommé ou non.	Oui	Voir la littérature	1	€
			Ratio champignon / bactérie	Biomasse fongique divisée par la biomasse bactérienne mesurée par différentes techniques (ADN, cellules, fumigation / ergostérol)	Oui	Voir la littérature	2	€€
			Ratio acarien / collembole	Méthode basée sur l'ADNe ou par observation / identification visuelle.	Non connu	Entre 0 et 30 dans l'étude de Menta et al (2014)	2	€€
			Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI) des communautés de nématodes	Méthode basée sur une identification visuelle des communautés de nématodes. SI : cet indicateur reflète la stabilité du milieu. Plus SI est élevé, moins le milieu est perturbé. EI : cet indicateur donne une indication sur la dynamique des nutriments. Il augmente avec la disponibilité en éléments nutritifs.	Oui	Indicateurs compris entre 0 et 100	1	€€
			Biomasse des organismes du sol (g C / g sol)	Biomasse microbienne (bactérie, champignons) par méthode fumigation, extraction et ergostérol ou biomasse moléculaire microbienne du sol. Estimation de la biomasse totale des organismes vivants du sol par analyse moléculaire ou mesure directe (lombriciens, nématodes...)	A confirmer		1	€€
			Activités enzymatiques liées au cycle du carbone et de l'azote	Mesure de l'activité beta-glucosidase, activité protéase, activité leucine aminopeptidase, activité de l'arylamidase, activité FDA	Oui	Gamme variable selon le paramètre	1	?
			Potentiel fonctionnel lié au cycle du carbone et de l'azote sur la base de l'analyse des gènes	Quantification des gènes fonctionnels liés au cycle de l'azote et du carbone. Selon l'étape ciblée (nitrification, fixation d'azote, minéralisation, dénitrification etc.),	Non connu		2	€€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
			fonctionnels	différents gènes codant pour les enzymes ciblés sont quantifiés par qPCR				
	Produits de l'agriculture	Evaluer la qualité agronomique des sols	Teneur en carbone organique labile	Mesure du carbone organique labile (fractionnement granulométrique suivi par une oxydation par KMno4 et spectrophotométrie)	Non connu	-	1	€
			Teneur en phosphore dans les sols	Mesure de P total, P assimilable.	Oui	Teneur moyenne : 600 mg/kg	1	€
			Teneur en azote dans les sols	Mesure de N total, N minéral	Oui	-	1	€
			Minéralisation de l'azote dans les sols	Potentiel de minéralisation nette (PNM). Il s'agit de mesurer la production d'N inorganique dans un sol au cours du temps (mesure d'NH4).	Non connu	-	1	€
			Taux de nitrification (transformation de l'ammonium issu de la dégradation de la matière organique en nitrate, mobilisable par les plantes)	Potentiel de nitrification nette (PNN). Complémentaire à la mesure de PNM. Ici on regarde l'accumulation de nitrates dans un sol au cours du temps. Il est également possible de mesurer l'activité de la NEA (enzyme de nitrification) en réalisant une mesure de la cinétique de nitrification de l'ammonium.	Non connu	-	1	€
			Fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses	- Proportion des espèces végétales fixatrices d'azote (par exemple légumineuses). - Présence d'espèces bactériennes ou fongiques symbiotiques fixatrices d'azote	Oui	Indicateur compris entre 0 et 100%	1	€
			Abondance des gènes fonctionnels dans le sol liés au cycle du carbone et de l'azote (potentiel fonctionnel d'un sol)	Quantification des gènes fonctionnels liés au cycle de l'azote et du carbone. Selon l'étape ciblée (nitrification, fixation d'azote, minéralisation, dénitrification etc.), différents gènes codant pour les enzymes ciblés sont quantifiés par qPCR	Non connu	-	2	€€
			Activités enzymatiques liées au cycle du carbone et de l'azote	Mesure de l'activité beta-glucosidase, activité protéase, activité leucine aminopeptidase, activité de l'arylamidase, activité FDA	Oui	Gamme variable selon le paramètre	1	?

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
			Evaluation de la valeur agronomique du sol sur la base d'indicateurs de routine	Ensemble de mesures proposées en routine par les laboratoires d'analyse privées incluant généralement : pH eau, COT (matière organique), Carbone microbien, Phosphore Joret Hébert (P assimilable), CEC Metson (capacité du sol à stoker de manière réversible les éléments fertilisants cationiques K+, Mg+, Ca2+), BE, dosage K2O MgO CaO Na2O échangeables, oligos DTPA (ce sont les oligos chélatés, ie pleinement disponibles), dosage Fer DTPA, dosage Mn DTPA, dosage Cu DTPA, dosage Zn DTPA	Oui	Gamme variable selon le paramètre	1	€
			Caractérisation pédologique des sols pour évaluer sa qualité agronomique	Test bêche pour observer la structure du sol	Non connu	-	1	€
Rétention, circulation et infiltration de l'eau	Régulation des inondations	Eviter des engorgements, évaluer la recharge en eau des nappes, favoriser l'infiltration	Taux d'infiltration de l'eau dans les sols	Vitesse d'infiltration (test de Beerkan, BEST ou méthode du double anneau Norme X30-418) liée à la texture des sols	Oui	Ks[m/s] compris entre 4.10^{-4} et 1.10^{-7} .	1	€
		Favoriser l'infiltration	Taux d'infiltration de l'eau dans les sols	Vitesse d'infiltration (test de Beerkan, BEST ou méthode du double anneau Norme X30-418) liée à la texture des sols	Oui	Ks[m/s] compris entre 4.10^{-4} et 1.10^{-7} .	1	€
		Ralentir les ruissellements de manière à désynchroniser les pics de crue à l'aval	Rugosité des sols	Evaluation de la rugosité selon le type d'habitat en place (selon coefficient de Manning)	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1 dans la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides	1	€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
	Produits de l'agriculture	Avoir une réserve en eau disponible pour les plantes	Réserve utile des sols	Mesure de la quantité d'eau accessible pour les plantes, c'est la différence entre la capacité au champ et l'eau restant dans le sol au point de flétrissement (PF4.2). La réserve utile s'exprime en mm d'eau	Oui	La réserve utile peut être calculée à partir de la texture des sols. A titre indicatif, elle est de : -0.9 à 1.2 mm/cm de sol pour un sable, -1.3 à 1.6 mm/cm de sol pour un limon argileux, -1.8 à 2 mm/cm de sol pour un sol argileux, argilo limoneux, argilo sableux.	1	€
		Ajuster l'irrigation	Capacité au champ	Mesure de la quantité d'eau retenu dans un sol saturé en eau	Oui	-	1	€
	Eléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire	Vérifier la conformité des conditions hydromorphiques avec l'habitat implanté (pour les zones humides spécifiquement)	Mesure indirecte de l'humidité du milieu - orthoptères	Evaluation du degré d'humidité moyen d'un milieu humide au niveau du sol et de la strate herbacée à partir des peuplements d'orthoptères (criquets, sauterelles et grillons) observés par rapport à une liste d'espèces potentielles.	Oui	Indicateur compris entre 0 et 100%	1	€€
			Indicateur floristique d'engorgement	Analyse phytosociologique des communautés végétales pour évaluer le niveau d'engorgement d'un sol en zone humide	Oui	La gamme de valeur va de 1 à 10 en théorie. Les valeurs médianes pour les zones humides varient de 3,77 (marais de plaine drainés, marais de pente) à 8,25 ou plus (pour les tourbières à sphaignes non altérées) sans tenir compte du recouvrement des espèces, et entre 3,46 et 8,90 si on prend en compte le recouvrement.	1	€€€
Rétention, transformation et élimination des polluants	Régulation de la qualité de l'eau	Limiter le transfert de polluants vers les réseaux	Rugosité des sols	Evaluation de la rugosité selon le type d'habitat en place (selon coefficient de Manning)	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1 dans la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides	1	€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
organiques et inorganiques (eau, air, sol)		hydriques	Fraction mobile des polluants	Quantification des polluants lixiviables dans une solution aqueuse ou un extractant léger (approche de mesure variable selon la nature du polluants). Voir norme NF X31-620 décembre 2018 - Qualité du sol - Prestations de services relatives aux sites et sols pollués. Pour aller plus loin pour certains polluants, il est possible d'évaluer la dominance ou la présence d'une forme plus ou moins toxique du polluant. Par exemple pour l'arsenic : mesure fraction AsIII/AsV Pour le mercure (Hg) : recherche MeHg en milieu anaérobie. Une telle mesure doit être en lien avec la nature des polluants mobiles détectés.	Oui	Gamme de valeurs variable selon le type de polluant - interprétation à faire selon la législation en vigueur, valeurs seuils autorisées selon polluant	1	€€
	Régulation de la qualité de l'air	Limiter le transfert des polluants vers l'air	Analyse du pollen transporté par les abeilles pour détecter d'éventuelles pollutions de l'air (métaux lourds, HAP et PCB)	Les abeilles peuvent être utilisées pour caractériser le niveau de contamination de l'environnement et en particulier pour les métaux lourds, les HAP et les PCB	Non connu	-	1	€€
			Fraction volatile des polluants	ISO 18400-204:2017 Qualité du sol — Échantillonnage — Partie 204: Lignes directrices pour l'échantillonnage des gaz de sol	oui	Gamme de valeurs variable selon le type de polluant - interprétation à faire selon la législation en vigueur, valeurs seuils autorisées selon polluant		

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
	Régulation de la qualité des sols	Garantir la dégradation in situ des polluants	Mesure du potentiel d'abattement des polluants dans les sols	Il s'agit d'évaluer la capacité du sol (composantes biotiques et abiotiques) à dégrader les polluants. Selon les polluants, différentes méthodes d'analyse sont disponibles. Pour des polluants inorganiques, tels que l'arsenic, il peut s'agir de rechercher et quantifier les gènes microbiens impliqués dans l'oxydo-réduction de l'As. Pour des molécules organiques, des mesures de vitesses de dégradation peuvent être réalisés, de même que des analyses de fractionnement isotopiques ou des quantifications de gènes impliqués dans la dégradation. Ces approches peuvent mettre en évidence des phénomènes d'atténuation naturelle.	dépendant des polluants	Selon le milieu et le type de polluant ainsi que la technique choisie (voir la synthèse associée à ce tableur sur les techniques OMICS)	2/3	€/€/€€
	Éléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire	Evaluer le transfert de polluants vers les chaînes trophiques et la toxicité des polluants pour l'environnement	Expression génique de la métallothionine (MT) par les vers de terre	Indicateur permettant d'évaluer la fraction biodisponible des polluants affectant directement les vers de terre	oui	Résultats disponibles pour un certain nombre de situations (voir fiche)	2	€€
			Tests de reproduction (toxicité chronique) ou de mortalité (test de toxicité aiguë) des vers de terre	Evaluation de l'effet toxique de différentes matrices (sols, lixiviats) sur la reproduction et/ou la mortalité des vers de terre. On mesure le nombre de juvéniles produits à 8 semaines et la survie et croissance des vers adultes à partir de 4 semaines en général.	oui	Se reporter aux référentiels établis par les laboratoires d'analyse.	1	€€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
			Tests de reproduction sur collemboles	Le test mesure l'effet des substances chimiques sur le taux de reproduction des collemboles après une exposition de 21 ou 28 jours à un échantillon de sol naturel ou à des concentrations connues de substance d'essai mélangée à un sol artificiel normalisé. On mesure le nombre de juvéniles produits et la survie des animaux parents. La durée du test est de 21 jours.	oui	Se reporter aux référentiels établis par les laboratoires d'analyse.	1	€€
			Indice SET escargots	Evaluation de la bioaccumulation des métaux lourds dans les tissus des escargots.	Oui	Le référentiel concernant l'ensemble des éléments métalliques est disponible dans la fiche outil	1	€€
			Test de germination et/ou de croissance (<i>Latuca sativa</i>, <i>avena sativa</i> etc.)	Evaluation de l'effet toxique de différentes matrices (sols, lixiviats) sur la germination et la croissance de plantes (Cresson, laitue, avoine).	Oui	Pour la germination, de 0 à 100%. Pour la croissance, se reporter aux référentiels établis par les laboratoires d'analyse.	1	€€
			Indice Phytomet	Evaluation des teneurs foliaires en éléments traces métalliques (ETMs) dans les communautés végétales. Cet indicateur donne une information sur la phytodisponibilité des contaminants.	Oui	Gamme de variation sur les sites du programme Bioindicateurs 2 : entre 0 et 600	1	€€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
			Bioaccumulation des éléments métalliques par les micromammifères	Evaluation de la quantité de polluants accumulés dans les tissus des micromammifères	Non	Le référentiel concernant l'ensemble des éléments métalliques est disponible dans la fiche outil	2	€€
	Régulation de la qualité des sols	Evaluer et suivre la présence d'une pollution métallique, organique ou minérale (hors teneur en azote ou phosphore excédentaire)	Polluants totaux	Quantification des polluants totaux (approche de mesure variable selon la nature du polluants). Voir norme NF X31-620 décembre 2018 - Qualité du sol - Prestations de services relatives aux sites et sols pollués	Non	-	1	€€
			Fraction mobile des polluants	Quantification des polluants lixiviables dans une solution aqueuse ou un extractant léger (approche de mesure variable selon la nature du polluants). Voir norme NF X31-620 décembre 2018 - Qualité du sol - Prestations de services relatives aux sites et sols pollués. Pour aller plus loin pour certains polluants, il est possible d'évaluer la dominance ou la présence d'une forme plus ou moins toxique du polluant. Par exemple pour l'arsenic : mesure fraction AsIII/AsV Pour le mercure (Hg) : recherche MeHg en milieu anaérobie. Une telle mesure doit être en lien avec la nature des polluants mobiles détectées.	Oui	gamme de valeurs variable selon le type de polluant - interprétation à faire selon la législation en vigueur, valeurs seuils autorisés selon polluant	1	€€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
			Indicateur Omega 3	Etat de dégradation des lipides chloroplastiques des végétaux en présence de contaminants dans le sol.	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1. 1 étant la modalité qui a le moins d'effet. Par rapport à la modalité ayant la note relative de 1 : - 1 > Note relative > 0,93 : Pas d'effet de la modalité - 0,93 ≥ Note relative ≥ 0,85 : Effet moyen de la modalité - Note relative > 0,85 : Effet fort de la modalité	1	€€
Stockage, recyclage et transformation des matières organiques (carbone)	Régulation du climat global	Connaitre le stock de carbone dans les sols	Epaisseur de l'horizon pédologique humifère en surface et enfoui (en cm)	Indicateur « Episolum humifère en surface » et indicateur "horizon enfoui" qui se base sur l'épaisseur de l'horizon organique en surface ou observé en profondeur (en cm)	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1	1	€
			Teneur et stock de carbone dans les sols (g C/g sol ou kg C / ha)	Le stock de carbone dans les sols sur une épaisseur donnée est estimé par le biais d'une analyse de la teneur en carbone du sol sur l'horizon correspondant multiplié par la densité volumique du sol (masse de sol divisé par son volume). Analyseur CHN en laboratoire, normes NF ISO 10694 et 14235	Oui	Variable (35T/Ha sols de vignes, 80T/Ha sols forestiers)	1	€
	Régulation de la qualité de l'eau	Evaluer la quantité de carbone disponible favorable aux processus de dénitrification en zones humides	Epaisseur de l'horizon pédologique humifère en surface (en cm)	Indicateur « Episolum humifère en surface » qui se base sur l'épaisseur de l'horizon organique en surface (en cm)	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1	1	€
			Teneur en carbone organique labile	Mesure du carbone organique labile (fractionnement granulométrique suivi par une oxydation par KMno4 et spectrophotométrie)	Non connu	-	1	€
			Teneur et stock de carbone dans les sols (g C/g sol ou kg C / ha)	Le stock de carbone dans les sols sur une épaisseur donnée est estimé par le biais d'une analyse de la teneur en carbone du sol sur l'horizon correspondant multiplié par la densité volumique du sol (masse de sol divisé par son volume). Analyseur CHN en laboratoire, normes NF ISO 10694 et	Oui	Variable (35 T/Ha sols de vignes, 80 T/Ha sols forestiers)	1	€

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
				14235				
	Régulation de la qualité des sols	Connaitre la dynamique du recyclage de la matière organique	Minéralisation de la matière organique des sols (g CO ₂ / g sol)	Pour estimer la minéralisation de la matière organique on peut recourir à des indicateurs tels que la respiration potentielle du sol ou le dégagement de CO ₂ (Respirométrie - microresp, oxitrop®), des mesures plus indirectes comme des mesures d'activités microbiennes (β-glucosidase, N-acetylglucosaminidase), des indices de dynamique du carbone mesurés à partir de paramètres nématofauniques ou encore le rapport C/N de la matière organique, indicateur d'une dégradation de la matière organique.	Oui	Variable selon le type de mesure effectuée	1	€€
Taux de décomposition de la litière			La technique du litter bag ou du teabag index est utilisée. Elle consiste à disposer dans le sol pour une durée donnée un sac de litière dont la masse initiale est connue. Quelques semaines plus tard, les sacs sont collectés et la litière restante est triée, séchée et pesée. La différence de masse donne un indicateur sur le taux de décomposition.	Oui	Voir par exemple la gamme présentée par Keuskamp et al. 2013.	1	€	
Ratio C/N			Le rapport C/N de la matière organique est un indicateur de la dégradation de la matière organiques	Oui	C/N < 15 : production d'azote, la vitesse de décomposition s'accroît ; elle est à son maximum pour un rapport C/N = 10 15 < C/N < 20 : besoin en azote couvert pour permettre une bonne décomposition de la matière carbonée, C/N > 20 : pas assez d'azote	1	€€	

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
						pour permettre la décomposition du carbone (il y a compétition entre l'absorption par les plantes et la réorganisation de la matière organique par les microorganismes du sol, c'est le phénomène de "faim d'azote"). L'azote est alors prélevé dans les réserves du sol. La minéralisation est lente et ne restitue au sol qu'une faible quantité d'azote minéral.		
			Teneur en carbone organique labile	Mesure du carbone organique labile (fractionnement granulométrique suivi par une oxydation par KMnO4 et spectrophotométrie)	Non connu	-	1	€
			Ratio champignon / bactérie	Biomasse fongique divisée par la biomasse bactérienne mesurée par différentes techniques (ADN, cellules, fumigation / ergostérol)	Oui	Voir la littérature	2	€€
			Biomasse des organismes du sol (g C / g sol)	Biomasse microbienne (bactérie, champignons) par méthode fumigation, extraction et ergostérol ou biomasse moléculaire microbienne du sol. Estimation de la biomasse totale des organismes vivants du sol par analyse moléculaire ou mesure directe (lombriciens, nématodes...)	Non connu	-	1	€€
	Régulation du climat global	Connaitre le stock de carbone dans la végétation	Biomasse aérienne et souterraine de la végétation (g C / ha)	Mesures du stock de carbone dans la biomasse aérienne et souterraine (par le biais généralement d'un ratio biomasse souterraine / aérienne spécifique à l'essence). Ces mesures peuvent être soit réalisées sur le terrain soit par le biais de l'imagerie spatiale	Non	-	1	Variable selon le type de mesure

Fonctions	SE	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoignant de l'expression de la fonction associée	Description succincte et méthode de mesure	Connaissance d'une gamme de variation de l'indicateur	Précision sur la gamme de valeur	Degré de maturité	Coût total
			Indicateur "Surface terrière"	Analyse de la densité des arbres avec un relascope au sein d'un couvert forestier	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1	1	€
			Indicateur de structure de la végétation (« couvert végétal 2 »)	Analyse spatiale des types d'habitats en place et de leur recouvrement.	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1	1	€
Support physique stable	Régulation des inondations	Favoriser la stabilité du support physique (incluant lit majeur et zone inondable et milieux sensible à l'érosion)	Indicateur de structure de la végétation (« couvert végétal 2 »)	Analyse spatiale des types d'habitats en place et de leur recouvrement.	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1	1	€
			Taux de recouvrement de la végétation sur le site (%)	Evaluation de la superficie végétalisée versus mise à nu ou imperméabilisée	Oui	Indicateur compris entre 0 et 1 (proportion de la superficie végétalisée par rapport à la superficie totale du site)	1	€

Indicateurs de services écosystémiques

Les indicateurs de SE ont été choisis sur la base des indicateurs de l'étude RECORD1 (Baptist et al. 2018), lorsqu'ils étaient mesurables et pertinents pour une application en milieu urbain.

Cette sélection d'indicateurs s'est basée sur les critères suivants :

- Réponse aux principaux SE rendus par les milieux urbains ;
- Prise en compte de la présence et de la valeur ajoutée pour les bénéficiaires ;
- Adaptation au contexte de la réhabilitation écologique ;
- Appropriation possible par les économistes de l'environnement dans le but de mener une évaluation économique des SE.

Les indicateurs de SE supplémentaires ont été sélectionnés sur la base de la littérature disponible, dans la mesure où ils répondaient à ces critères. Afin de construire ces nouveaux indicateurs et de la même manière que pour le choix des indicateurs de la précédente étude, il a été nécessaire de se poser les questions suivantes :

- 1) Quelles composantes représentatives de chaque SE fournissent la prestation ?
- 2) Faut-il mesurer l'utilisation ou l'offre ?
- 3) Y a-t-il un lien avec le bien-être ?
- 4) L'indicateur donne-t-il lieu à une interprétation claire et y a-t-il un besoin important de guider l'utilisateur à travers une comparaison à des valeurs de référence ? (valeur élevée correspond à prestation élevée)
- 5) S'agit-il d'une valeur de flux avec une mesure par unité de temps ?
- 6) L'accès et le traitement des données pour la construction de l'indicateur sont-ils réalisables simplement ?

La construction des indicateurs s'appuie sur la typologie de SE proposée dans le chapitre 3. Les indicateurs de SE construits dans l'étude sont donc divisés en quatre catégories :

- Biens produits par les écosystèmes ;
- Services de régulation ;
- Services culturels ;
- Patrimoine naturel.

Pour chaque indicateur est indiqué (Tableau 14) :

- Le SE ciblé ;
- La catégorie du SE ;
- Les bénéficiaires du SE, soit les personnes directement impactées par les bénéfices des SE mesurés ;
- Les indicateurs permettant d'évaluer le SE ;
- L'interprétation de ces indicateurs ainsi que les méthodes de mesure ;
- Les références

Tableau 14. Indicateurs permettant le suivi des SE. Le tableau dans sa forme exhaustive (incluant les sources notamment) est présenté dans l'outil Excel accompagnant ce rapport. La taille du tableau présenté ici a été réduite pour une question de lisibilité.

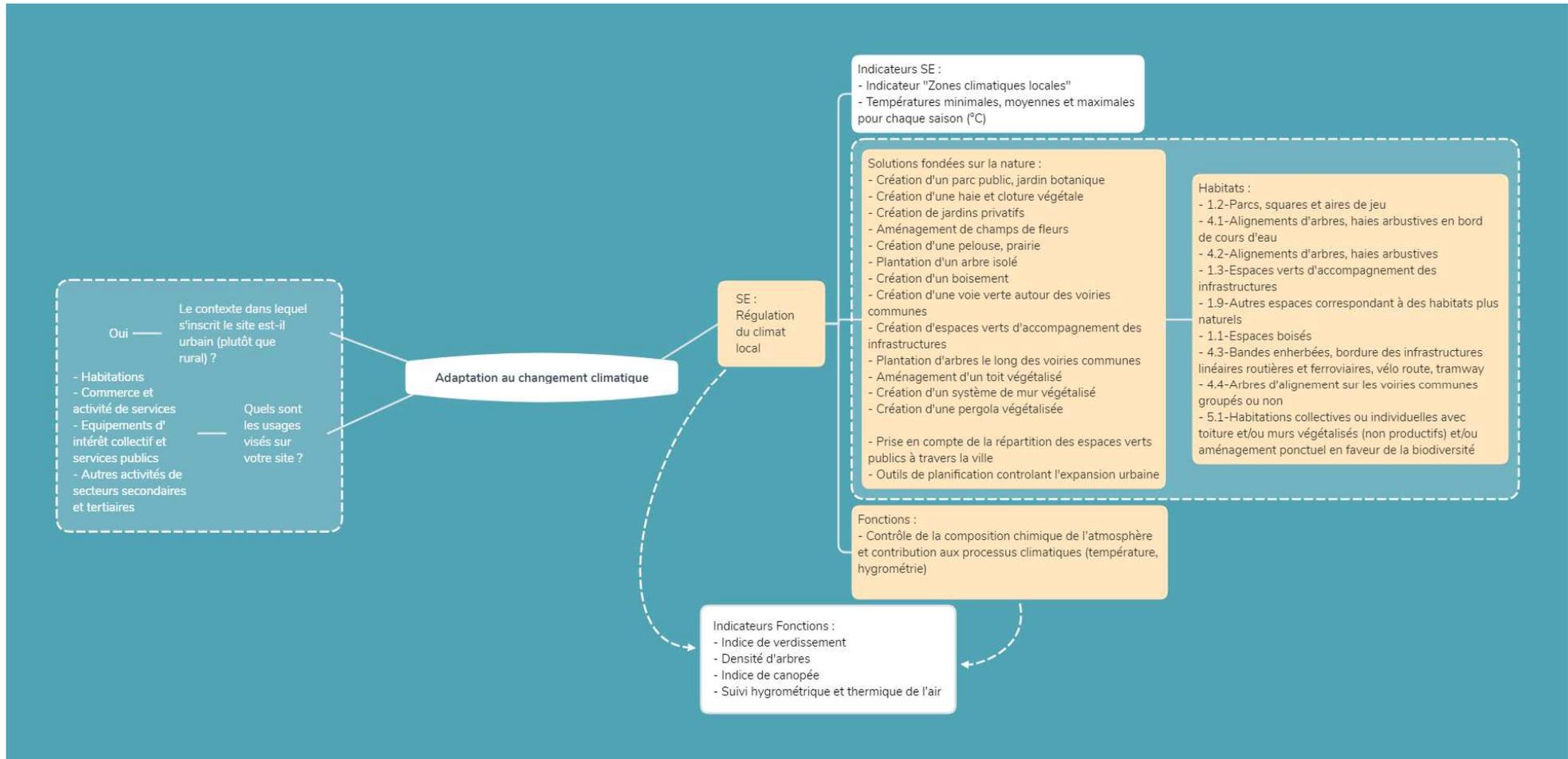
Catégorie de SE	SE ciblé	Bénéficiaires potentiels	Indicateurs proposés	Interprétation
Biens issus des écosystèmes	Produits de l'agriculture	Agriculteurs	<ul style="list-style-type: none"> - Superficie des cultures vivrières sur le site (en ha) - Rendement par type de culture hors cueillette (en tonne par ha et par an) 	Après remédiation/réaménagement et réhabilitation, un site dégradé/ pollué peut devenir le support de nouvelles cultures. Le SE peut être évalué par une quantification du volume annuel de denrées produites par les cultures vivrières implantées sur le site, après s'être assuré de leur comestibilité et de l'absence de contamination chimique dans les denrées produites.
	Produits de l'agriculture	Eleveurs	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre de bêtes sur le site (par espèce et par ha) - Rendement de l'élevage par type de produit comme la viande, le lait, etc. (en tonnes par an) - Superficie des cultures fourragères sur le site (en ha) - Rendements des cultures fourragères du site (en tonnes par ha et par an) 	Après remédiation/réaménagement et réhabilitation, un site dégradé/ pollué peut devenir un support d'élevage. Le SE peut être évalué par une quantification du volume annuel de produits issus de l'élevage présent sur le site, ainsi que de produits nécessaires à l'alimentation de ces animaux d'élevage cultivés sur le site.
	Produits de l'agriculture	Population locale	<ul style="list-style-type: none"> - Superficie des jardins partagés sur le site (en ha) - Rendement par type de cultures (en kg par ha et par an) - Nombre d'adhérents aux jardins partagés (en nombre de personnes) 	Après remédiation/réaménagement et réhabilitation, un site dégradé/ pollué peut devenir un support de nouvelles cultures par la création de jardins partagés. Le SE peut être évalué par une quantification du volume annuel de denrées produites grâce aux jardins partagés implantés sur le site après s'être assuré de leur comestibilité et de l'absence de contamination chimique dans les denrées produites. Le nombre d'adhérents participant au potager et consommant les denrées produites permet d'obtenir un ratio de volume annuel autoconsommé par les habitants.
	Produits de la cueillette	Agriculteurs, population locale	<ul style="list-style-type: none"> - Volume de produits issus de la cueillette cueillis sur le site (en kg par an) 	Les milieux naturels sont le support de plantes sauvages pouvant être utilisées par la population locale à des fins médicinales ou alimentaires après s'être assuré de leur comestibilité et de l'absence de contamination chimique dans les denrées produites. Le SE peut être évalué par une quantification du volume annuel de ressources naturelles cueillies sur le site (champignons, baies, fleurs...). Si ces volumes sont plus délicats à quantifier précisément que des volumes de récoltes classiques, ils peuvent également être renseignés à partir d'entretiens ou d'estimations.
	Apiculture	Agriculteurs, apiculteurs et population locale productrice de fruits et légumes ou produits de la ruche	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre de ruches installées sur le site (en nombre de ruches) - Volume de miel et autres produits issus de la ruche (en kg par ruche et par an) - Qualité du miel par la concentration en hydroxyméthylfurfural (HMF) (en g par kg de miel) 	Les milieux naturels peuvent être colonisés par des fleurs pouvant servir de support pour la production de miel par des abeilles. Des ruches peuvent être installées sur les sites et participer au SE de production de miel. Le SE peut être évalué par une quantification du volume annuel de miel produit ainsi qu'une évaluation de ses propriétés en termes de qualité.

Catégorie de SE	SE ciblé	Bénéficiaires potentiels	Indicateurs proposés	Interprétation
Services culturels	Aménités paysagères	Population locale, touristes	- Taux de satisfaction de la population par rapport aux espaces publics urbains (en % de la population ayant participé à l'enquête)	Les milieux naturels peuvent présenter des attraits paysagers pour les populations urbaines. Le SE peut être évalué par une quantification de la proportion de personnes satisfaites des espaces publics mis à leur disposition.
	Intérêt récréatif	Population locale, touristes	- Nombre de visiteurs sur le site par an - Connectivité du réseau urbain mesurée par une estimation du nombre d'habitants habitant à proximité des zones vertes et zones récréatives par rapport au nombre d'habitants total (en %) - Surface d'espaces verts par habitant (en m ² par habitant) - Accessibilité (en km, en minutes)	Après avoir retrouvé un état de nature, le site dégradé et/ou pollué peut (re)devenir attractif pour les populations locales, les visiteurs qui s'y promènent ou les naturalistes qui l'étudient. Le SE peut être évalué par une quantification du nombre annuel de visiteurs sur le site pour donner une représentation du rôle joué par les paysages, la faune et la flore du site dans le développement d'activités récréatives. S'il n'est pas mesuré directement comme pour un parc dont l'entrée est contrôlée, il peut être estimé à partir d'entretiens. Le SE peut également être évalué par une quantification de la proportion de la population qui vit à proximité d'au moins un espace vert ou zone récréative. L'évaluation de la proximité de la zone est faite selon l'éloignement à l'espace vert ou récréatif considéré (zone tampon 0,1 – 0,5 ha: 300 m. 0,5-1ha : 500m. >1 ha: 900m) Le SE peut également être évalué par une quantification de la surface d'espaces verts disponible pour chaque habitant pour rendre compte de l'équité des habitants en termes d'accès aux espaces de nature. Si l'échelle d'analyse est celle du bâtiment ou du quartier, le SE peut également être évalué par une quantification de l'accessibilité des espaces verts par la mesure de la distance minimale et par le temps minimal en moyenne de trajet à pieds entre l'espace vert et l'espace résidentiel le plus proche.
	Intérêt éducatif et pédagogique	Population locale (adultes et enfants)	- Nombre de personnes incluant les scolaires et adultes ayant bénéficié d'une visite guidée documentée - Nombre d'événements de sensibilisation du public tenus sur le site par an	Après remédiation/réaménagement et réhabilitation, un site dégradé/ pollué peut accueillir des visiteurs et ainsi devenir un support pédagogique, éducatif comme tout site naturel. Le SE peut être évalué en quantifiant le nombre annuel de personnes bénéficiant d'une visite du site qui rend compte de la contribution du site naturel à l'éducation et la sensibilisation à l'environnement. Le SE peut être évalué en quantifiant le nombre annuel d'activités organisées à des fins éducatives ou de sensibilisation du public qui rend compte de la contribution du site naturel à l'éducation et la sensibilisation à l'environnement.
	Intérêt éducatif et pédagogique	Scientifiques, Etat (recherche publique)	- Nombre de projets de recherche menés sur le site par an	Après remédiation/réaménagement et réhabilitation, un site dégradé/ pollué peut accueillir des scientifiques et ainsi devenir un support de recherche comme tout site naturel. Le SE peut être évalué en quantifiant le nombre annuel de projets de recherche menés sur le site qui rend compte de la contribution du site naturel à l'avancement de la recherche pour l'environnement.
	Régulation des inondations	Coûts évités des dommages potentiels liés à une crue	- Capacité du site à stocker l'eau transitoirement en période de crue (en m ³ par ha) - Volume de ruissellement (en m ³) - Ratio ruissellement / pluviométrie (%)	En période de crue, les zones humides, plaines inondables et espaces verts stockent l'eau de manière transitoire ce qui étale temporellement le pic de crue et réduit les possibles dommages et dégâts vis à vis des infrastructures urbaines grises. Le SE peut être évalué en mesurant la capacité du sol et donc du milieu à stocker le possible surplus d'eau participant à protéger les populations, cultures et infrastructures situées en aval et autour du site. Le SE peut également être évalué en mesurant le volume d'eau de ruissellement qui correspond à la somme des débits d'eau d'un exutoire d'eaux urbaines sur une période donnée

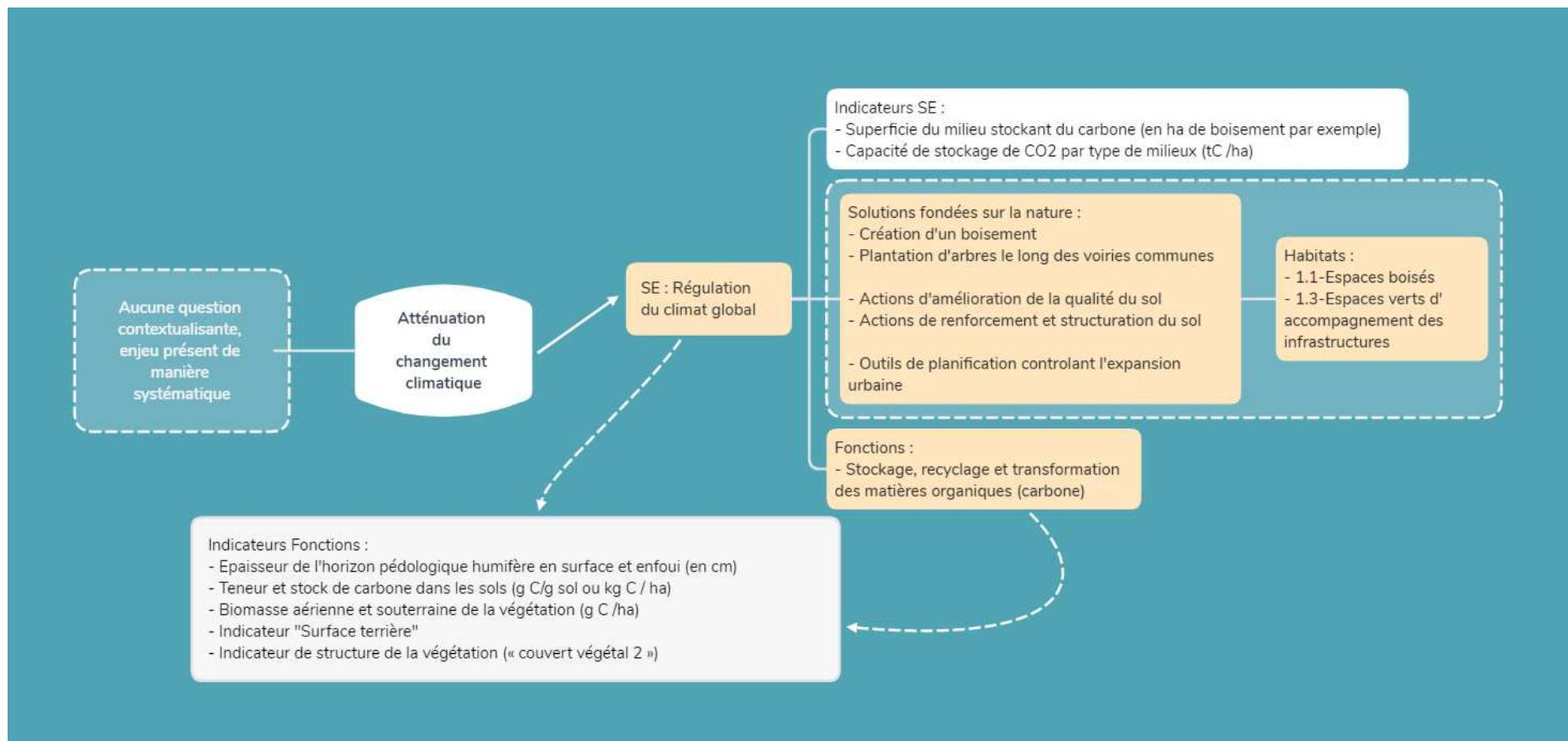
Catégorie de SE	SE ciblé	Bénéficiaires potentiels	Indicateurs proposés	Interprétation
Services de régulation				(en général, une année). Caractériser cet indicateur et comparer sa valeur avant et après l'implémentation d'une solution d'aménagement permet d'évaluer le SE de régulation des inondations dans le temps. Enfin, le SE peut être évalué en calculant le ratio entre le volume de ruissellement et le volume d'eau de pluie (pluviométrie en ml ou mm) sur une même période de temps donnée.
	Régulation de la ressource en eau	Population en aval alimentée en eau, Etat (coûts de dépollution évités)	- Qualité physico-chimique et biologique des eaux superficielles et souterraines en amont et en aval du site (concentration en polluants) - Coefficient de perméabilité des sols (K) et volume d'eau maximal à infiltrer lors d'un épisode pluvieux	Après remédiation/réaménagement et réhabilitation, un site dégradé/ pollué peut contribuer à améliorer la qualité des eaux qui transitent par le réservoir qu'il représente. Le SE peut être évalué en comparant la qualité des eaux superficielles et/ou souterraines en amont et en aval du site pour attester de l'impact des milieux naturels sur la qualité de l'eau. Si l'objectif est d'évaluer la capacité d'infiltration d'un sol, la mesure du coefficient de perméabilité est une approche possible (en m.s-1) associée à une estimation du volume d'eau maximal à infiltrer lors d'un épisode pluvieux.
	Régulation de la qualité des sols	Agriculteurs, Etat (coûts de dépollution évités)	- Qualité physico-chimique et biologique des sols sur le site comparée à un site localisé à proximité (porosité en %, réserve utile en %, taux de matière organique en %, carbone actif en ppm, concentration en azote, potassium, magnésium, calcium, oligo-éléments en kg par ha, pH) - Capacité d'abattement de la pollution du site comparée à un site localisé à proximité (concentration en polluants par ha)	Après remédiation/réaménagement et réhabilitation, un site dégradé/ pollué peut retrouver une qualité physico-chimique et biologique, ainsi que contribuer à abattre la pollution des sols. Le SE peut être évalué en comparant les indicateurs physico-chimiques et biologiques sur le site et sur un site de référence localisé à proximité. Le SE peut aussi être évalué en comparant les indicateurs relatifs à la pollution par contamination pour relater de l'importance des processus d'atténuation des contaminants qui ont lieu dans les sols (filtration, adsorption, biodégradation, assimilation, précipitation, transfert).
	Régulation du climat global	Population mondiale	- Superficie du milieu stockant du carbone (en ha de boisement, par exemple) - Capacité de stockage de CO ₂ du milieu (en tCO ₂ eq par ha de boisement)	Après remédiation/réaménagement et réhabilitation, un site dégradé/ pollué peut être boisé et contribuer à séquestrer du carbone. Le SE peut être évalué en quantifiant le carbone stocké par l'estimation de la superficie boisée et de sa capacité à stocker le carbone. Des mesures de teneur en carbone organique peuvent également être réalisées pour évaluer la séquestration du carbone dans les sols.
	Régulation des nuisances sonores	Population locale	- Niveau sonore moyen sur une période déterminée : Laeq jour, Laeq soirée, Laeq nuit (en dB) - Présence de barrières végétales permettant de réduire la pollution sonore (en mètre linéaire d'arbres, en ha d'espaces verts)	Après remédiation/réaménagement et réhabilitation, un site anciennement dégradé/ pollué peut contribuer à réduire les nuisances sonores locales en milieu urbain. Le SE peut être évalué en quantifiant les niveaux de bruit sur des périodes données. Le LAeq ou niveau sonore équivalent : C'est la donnée qui caractérise le mieux un bruit fluctuant dans le temps, par exemple le bruit de la circulation automobile. Il s'agit du niveau énergétique moyen pour une période donnée, mesuré en décibels (dB). Le LAeq(6h-22h) ou LAeq jour : est le niveau énergétique moyen calculé sur une période de 6h à 22h. Il s'agit globalement de la nuisance sonore moyenne sur cette période. Le LAeq(22h-6h) ou LAeq nuit : est le niveau énergétique moyen calculé sur une période complémentaire de 22h à 6h. Le SE peut également être évalué par la quantification des barrières végétales participant à l'atténuation du bruit urbain, qui permet de rendre compte de la contribution des espaces naturels au SE.

Catégorie de SE	SE ciblé	Bénéficiaires potentiels	Indicateurs proposés	Interprétation
	Régulation de la qualité de l'air	Population locale	<ul style="list-style-type: none"> - Concentration de l'air en particules et polluants atmosphériques (poussières PM10 et 2,5 ; dioxyde d'azote ; ozone ; dioxyde de soufre) (en concentration par m³ d'air) - Agrégation par l'indice ATMO si disponible dans l'agglomération (sans unité) 	<p>Après remédiation/réaménagement et réhabilitation, un site anciennement dégradé/ pollué peut contribuer à améliorer la qualité de l'air urbain.</p> <p>Le SE peut être évalué en quantifiant les concentrations en polluants atmosphériques possiblement agrégeables par un indice ATMO si l'agglomération en question est située en France et concentre plus de 100 000 habitants. L'indice ATMO va de 1 à 10 et est associé à un qualificatif (de très bon à très mauvais). Il intègre les principaux polluants atmosphériques, traceurs des activités de transport, urbaines et industrielles : poussières (transport, chauffage et activités industrielles, réactions chimiques dans l'atmosphère et transferts de pollution sur de grandes distances); dioxyde d'azote (transports, activités de combustion et de chauffage); ozone (polluant secondaire issu des transports et de l'utilisation des solvants et hydrocarbures); dioxyde de soufre (industrie).</p>
	Régulation du climat local	Population locale	<ul style="list-style-type: none"> - Indicateur "Zones Climatiques Locales" - Températures minimales, moyennes et maximales pour chaque saison (°C) 	<p>Après remédiation/réaménagement et réhabilitation, un site anciennement dégradé/ pollué peut contribuer à réduire l'îlot de chaleur urbaine local.</p> <p>Le SE peut être évalué en quantifiant les îlots de chaleur urbains sur le site les Zones Climatiques Locales (ou LCZ pour « Local Climate Zone »). Ce concept adopté par la communauté scientifique internationale du climat urbain depuis les travaux de Stewart et Oke (2012) est une unité de surface urbaine, de la taille de quelques îlots ou d'un quartier, répondant au double principe d'homogénéité de composition urbaine et d'homogénéité climatique. Ce schéma repose sur une description en 17 classes (10 « urbanisées » et 7 « rurales ou naturelles »), permettant de qualifier un territoire par 10 indicateurs qui décrivent la morphologie des rues et des bâtiments, la nature et l'occupation du sol, le niveau d'activité anthropique et les propriétés thermiques des surfaces et des matériaux.</p> <p>Le SE peut également être évalué en mesurant les données de température minimale, moyenne et maximale du site pour attester de la contribution du site à la réduction de l'îlot de chaleur urbain.</p>
Patrimoine naturel	Patrimoine naturel	Population locale, biodiversité locale	<ul style="list-style-type: none"> - Richesse en faune et flore patrimoniales et/ou ordinaire (en nombre d'espèces, voire en nombre d'individus si pertinent) - Diversité spécifique du site par l'indice de Shannon (sans unité) - Nombre de foyers d'espèces exotiques envahissantes (ou recouvrement en m²) - Proportion d'espace vert urbain (en % de la surface totale du site) - Potentiel des zones susceptibles d'accueillir la biodiversité (en ha) 	<p>Après remédiation/réaménagement et réhabilitation, un site dégradé/ pollué peut devenir le support d'un patrimoine naturel riche.</p> <p>Le SE peut être évalué par la quantification de la biodiversité présente ainsi que du potentiel du site à accueillir la biodiversité. Les indicateurs de patrimonialité permettent de rendre compte de la présence d'espèces et/ou habitats protégés sur le site. L'indice de Shannon rend compte de la diversité spécifique du site.</p> <p>Le SE peut également être évalué via une analyse SIG pour calculer la proportion d'espaces verts localisés sur le site et à proximité (sur une zone tampon) pour indiquer les zones en mesure d'accueillir la biodiversité sur le site et autour du site.</p>

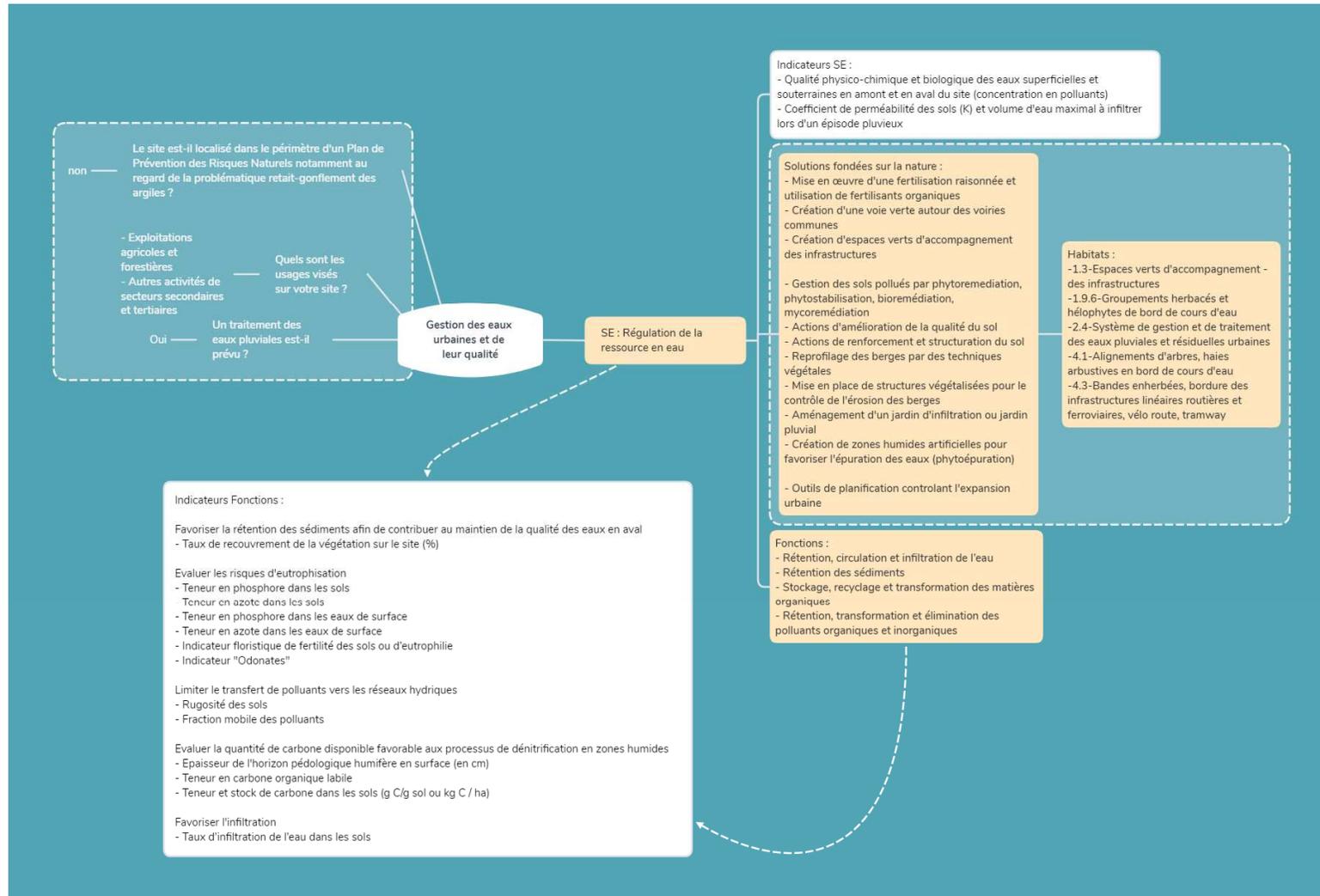
Adaptation au changement climatique

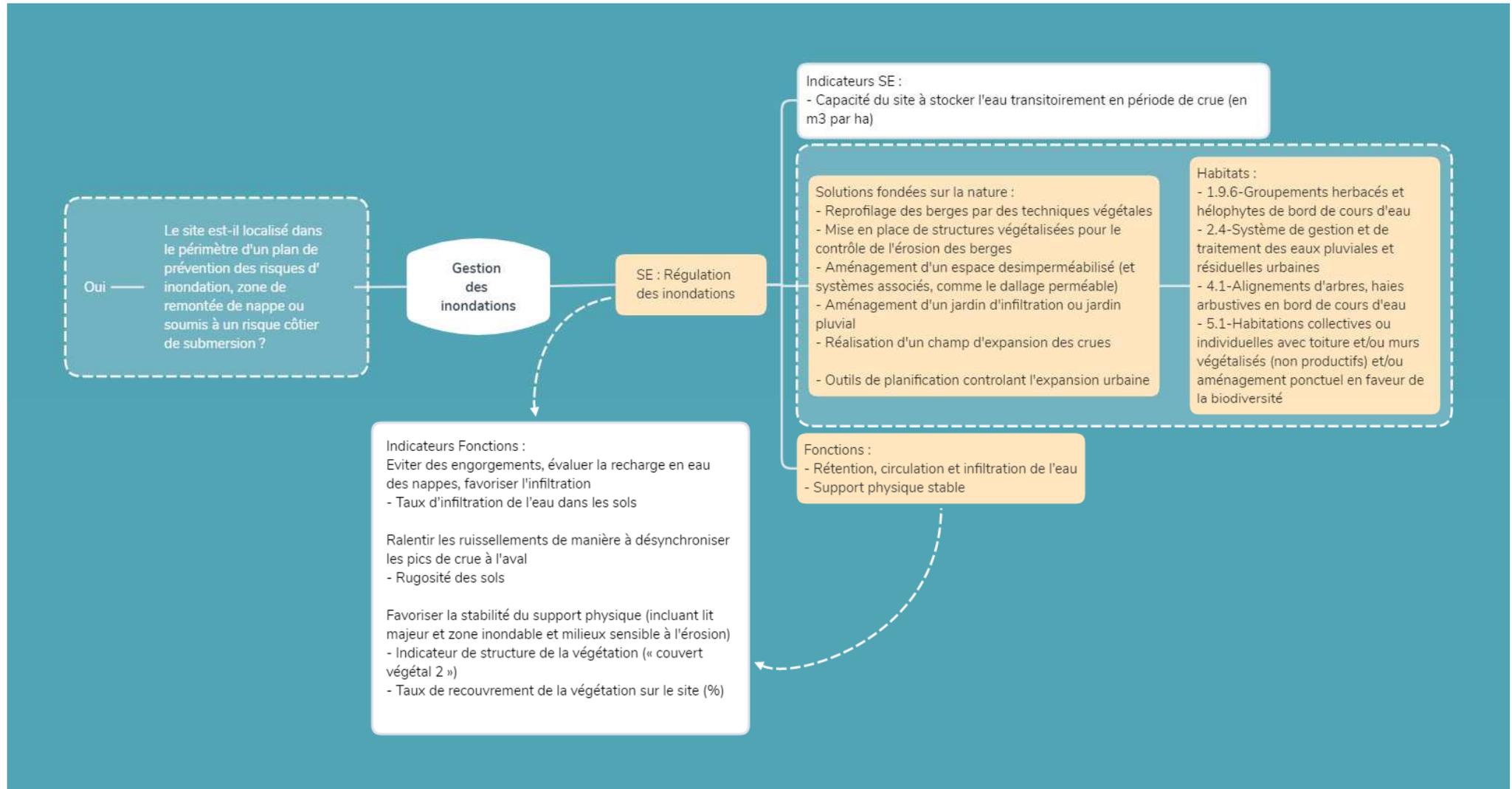


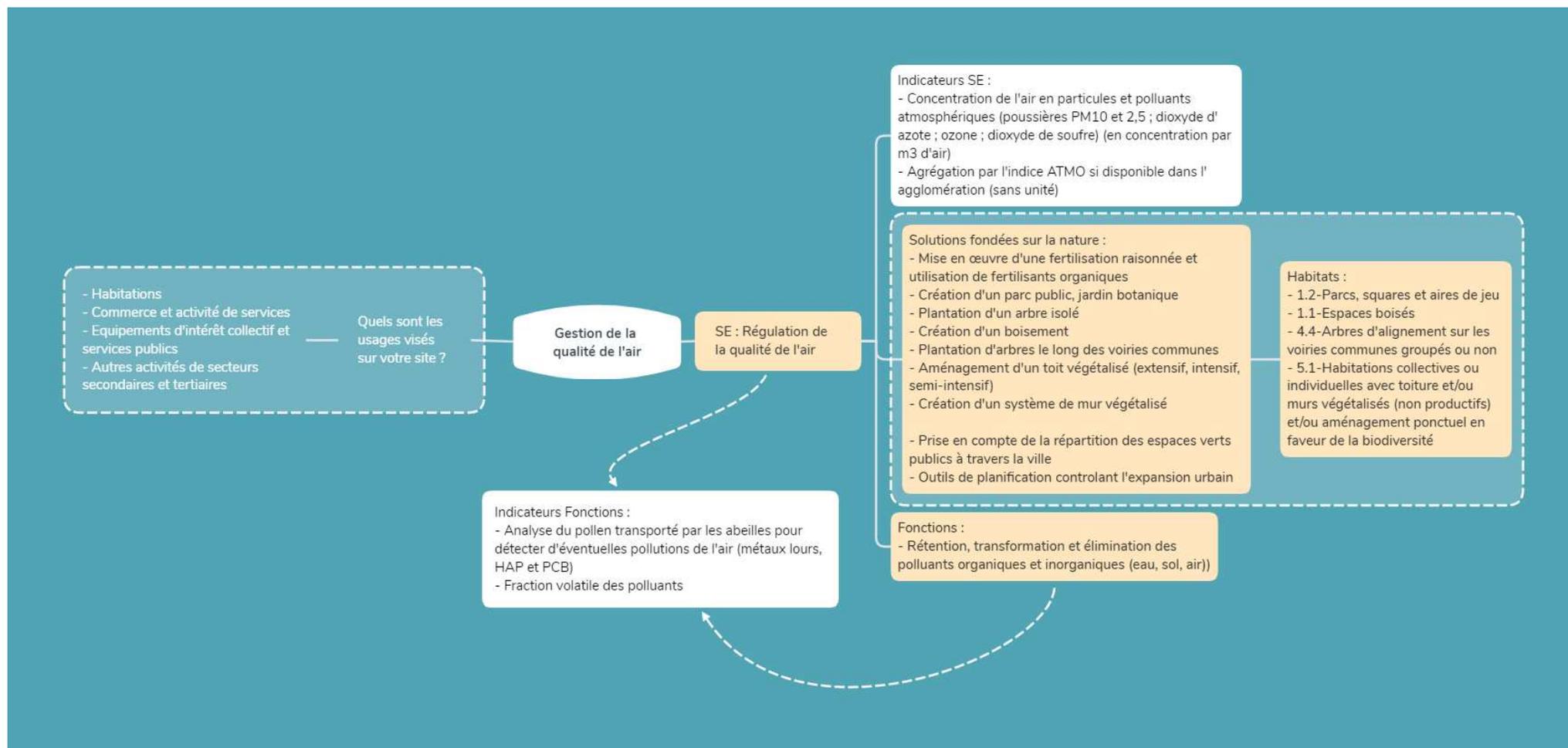
Atténuation au changement climatique



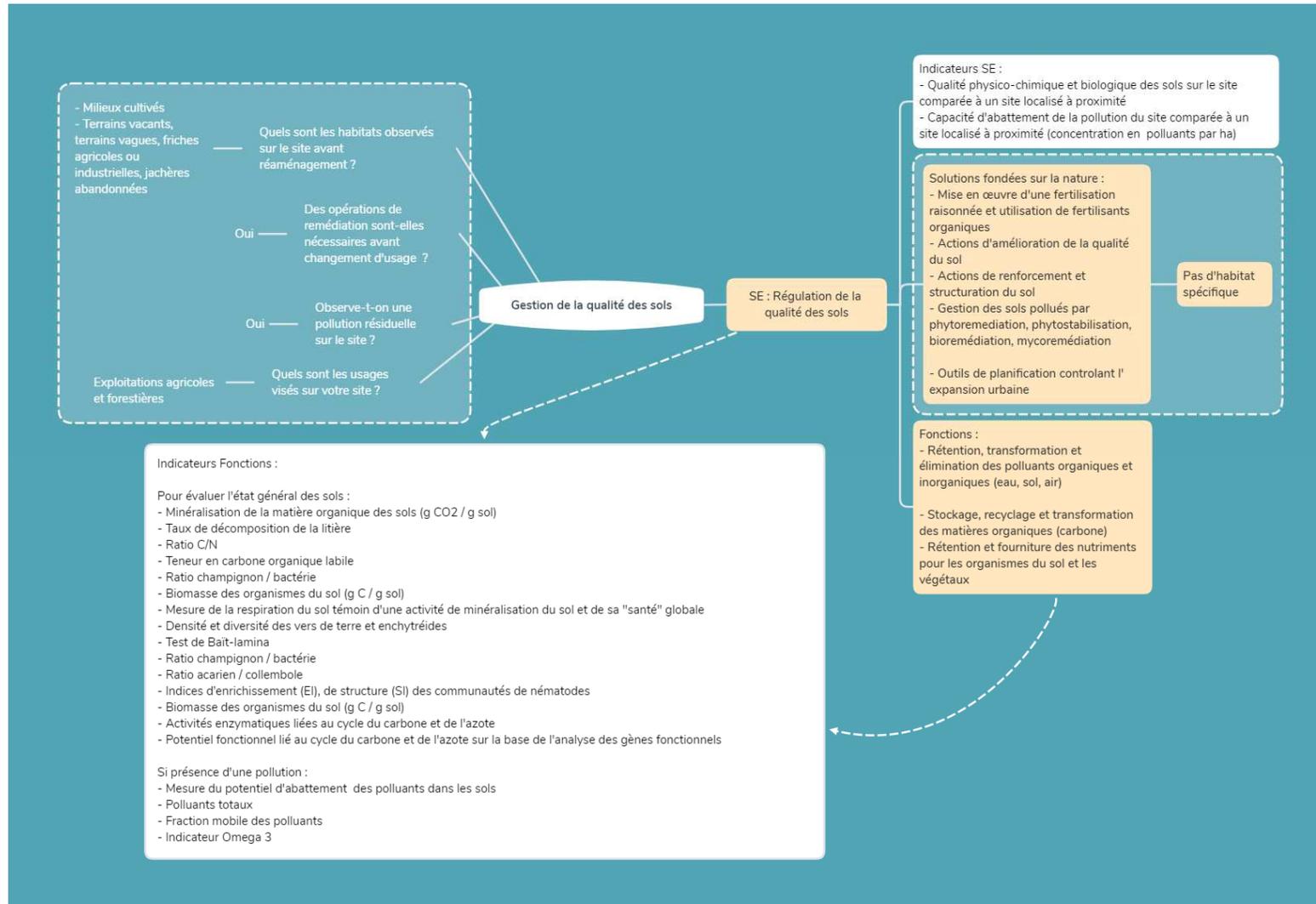
Gestion des eaux urbaines et de leur qualité



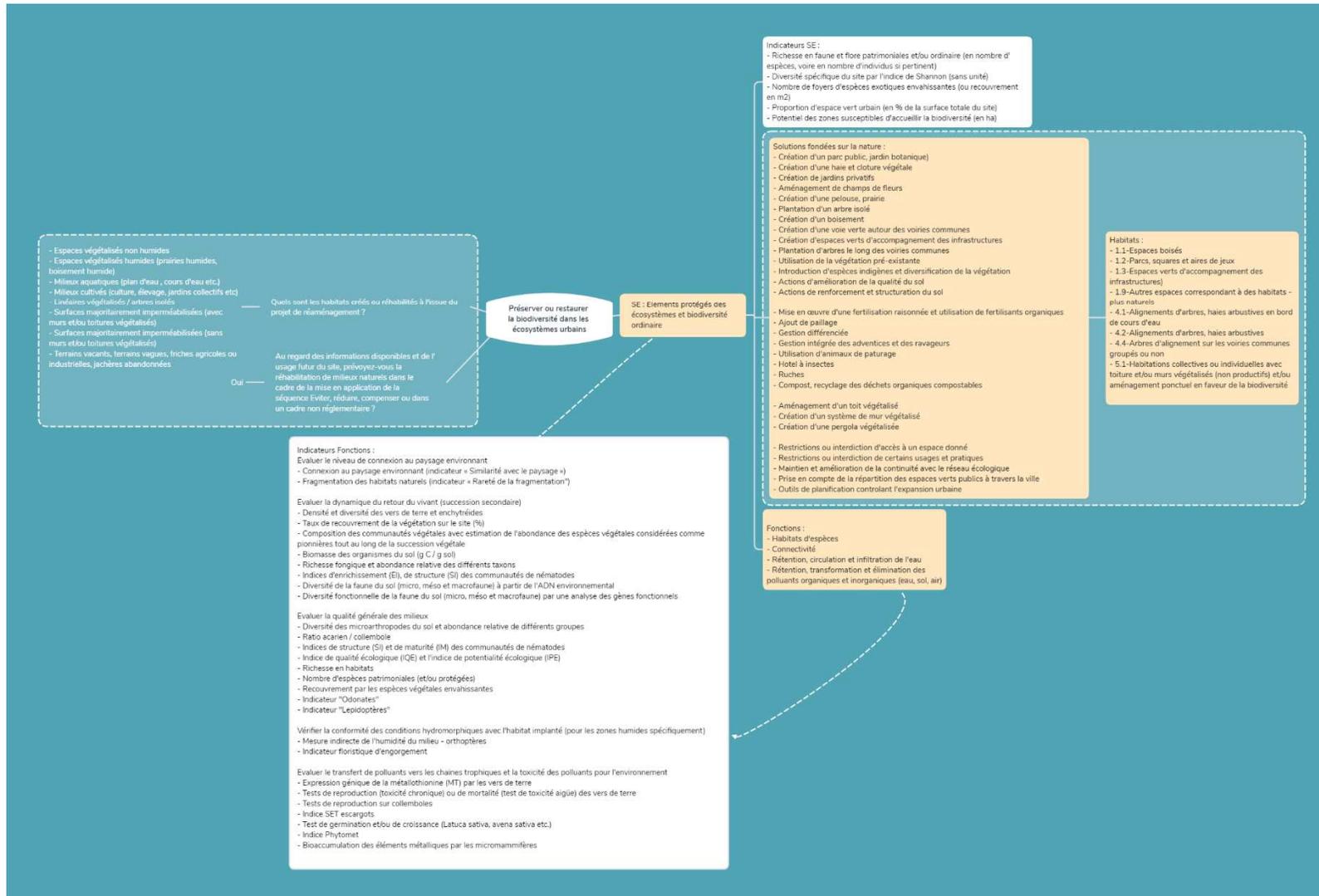




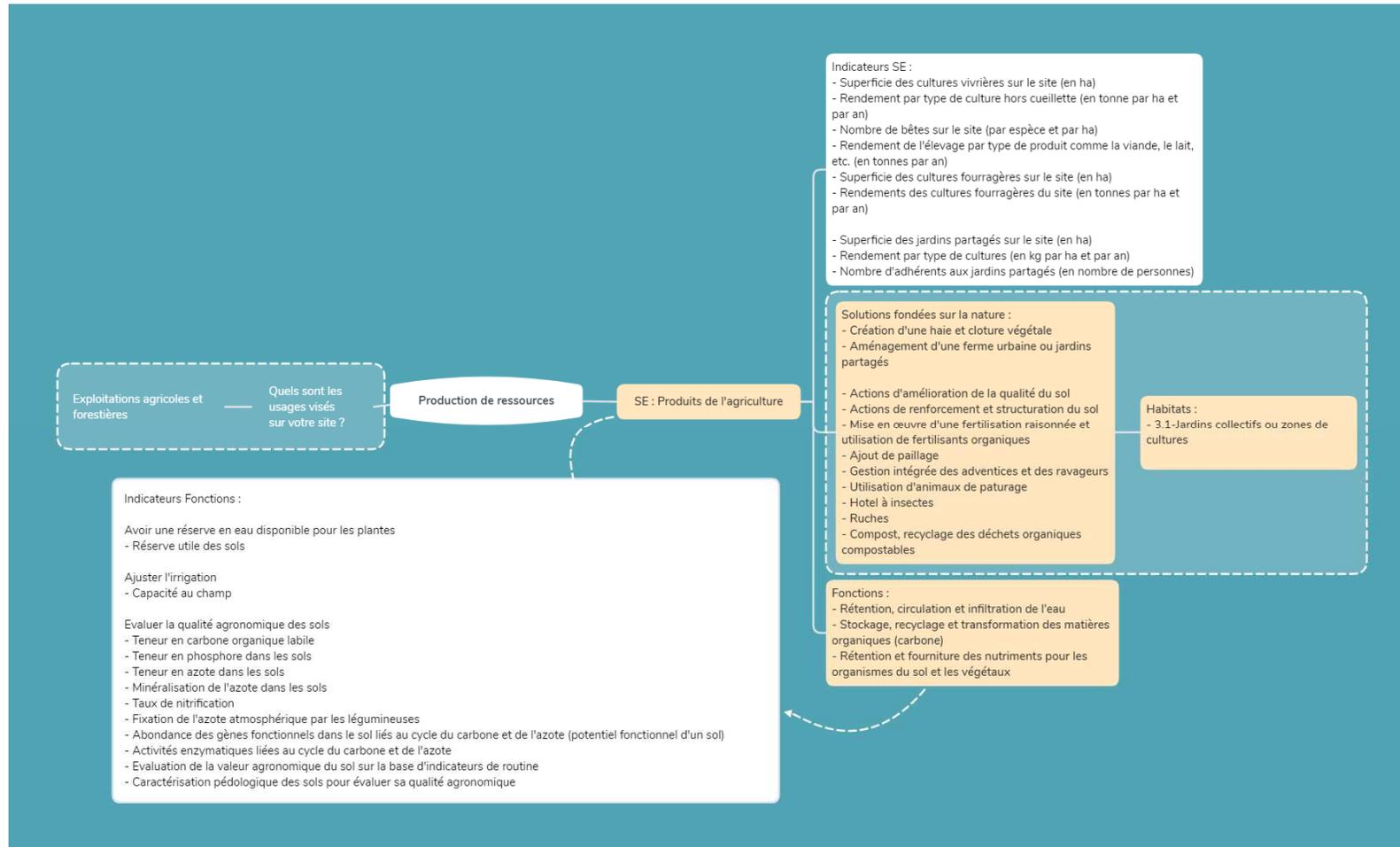
Gestion de la qualité des sols



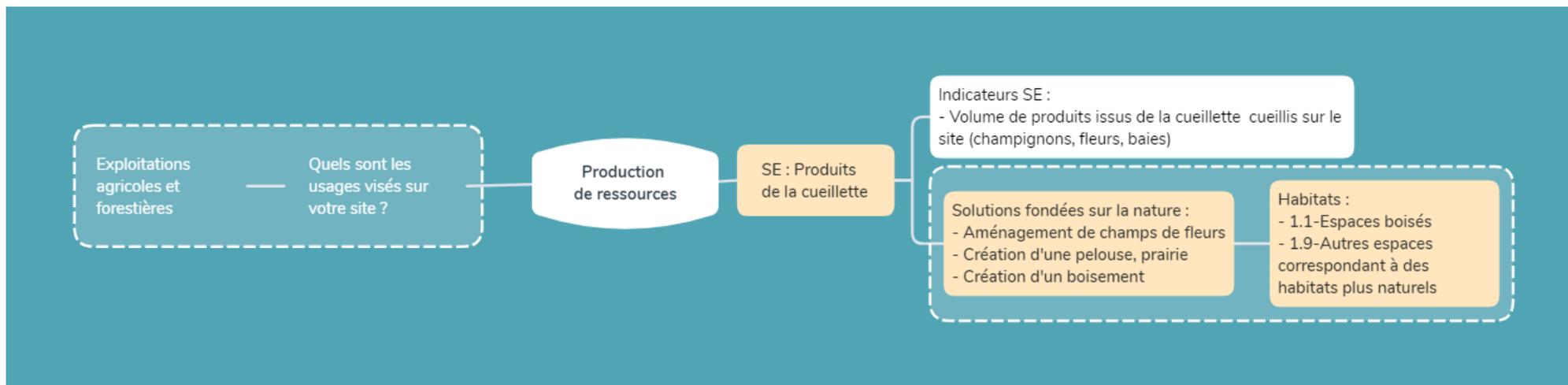
Préserver ou restaurer la biodiversité dans les écosystèmes urbains



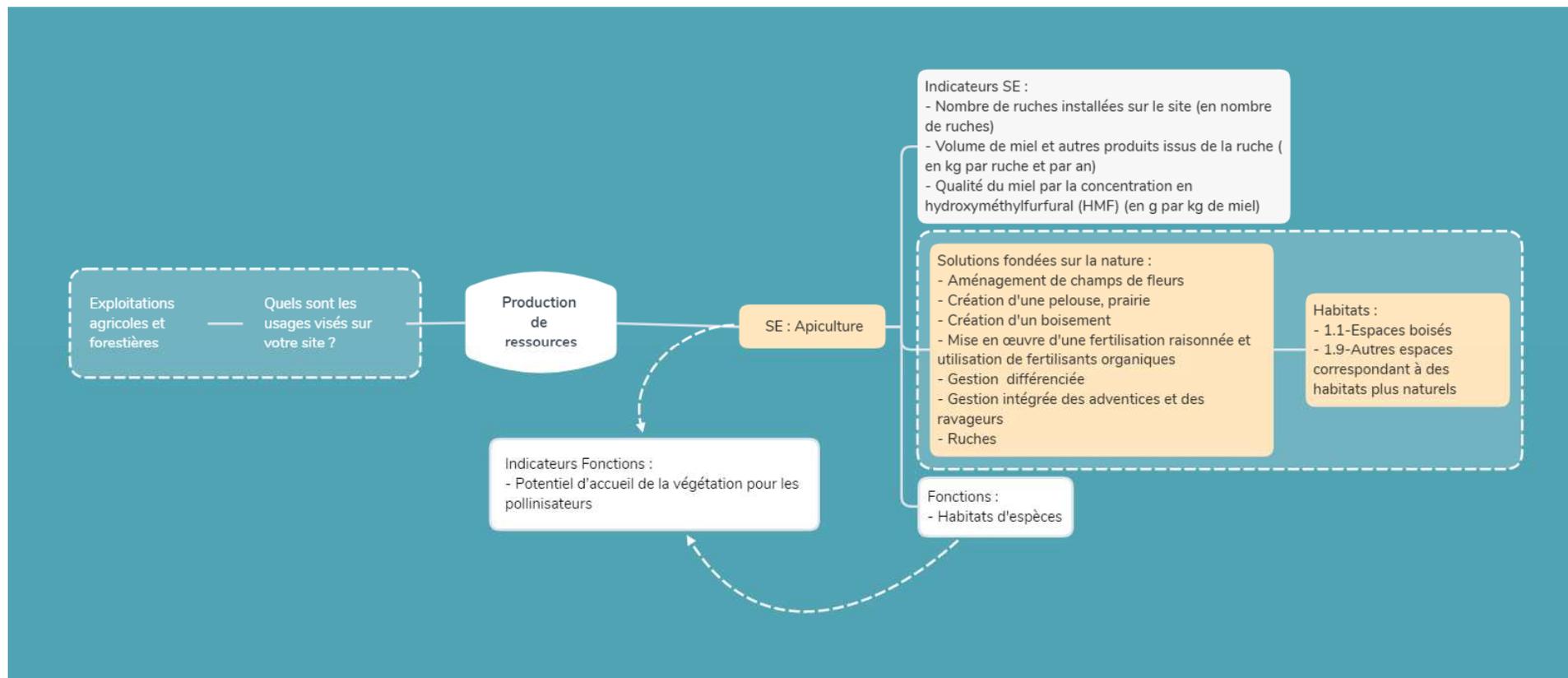
Production de ressources (production agricole)



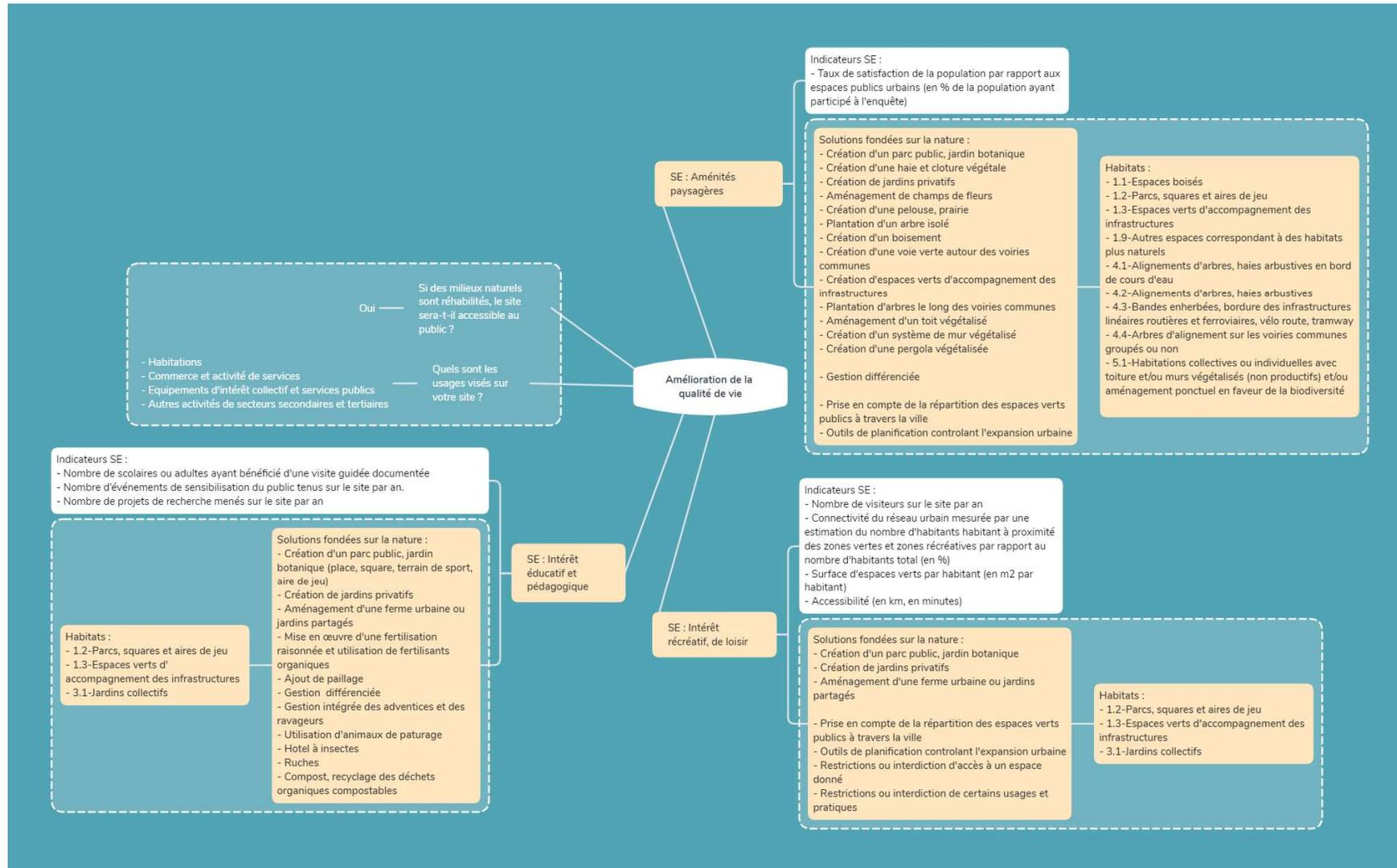
Production de ressources (produits de la cueillette)

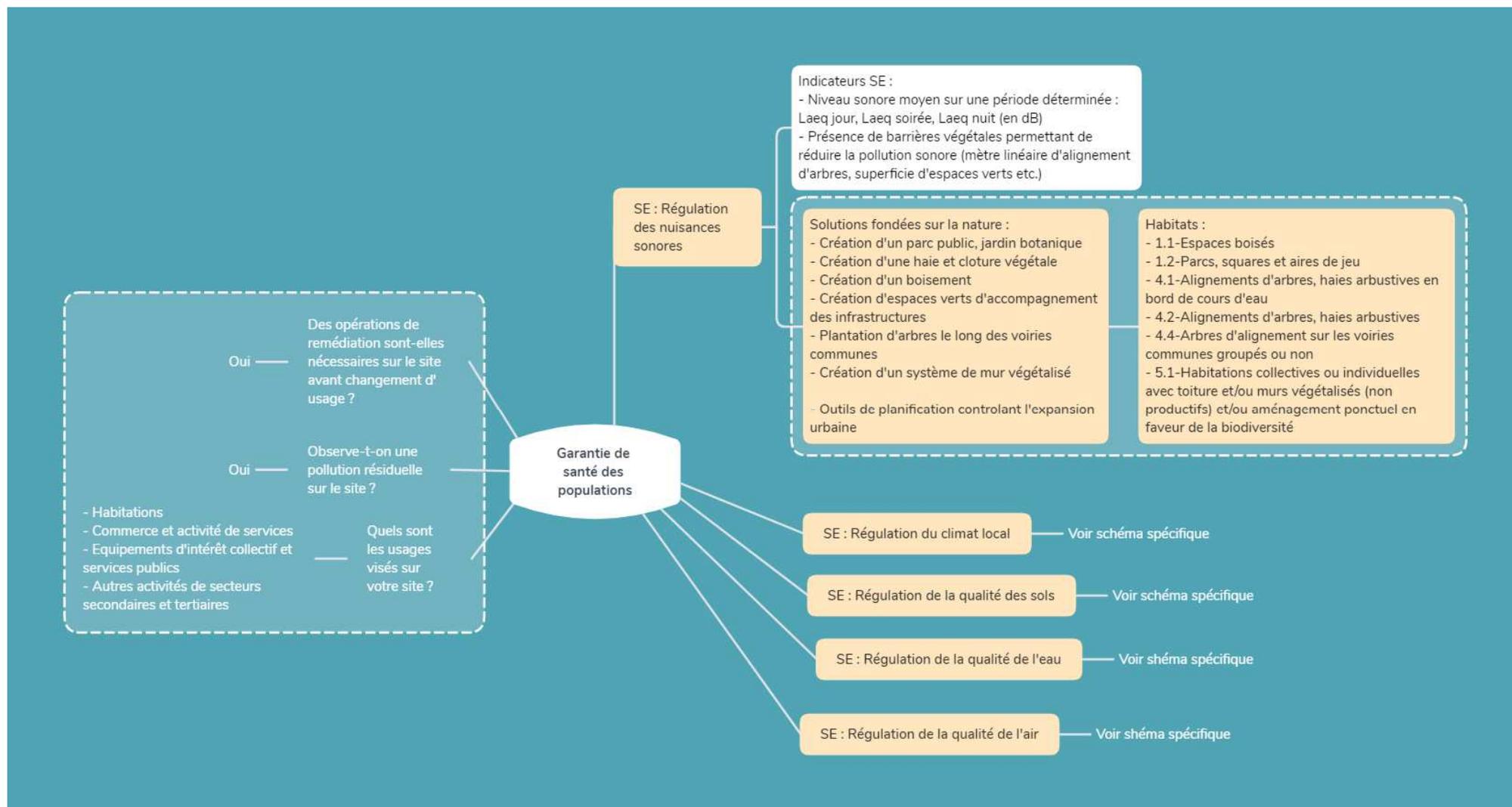


Production de ressources (apiculture)



Amélioration de la qualité de vie



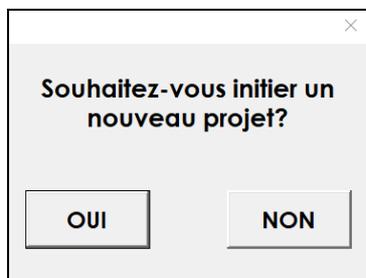


6- Présentation de l'outil par étape

L'outil de sélection des indicateurs a été conçu sous Excel et codé sous Visual Basic. La notice suivante permet de guider l'utilisateur dans sa manipulation de l'outil.

Étape 1. Ouverture du tableur et démarrage d'un nouveau projet

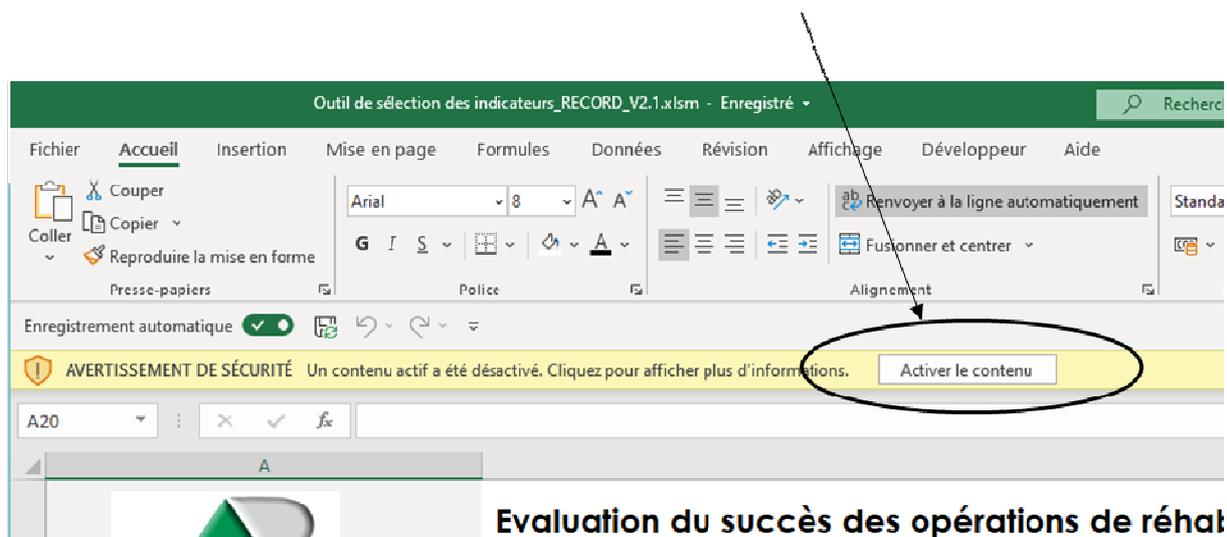
Au démarrage d'une nouvelle étude, une fenêtre apparaît demandant si vous souhaitez « initier un nouveau projet ».



Si c'est le cas, cliquez sur « **OUI** »

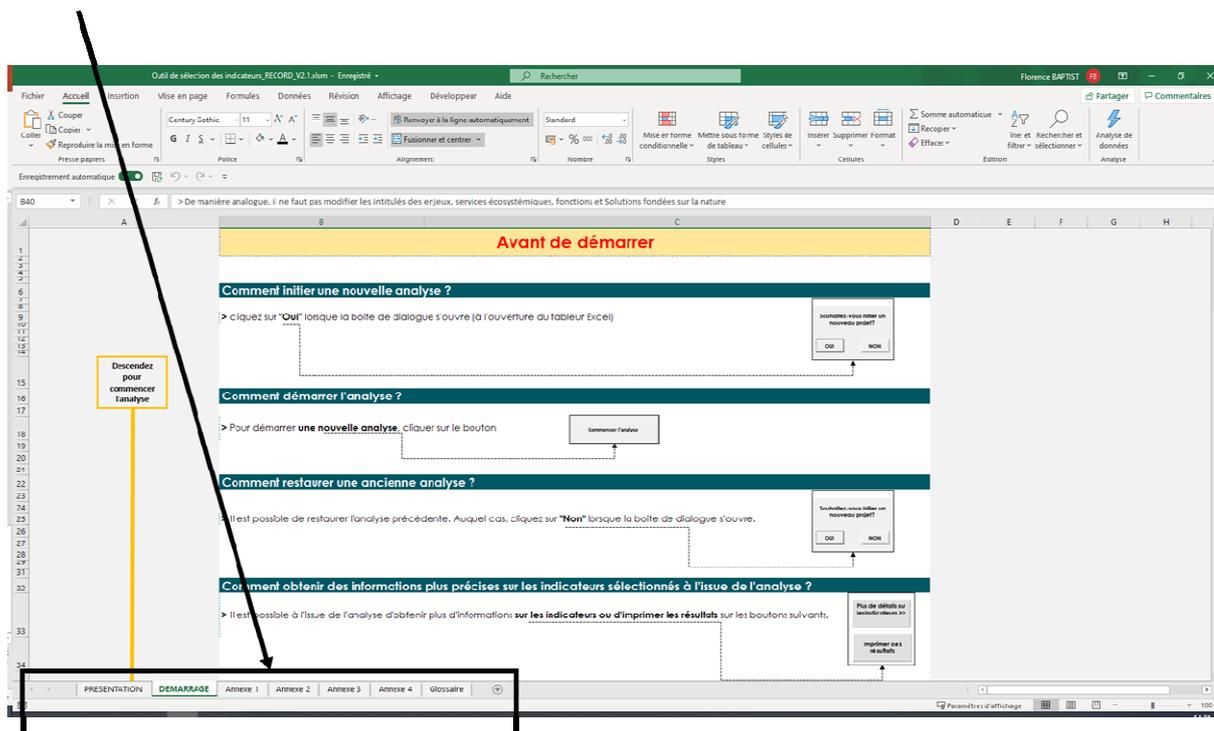
Si vous souhaitez reprendre l'étude sur laquelle vous travailliez précédemment cliquez sur « **NON** ».

Nota : il peut être nécessaire d'accepter la réalisation du programme Visual Basic, auquel cas, une bannière jaune apparaît au démarrage. Cliquez sur « Activer le contenu ».



Étape 2 : Présentation du tableau avant analyse

Au démarrage d'une nouvelle étude, sept onglets apparaissent.



Leur contenu est présenté dans le tableau ci-dessous.

Intitulé de l'onglet	Descriptif
PRESENTATION	Cet onglet présente le titre et le résumé de l'étude ainsi que la liste des auteurs.
DEMARRAGE	Cet onglet décrit les étapes permettant de démarrer une nouvelle analyse. Il présente également les règles d'utilisation et décrit les différents onglets qui seront produits à l'issue de l'analyse.
Annexe 1	Cet onglet présente la base de données complète des indicateurs de fonctions, une description succincte, la gamme de référence (si existante), une estimation du coût, le degré d'opérationnalité et les références bibliographiques disponibles.
Annexe 2	Cet onglet présente les bénéficiaires potentiels des services écosystémiques ainsi que les indicateurs permettant de les évaluer, les méthodes de mesure et les références bibliographiques.
Annexe 3	Cet onglet décrit les solutions fondées sur la nature proposées dans le cadre de cette étude ainsi que des exemples de solutions grises.
Annexe 4	Cet onglet présente pour chaque enjeu les liens entre services écosystémiques, fonctions, solutions fondées sur la nature et indicateurs. Ils ont été conçus sous la forme de mindmap.
Glossaire	Cet onglet reprend les définitions de tous les termes employés dans l'outil de sélection des indicateurs.

Étape 3 : Lancement de l'analyse

Pour démarrer une nouvelle analyse, allez sur l'onglet « DEMARRAGE » et déroulez jusqu'à atteindre le bouton « Commencer l'analyse ». Cliquez sur ce bouton.

Commencer l'analyse

Etape 4 : Remplissage de l'onglet « 1.Contexte »

Le premier onglet à compléter s'intitule « 1.Contexte ».

Dix questions permettent au porteur de projet de préciser le projet de réaménagement. Selon les réponses que vous apportez, certains enjeux sont préalablement et automatiquement cochés (voir étape suivante).

Répondez aux questions ci-dessous afin de préciser le contexte de votre projet

Questions relatives à la condition actuelle du site	
§ Le contexte dans lequel s'inscrit le site est-il urbain (plutôt que rural) ?	Informations complémentaires
<input type="checkbox"/> Oui	
<input type="checkbox"/> Non	
§ Quels sont les habitats observés sur le site avant réaménagement ?	Informations complémentaires
<input type="checkbox"/> Espaces végétalisés non humides	
<input type="checkbox"/> Espaces végétalisés humides (prairies humides, boisement humide)	
<input type="checkbox"/> Milieux aquatiques (plan d'eau, cours d'eau etc.)	
<input type="checkbox"/> Milieux cultivés (culture, élevage, jardins collectifs etc)	
<input type="checkbox"/> Linéaires végétalisés / arbres isolés	
<input type="checkbox"/> Surfaces majoritairement imperméabilisées (avec murs et/ou toitures végétalisés)	
<input type="checkbox"/> Surfaces majoritairement imperméabilisées (sans murs et/ou toitures végétalisés)	
<input type="checkbox"/> Terrains vacants, terrains vagues, friches agricoles ou industrielles, jachères abandonnées	
§ Le site est-il localisé dans le périmètre d'un plan de prévention des risques d'inondation, zone de remontée de nappe ou soumis à un risque côtier de submersion ?	Informations complémentaires

1.Contexte | 2.Enjeux | Annexe 1 | Annexe 2 | Annexe 3 | Annexe 4 | Glossaire | +

Il est possible de préciser certaines réponses en remplissant le champs « Informations complémentaires ». L'ensemble des informations complémentaires seront reprises dans la synthèse des résultats de l'analyse.

Attention : Aucune autre cellule ne doit être complétée ou modifiée, notamment dans les bandes grises.

Lorsque le questionnaire a été complété, cliquez sur le bouton « Suivant » :

Suivant >>

Etape 5 : Remplissage de l'onglet « 2.Enjeux »

Le second onglet propose une liste d'enjeux présélectionnés sur la base des réponses apportées à l'étape précédente. Il est possible de modifier complètement cette pré-sélection en cochant ou décochant, si les enjeux sélectionnés sont trop restreints ou au contraire vont au-delà de votre projet.

A partir de la liste proposée, sélectionner les enjeux sociaux et environnementaux auxquels le projet de réaménagement doit répondre en priorité

Les cases ont été pré-cochées en fonction de vos réponses aux questions précédentes.

Catégorie	Enjeu
 CLIMAT	<input checked="" type="checkbox"/> Atténuation du changement climatique <input type="checkbox"/> Adaptation au changement climatique
 ENVIRONNEMENT	<input type="checkbox"/> Gestion des eaux urbaines et de leur qualité <input type="checkbox"/> Gestion des inondations <input type="checkbox"/> Gestion de la qualité de l'air <input type="checkbox"/> Gestion de la qualité des sols <input checked="" type="checkbox"/> Préserver ou restaurer la biodiversité dans les écosystèmes urbains
 RESSOURCES	<input type="checkbox"/> Production de ressources (eau, énergie, alimentation)
 SANTE PUBLIQUE ET BIEN-ETRE	<input checked="" type="checkbox"/> Amélioration de la qualité de vie <input type="checkbox"/> Garantie de santé des populations

Informations complémentaires

RRAGE | 1.Contexte | **2.Enjeux** | Annexe 1 | Annexe 2 | Annexe 3 | Annexe 4 | Glossaire | +



L'enjeu « atténuation du changement climatique » correspond à l'enjeu lié à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et/ou au stockage du carbone. L'enjeu « adaptation au changement climatique » correspond à l'enjeu lié à la température urbaine comme par exemple la lutte contre les îlots de chaleur. L'ensemble des problématiques visées par chaque enjeu est disponible dans la feuille annexe 4 de l'outil et en section 3 de ce rapport.

Une fois les enjeux définis, cliquez sur le bouton « Suivant ».

Suivant >>

Etape 6 : Remplissage de l'onglet « 3.Services fournis »

Le troisième onglet propose une liste de services écosystémiques présélectionnés sur la base des réponses apportées à l'étape précédente (étape 4). Il est possible de modifier complètement cette pré-sélection en cochant ou décochant, si les services écosystémiques sélectionnés sont trop restreints ou au contraire vont au-delà de votre projet.

A partir de la liste proposée, sélectionner les services attendus du projet de réaménagement

Les cases ont été pré-cochées en fonction de vos réponses aux questions précédentes.

Catégorie de Services Ecosystémiques	Intitulé
Biens issus des écosystèmes	<input type="checkbox"/> Produits de l'agriculture <input type="checkbox"/> Produits de la cueillette <input type="checkbox"/> Apiculture
Services de régulation	<input checked="" type="checkbox"/> Régulation du climat global <input type="checkbox"/> Régulation du climat local <input type="checkbox"/> Régulation de la qualité de l'air <input type="checkbox"/> Régulation des nuisances sonores <input type="checkbox"/> Régulation des inondations <input type="checkbox"/> Régulation de la qualité de l'eau <input type="checkbox"/> Régulation de la qualité des sols
Services culturels	<input checked="" type="checkbox"/> Intérêt récréatif, de loisir <input checked="" type="checkbox"/> Aménités paysagères <input checked="" type="checkbox"/> Intérêt éducatif et pédagogique
Patrimoine naturel	<input checked="" type="checkbox"/> Eléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire

Informations complémentaires

DEMARRAGE | 1.Contexte | 2.Enjeux | **3.Services fournis** | Annexe 1 | Annexe 2 | Annexe 3 | Annexe 4 | Glossaire | + | < | >



Le service « Régulation du climat global » correspond au service rendu par les milieux naturels consistant à stocker du carbone et ainsi à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le service « Régulation du climat local » correspond aux services rendus par les milieux naturels pour réduire par exemple la température ambiante (réduction des îlots de chaleur).

Le service « Aménités paysagères » correspond à l'esthétisme des paysages et au bien-être qu'ils génèrent chez les gens.

Une fois les services définis, cliquez sur le bouton « Suivant ».

Suivant >>

Etape 7 : Présentation des résultats

Les résultats sont successivement présentés sur les onglets « 4. SfN » et « 5.Résultats ».

Pour passer du premier au second, il suffit de cliquer sur « Suivant ».

Suivant >>

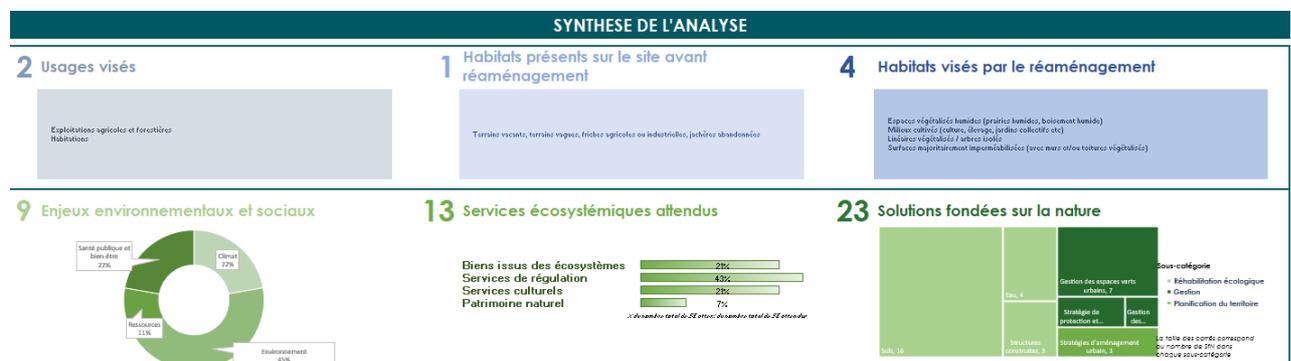
L'onglet « 4. SfN » propose la liste des solutions fondées sur la nature de planification, réhabilitation ou de gestion qui répondent aux services écosystémiques ciblés. En parallèle, sont listés comme exemples les solutions grises communément employées pour traiter les mêmes enjeux.

A partir de la liste proposée, sélectionner les solutions fondées sur la nature adaptées à votre projet											
Les cases ont été pré-cochées en fonction de vos réponses aux questions précédentes.											
Solutions liées à la planification du territoire											
SOUS-TYPE	CATEGORIE	INTITULE DE LA SFN	SOLUTIONS GRISSES (EXEMPLES)								
Stratégies d'aménagement urbain		<input checked="" type="checkbox"/> Maintien et amélioration de la continuité avec le réseau écologique	Tunnels ou passages à faune non végétalisés								
		<input checked="" type="checkbox"/> Prise en compte de la répartition des espaces verts publics à travers la ville	Répartition hétérogène des espaces verts								
Stratégies de protection et conservation		<input checked="" type="checkbox"/> Outils de planification contrôlant l'expansion urbaine	Augmentation du taux de surfaces construites en ville et de la fréquentation des espaces verts restants								
		<input checked="" type="checkbox"/> Restriction ou interdiction d'accès à un espace donné									
		<input checked="" type="checkbox"/> Restriction ou interdiction de certains usages et pratiques									
Solutions de gestion											
SOUS-TYPE	CATEGORIE	INTITULE DE LA SFN	SOLUTIONS GRISSES (EXEMPLES)								
Gestion des espaces verts urbains	Intervention humaines directes	<input checked="" type="checkbox"/> Mise en œuvre d'une fertilisation raisonnée et utilisation de fertilisants organiques	Utilisation de fertilisants minéraux								
		<input checked="" type="checkbox"/> Ajout de paillage	Accroissement de l'irrigation pour le maintien des espaces verts								
	Utilisation de la faune	<input checked="" type="checkbox"/> Gestion différenciée		Plan de gestion classique, usage de produits phytosanitaires, pratiques intensives							
<input checked="" type="checkbox"/> Gestion intégrée des adventices et des ravageurs			Usage de produits chimiques sans combinaison avec d'autres solutions plus raisonnées								
Gestion des déchets	Compost	<input checked="" type="checkbox"/> Utilisation d'animaux de pâturage	Tonte et élagage avec outils mécaniques conventionnels								
		<input checked="" type="checkbox"/> Hérité à insectes									
		<input checked="" type="checkbox"/> Ruches									
		<input checked="" type="checkbox"/> Compost, recyclage des déchets organiques compostables	Gestion conventionnelle des déchets par un prestataire. Amendements de synthèse pour les pratiques dans l'agriculture.								
Solutions de réhabilitation écologique / création d'habitats											
ATION	DEMARRAGE	1.Contexte	2.Enjeux	3.Services fournis	4.SfN	Annexe 1	Annexe 2	Annexe 3	Annexe 4	Glossaire	+

L'onglet « 5.résultats » présente de manière synthétique l'ensemble des données d'entrées et de sortie sur le modèle d'un tableau de bord.

Les deux premières lignes indiquent :

- Le nombre et le type d'usages visés sur le site ;
- Le nombre et le type d'habitats présents sur le site avant réaménagement (sur la base d'une typologie simplifiée) ;
- Le nombre et le type d'habitats visés par le réaménagement ;
- Le nombre d'enjeux adressés par le projet (nombre et % par grande catégorie – climat, Ressources, Environnement et Santé publique et bien-être) ;
- Le nombre de services écosystémiques attendus (nombre et % selon les 3 catégories de services et la catégorie « patrimoine naturel ») ;
- Le nombre de solutions fondées sur la nature proposées par type et sous-type de mesure.



La troisième ligne dénombre les fonctions, les services écosystémiques ciblés par le projet et les indicateurs associés qu'il est possible de suivre.

Les tableaux présentent la sélection d'indicateurs correspondants pour les fonctions et les services.

8 Fonctions écologiques et 70 indicateurs de fonctions associés			13 Services écosystémiques et 34 indicateurs de services associés		
Service écosystémique	Fonction écologique associée	Objectif visé	Indicateur de fonction		
Produits de l'agriculture	Rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux	Evaluer la qualité organique du sol	Teneur en carbone organique labile	Teneur en azote	Teneur en phosphore
			Teneur en azote	Teneur en phosphore	Teneur en potassium
Apiculture	Habitats d'espèces	Assurer la survie des espèces	Présence de cavités disponibles pour les pollinisateurs	Présence de cavités disponibles pour les pollinisateurs	Présence de cavités disponibles pour les pollinisateurs
			Présence de cavités disponibles pour les pollinisateurs	Présence de cavités disponibles pour les pollinisateurs	Présence de cavités disponibles pour les pollinisateurs
Régulation du climat global	Stockage, recyclage et transformation des matières organiques (arbores)	Contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)
			Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)
Régulation du climat local	Contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques (température, hygrométrie)	Contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)
			Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)
Régulation de la qualité de l'air	Régulation de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques (température, hygrométrie)	Contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)
			Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux	Evaluer la qualité organique du sol	Teneur en carbone organique labile	Teneur en azote	Teneur en phosphore
			Teneur en azote	Teneur en phosphore	Teneur en potassium
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants atmosphériques et atmosphériques (AMH)	Contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)
			Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)
Régulation de la qualité de l'eau	Stockage, recyclage et transformation des matières organiques (arbores)	Contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)
			Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants atmosphériques et atmosphériques (AMH)	Contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)
			Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)	Indicateur de structure de la végétation (C) (contient végétal 2)

1. Contexte 2. Enjeu 3. Services fournis 4. SfN 5. Résultats Annexe 1 Annexe 2 Annexe 3 Annexe 4 Glossaire

Enfin, il est possible d'afficher la liste des indicateurs et de sauvegarder les résultats en PDF en cliquant sur les boutons suivants.

Plus de détails sur les indicateurs >>

Sauvegarder ces résultats en PDF

Dans ce cas, deux nouveaux onglets apparaissent « BD_outil1 » et « BDoutil2 » présentant dans le détail la sélection des indicateurs Fonctions et services écosystémiques présentés sur l'onglet « 5. Résultats ».



Attention : nous recommandons de ne pas toucher à ces deux onglets. Chaque indicateur est décrit précisément dans les annexes 1 et 2. Il suffit d'utiliser l'outil « Filtrer » pour aller chercher les indicateurs qui vous intéressent.

Filtrer pour ne faire apparaître que les indicateurs qui vous intéressent

BASE DE DONNEES : Indicateurs de Fonctions

Fonctions	SF	Habitats créés	Pour répondre à quelle question?	Indicateur direct témoin de l'expression de la fonction associée	Méthodes de mesures	Comm
connectivité	Éléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire	.	Évaluer le niveau de fragmentation des habitats naturels	Fragmentation des habitats naturels (Indicateur « Réseaux de la fragmentation »)	Évaluation du linéaire de lisière qui concourt à fragmenter le site et empêcher le déplacement des espèces	Plus l'indicateur est proche de fragmentation des habitats du
connectivité	Éléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire	.	Évaluer le niveau de connexion au paysage environnant	Connexion au paysage environnant (Indicateur « Similarité avec le paysage »)	Indicateur visant à vérifier le niveau de similarité des habitats du site avec ceux présents à proximité afin de maximiser la connectivité.	Plus l'indicateur est proche de similaires aux habitats observés (tampon de 1 km autour du site) paysage environnant est impor
contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques (température, hygrométrie)	Régulation du climat local	.	Connaitre la contribution d'un habitat ou plusieurs habitats à abaisser la température en ville (îlot de fraîcheur)	Indice de verdossement	Estimation de la superficie végétalisée par rapport à la surface totale du site (par exemple calcul du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) par imagerie satellitale ou cartographie des habitats) Estimation de la superficie d'espaces verts par habitant	Estimation de la superficie d'es LUISA - LC): Moyenne en Europe (2020) : 49 Min/ max in Europe : 0-4 m2 /h
						Le nombre d'arbres par habitant l'autre. Ainsi Berlin (Allemagne) villes européennes les plus boi

En synthèse

L'outil de sélection des indicateurs met donc en jeu 7 onglets supplémentaires qui s'additionnent aux 7 initiaux à l'ouverture du tableur Excel.

Ces 7 onglets sont décrits dans le tableau ci-dessous.

Intitulé de l'onglet	Descriptif
1. Contexte	Définissez les enjeux de votre site à réhabiliter en répondant à 10 questions.
2. Enjeux	En fonction des réponses apportées sur la feuille "contexte", certains enjeux sont automatiquement cochés. Vous avez la possibilité de modifier la sélection automatique en cochant ou décochant.
3. Services fournis	Selon les enjeux ciblés, une liste de services écosystémiques vous est automatiquement proposée. Là également, vous avez la possibilité de modifier la sélection automatique en cochant ou décochant.
4. SFN (Solutions fondées sur la Nature)	Selon les éléments entrés dans l'onglet 4, une liste de solutions fondées sur la nature adaptées à votre projet vous est proposée.
5. Résultats	Une synthèse des résultats est proposée précisant les types de services écosystémiques et les fonctions favorisées par votre projet de réhabilitation, le type de SFN à privilégier et les indicateurs permettant de suivre l'efficacité des mesures de réhabilitation et le retour des fonctions.
BD_outil1	Le tableau présenté dans cet onglet est utilisé pour faire fonctionner l'outil. Il est en général "caché" par sécurité. Il ne doit pas être modifié.
BD_outil2	Le tableau présenté dans cet onglet est utilisé pour faire fonctionner l'outil. Il est en général "caché" par sécurité. Il ne doit pas être modifié.

7- Conclusion et perspectives

Cette étude visait à concevoir une démarche conceptuelle et méthodologique permettant :

- d'orienter un projet de réaménagement de façon à favoriser la réhabilitation écologique d'une partie de l'écosystème urbain par la mise en œuvre de solutions fondées sur la nature et ainsi promouvoir la fourniture de services écosystémiques ;
- de créer des outils permettant de suivre par le biais d'indicateurs la restauration du fonctionnement de ces écosystèmes urbains et des SE qui y sont associés.

Le travail réalisé dans le cadre de cette étude a abouti à la construction d'un prototype sous Excel permettant à un porteur de projet d'identifier les **solutions fondées sur la nature** qu'il pourrait mettre en place selon les **enjeux** de son site ainsi que les **indicateurs de suivi des services écosystémiques et des fonctions** pour vérifier le succès de la réhabilitation écologique.

Une notice d'utilisation de cet outil est proposée pour accompagner sa prise en main et un atelier d'acculturation a été organisé afin de vérifier qu'il répond aux besoins des porteurs de projet. Cet atelier a également été entrepris afin d'assurer la diffusion effective de l'outil et l'essaimage des solutions d'aménagement fondées sur la nature dans les sphères propres aux acteurs de l'aménagement.

Au-delà de la conception de cet outil, ce travail a permis d'établir une liste très complète d'indicateurs de fonctions et de services écosystémiques qui peuvent être utilisés dans un cadre plus large que celui de cette étude. C'est à notre connaissance, la première fois en France qu'une telle base de données est constituée.

De manière générale, l'ensemble des résultats viennent donc enrichir la panoplie d'outils mis à disposition des porteurs de projets pour concevoir des projets de moindre impact environnemental et contribuant à réduire l'artificialisation des territoires.

Différentes perspectives peuvent être évoquées pour le devenir de l'outil.

Cet outil mériterait d'être pris en main, testé et amélioré en appui de diagnostic ou de suivi de projets de réaménagement réels afin de vérifier qu'il est en mesure de prendre en compte l'ensemble des spécificités locales du site concerné.

Par ailleurs, pour l'heure, cet outil ne permet pas de comparer différents scénarii d'aménagement (intégrant les solutions fondées sur la nature et les solutions grises) et leurs incidences sur les fonctions et services écosystémiques ainsi restaurés. Le prototype pourrait donc être amélioré de manière à permettre cette comparaison et constituer un outil d'aide à la décision à proprement parler pour les porteurs de projets.

Dans cette optique, il serait également intéressant d'établir un comparatif des coûts entre les différents scénarii envisagés, puisque l'aspect économique constitue un argument crucial lors du choix d'un scénario par un porteur de projet. Enfin, afin de compléter cet argumentaire décisionnel, ce travail pourrait être enrichi d'une comparaison des coûts et bénéfices socio-économiques liés à chaque type de scénario. Une évaluation des bénéfices sociaux et économiques liés à la fourniture de services pourrait ainsi être réalisée par le biais d'une analyse des coûts évités et des valeurs d'usage et de non-usage des SE rendus par les deux types de solutions (grises, ou fondées sur la nature).

Références bibliographiques

- Ademe, INERIS 2012.** Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués – état de l’art et guide de mise en œuvre 86p.
- Ademe. 2014.** Biodiversité et reconversion des friches urbaines polluées. *Collection Connaître pour agir.* 19 p.
- Ademe. 2017.** Microbiologie moléculaire au service du diagnostic environnemental. 174 p.
- Aronson J., Floret C., Floc’h E., Ovalle C., Pontanier R. 1993.** Restoration and Rehabilitation of Degraded Ecosystems in Arid and Semi-Arid Lands. II. Case Studies in Southern Tunisia, Central Chile and Northern Cameroon. *Restoration Ecology* 1, 168–187
- Aronson J., 2010.** Restauration, réhabilitation, réaffectation : ce que cachent les mots. *Espaces naturels* n°29.
- AIVF. 1995.** Typologie des espaces verts.
- Balian E., Eggermont H., Le Roux X. 2014.** Outputs of the Strategic Foresight workshop “Nature-Based Solutions in a BiodivERsA context, Brussels June 11-12. BiodivERsA report, 45p.
- Baptist F., Disca T., Hellal J., Limasset E., Horiot M. et Binet T. 2018.** Mesure de la biodiversité et évaluation des services écosystémiques des milieux restaurés. Méthodes et retours d’expériences. RECORD 17-1021/1A.
- Bouagal F. 2012.** La dépense de réhabilitation des sites et sols pollués en France. *Observations et Statistiques - Commissariat Général au Développement Durable.* N° 142. 4 p.
- Bouchez T., Blieux A.L., Dequiedt S. et al. 2016.** Molecular microbiology methods for environmental diagnosis. *Environ Chem Lett.* 14: 423.
- Brahic et Terreaux, 2009.** Évaluation économique de la biodiversité : Méthodes et exemples pour les forêts tempérées.
- Buisson E. 2011.** Community and restoration ecology, importance of disturbance, natural resilience and assembly rules (Thèse d’Habilitation à Diriger les Recherches -Université d’Avignon et des Pays de Vaucluse)
- Convention Citoyenne pour le Climat (CCC). 2020.** Se Loger – Lutter contre l’artificialisation des sols Document à transmettre aux parlementaires et citoyens. Groupe de travail. <https://propositions.conventioncitoyennepourleclimat.fr/objectif/lutter-contre-lartificialisation-des-sols-et-letalement-urbain-en-rendant-attractive-la-vie-dans-les-villes-et-les-villages/>
- CGDD. 2018a.** Objectif « Zéro artificialisation nette ». Eléments de diagnostic. Fiche THEMA. 4 p.
- CGDD. 2018b.** Les écosystèmes Urbain - l’Évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques (CEREMA) Analyse Théma et Rapport technique http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/epub/efese_ecosystemes_urbains_cle2e6fdf.epub EFESE 2013
- Cl:aire. 2011.** A review of published sustainability indicators sets: How applicable are they to contaminated land remediation indicator-set development. CL:AIRE, London.
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. and Maginnis, S. 2016.** Nature-based Solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland: UICN. xiii + 97pp.
- Costanza R, d’Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O’neill RV, Paruelo J. 1997.** The value of the world’s ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253–260.
- DSS, 2010.** Technical Report: Valuation of ecological goods and services in Canada’s natural resources sectors. *Environnement Canada.* 43 p.
- EC. 2011.** Communication to the EU Parliament, the Council, the European Economic and Social ? Committee and the Committee of the Regions, Roadmap to a Resource Efficient Europe /* COM/2011/0571 final. 26 pp.
- Ferber U, Grimski D., Millar K. and Nathanail P. 2006.** Sustainable Brownfield Regeneration, Cabernet Network Report, 136p.

- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., ... & Hua, F. 2019.** International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration Ecology*, 27, S1-S46.
- Hilde Eggermont et al. 2015.** Nature-based Solutions: New Influence for Environmental Management and Research in Europe. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*. **24(4)** pp. 243-248
- Institut national de l'environnement industriel et des Risques (INERIS). 2020.** Fiches typologie d'usage, Verneuil-en-Halatte : Ineris-20-201082-2199664-v2.0, 24/07/2020. 54 p.
- IPCC. 2007.** Intergovernmental Panel on climate Change. <https://www.wunderground.com/resources/climate/ipcc2007.asp>
- Jaunatre R. 2012.** Dynamique et restauration d'une steppe méditerranéenne après changements d'usages (La Crau, Bouches-du-Rhône, France). *Sciences agricoles*. Université d'Avignon. 225 p.
- Laugier R. 2012.** *De la restauration écologique au génie écologique : synthèse documentaire*. Centre de ressource documentaire Aménagement, Logement, Nature.
- Maciejewski L., Seytre L., Van Es J., Dupont P. 2015.** État de conservation des habitats agropastoraux d'intérêt communautaire. Méthode d'évaluation à l'échelle du site. Guide d'application. Version 3. Avril 2015. Rapport SPN 2015-43, Service du patrimoine naturel, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris. 194pp.
- Marchand L, Castagneyrol B, Jiménez JJ, Rey Benayas JM, Benot M-L, Martínez-Ruiz C, Alday JG, Jaunatre R, Dutoit T, Buisson E, et al. 2021. Conceptual and methodological issues in estimating the success of ecological restoration. *Ecological Indicators* 123: 107362.
- MEA. 2005.** Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends, Volume 1, Island Press, Washington D.C
- MEDDE. 2012.** Stratégie nationale pour la biodiversité 2011-2020. 60 p.
- MEEM et FRB. 2017.** EFESE Cadre Conceptuel. Ouvrage coordonné par P. Puydarrieux et W. Beyou. Balises Théma Biodiversité. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Thema%20-%20Efese%20-%20Le%20cadre%20conceptuel.pdf>
- MEEM. 2017a.** Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. Direction générale de la Prévention des Risques – B3S. 128 p
- MEEM. 2017b.** Introduction à la Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués Direction générale de la Prévention des Risques – B3S. 27 p.
- Moll, G., Petit J. 1994.** The Urban Ecosystem: Putting Nature Back in the Picture. *Urban forests*. **14(5)**. 8-15.
- MTES. 2017a.** Biodiversité et présentation des enjeux. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biodiversite-presentation-et-enjeux>
- MTES. 2017b.** La biodiversité s'explique. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/10004_brochure-32p_Biodiversite-s-explique_web_planches.pdf
- Stewart I. D., T. R. Oke. 2012.** Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 1879–1900, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Puydarrieux P., Beyou W. 2017.** L'évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques - Cadre conceptuel. Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable.
- Rankovic A., Chan S., Laurans Y. 2017.** Mise en œuvre des solutions fondées sur la nature dans les politiques climat : enjeux pour la biodiversité Premières leçons du Maroc et de la Tunisie IDDRI.
- Reveret, J.P. 2011.** Faut-il donner une valeur monétaire à la nature ? Communication orale. Congrès annuel de l'Association des biologistes du Québec. Boucherville.
- Richard. 2013.** La politique et la place des espaces verts en milieux urbains. Cas d'étude : les six préfectures départementales de la région centre. Master 1 Géographie. Université François Rabelais. 119 p.
- Society for Ecological Restoration Science & Policy Working Group. 2004.** The SER international Primer on Ecological Restoration. www.ser.org/

- Somarakis G. et al. 2019.** ThinkNature Nature-Based Solutions Handbook. ThinkNature project funded by the EU Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No. 730338. doi:10.26225/jerv-w202
- Song, Y., Kirkwood N., Maksimović Č., Zhen X., O'Connor D., Jin Y., & Hou, D. 2019.** Nature based solutions for contaminated land remediation and brownfield redevelopment in cities: a review. *Science of the Total Environment*, **663**, 568-579.
- Sordello R., Gaudillat V., Siblet J.P., Tourout J. 2011.** Trame verte et bleue – Critères nationaux de cohérence – Contribution à la définition du critère sur les habitats ; Rapport MNHN-SPN. 29 pages.
- UICN France. 2013.** Panorama des services écologiques fournis par les milieux naturels en France - volume 2.3 : les écosystèmes urbains. Paris, France.

Annexe 1. Rappel des définitions clés

■ Fonctions écologiques

Les fonctions écologiques désignent les processus naturels inhérents à un écosystème tels que la fonction chlorophyllienne ou le cycle de l'eau. Chacune des fonctions d'un écosystème peut être caractérisée par un ou plusieurs processus chimiques, physiques ou biologiques, qui peuvent être générateurs de SE.

On distingue généralement trois grandes catégories de fonctions :

- Les fonctions hydrogéomorphologiques (ex : ralentissement des ruissellements, rétention des sédiments, recharge de nappes, stabilisation des sols etc.) ;
- Les fonctions biogéochimiques (ex : fonctions épuratoires, séquestration du carbone) ;
- Les fonctions biologiques (ex : habitats d'espèces, connectivité).

■ Habitat naturel

L'habitat naturel (ou semi-naturel) est un milieu qui réunit les conditions physiques et biologiques nécessaire à l'existence d'une faune et d'une flore spécifiques (définition selon réseau Natura 2000). L'habitat conditionne ainsi la dynamique et le fonctionnement de l'écosystème (MEEM et FRB 2017 ; Sordello et al. 2011). En d'autres termes, c'est un espace homogène par ses conditions écologiques (compartiment stationnel avec ses conditions climatiques, son sol et matériau parental et leurs propriétés physico-chimiques), par sa végétation (herbacée, arbustive et arborescente), hébergeant une certaine faune, avec des espèces ayant tout ou partie de leurs diverses activités vitales sur cet espace.

Dans le cadre de cette étude, on considère que l'habitat intègre à la fois le compartiment souterrain et le compartiment aérien (végétation, bâti ou minéral). Il tient compte à ce titre des interactions entre le sol, le végétal et l'atmosphère.

■ Ecosystème

Un écosystème est constitué d'un ensemble d'espèces (la biocénose) et du milieu (le biotope) où il se déploie, et de leurs interactions (EFESE 2013). Les dimensions des écosystèmes peuvent varier considérablement. Le périmètre d'un écosystème varie en fonction de l'angle et de l'échelle géographique d'analyse. Selon l'étude EFESE (MEEM et FRB 2017) et l'IPPC²⁰, l'étendue d'un écosystème peut comprendre de très petites échelles spatiales jusqu'à l'ensemble de la terre. Les frontières physiques de l'écosystème dépendent ainsi de l'échelle à laquelle on travaille et du niveau de précision que l'on souhaite atteindre (qui lui-même est en partie tributaire des capacités technologiques). La détermination des limites physiques de l'écosystème constitue donc une étape importante lorsque l'on veut adopter une approche par écosystèmes et services écosystémiques. Par exemple, en science du sol, un sol est défini comme un écosystème en soi (biotope du sol) et est étudié à l'échelle microscopique. En agronomie, on étudie les agrosystèmes et le sol y est considéré comme une ressource ou un milieu du biotope.

Dans le cadre de cette étude, l'écosystème est étudié à l'échelle d'un écosystème urbain et d'écosystèmes urbains élémentaires.

■ Ecosystème urbain et écosystème urbain élémentaire

Selon l'UICN (2013), l'écosystème urbain concerne l'ensemble des zones où des constructions humaines ont été réalisées et où la surface de ces infrastructures est supérieure à celle des zones naturelles présentes dans le périmètre. Il contient l'ensemble des zones construites, les réseaux (routiers, ferroviaires, etc.) mais aussi les espaces verts créés par l'Homme.

Le CGDD (2018b) définit quant à lui l'écosystème urbain comme un méta-écosystème composé d'une juxtaposition **d'écosystèmes élémentaires** sur un territoire urbain défini administrativement.

A noter que l'EFESE centre son évaluation sur les habitats naturels et donc sur une partie seulement de l'écosystème urbain. Le terme de milieu urbain est parfois utilisé comme synonyme d'écosystème urbain, cependant il peut générer des ambiguïtés car le terme milieu est également utilisé comme synonyme d'habitat, ou synonyme de compartiment selon les filières techniques.

²⁰ IPCC, Intergovernmental Panel on climate Change, 2007
<https://www.wunderground.com/resources/climate/ipcc2007.asp>

Dans le cadre de cette étude, on retient la définition d'écosystème urbain de l'UICN (2013) et d'écosystème urbain élémentaire de CGDD 2018.

■ Enjeu

Les enjeux correspondent aux ambitions des solutions d'aménagement proposées pour répondre à des problématiques données. Dans le cadre des projets de réaménagement en milieu urbain, les enjeux peuvent être appréhendés à des échelles diverses (locale, de la planification) et concerner une ou plusieurs dimensions du développement durable (environnementale, climatique, sociale ou relative aux ressources). Les enjeux permettent donc de définir les objectifs finaux visés par les aménagements prévus.

■ Projet de réaménagement

Projet de construction ou de rénovation sur des sites précédemment construits et/ou abandonnés. Un projet de réaménagement peut comprendre plusieurs projets, comme par exemple un projet de rénovation des bâtiments existants, de réhabilitation écologique en cas d'habitat dégradé sur le site concerné, de réhabilitation SSP en cas de pollution des milieux, etc.

Dans le domaine de la planification urbaine, ou réaménagement, d'autres expressions peuvent être utilisées (projet de reconstruction, projet de rénovation, reconversion, réhabilitation de sites industriels etc...). Selon le contexte et le domaine des experts impliqués (architectes/urbanistes, écologues, experts SSP, autorités compétentes etc..) différentes expressions peuvent prévaloir.

Dans le cadre de cette étude, il est proposé de retenir l'expression « projet de réaménagement » tel que défini auparavant. Dans le cadre de projet de réaménagement comprenant un projet de réhabilitation écologique (avec réhabilitation SSP ou pas), différents scénarios d'aménagements peuvent être proposés (scénarios reposant sur des solutions grises, et scénarios reposant sur des solutions fondées sur la nature).

■ Réhabilitation SSP et dépollution

Dans le domaine de gestion des sites et sols pollués (SSP), lorsqu'un site est pollué, on sous-entend qu'un ou plusieurs milieux est/sont pollué(s) dans le périmètre du site considéré. Dans ce domaine on qualifie de « milieu », le sol, les eaux souterraines, les eaux de surface, l'air, la faune ou la flore. Il n'y a pas redéfinition réglementaire à ce jour de la réhabilitation SSP.

La réhabilitation SSP d'un milieu pollué dans le périmètre d'un site bien défini comprend l'ensemble d'opérations ou actions effectuées afin que la qualité du ou des milieux pollué(s) de ce site ne porte(nt) plus atteintes à l'Homme, et/ou aux biens matériels, et/ou l'environnement et que la qualité du ou des milieux pollué(s) de ce site devienne compatible avec un usage donné de ce site (qu'il soit actuel ou futur). La notion « d'usage du site » utilisée dans ce contexte fait référence aux usages possibles (ex : industriel , commercial, résidentiel) que l'industriel doit communiquer au préfet dans le cas d'une cessation d'activité avec proposition de réaménagement par la suite. Dans ce cas, l'état de la qualité du milieu pollué après réhabilitation qui doit être compatible avec cet usage futur.

Les opérations de réhabilitation reposent sur des actions et/ou des travaux qui permettront de réduire les risques associés à la pollution du milieu jusqu'à ce qu'ils deviennent acceptables, pour l'usage considéré, vis à de l'homme et de l'environnement. Ces opérations peuvent comprendre individuellement ou simultanément i) des travaux de dépollution du milieu, en ayant recours à des techniques de traitement sur site, *in situ* ou hors site, ii) des actions d'aménagement du milieu ou des bâtiments, en ayant recours à des mesures constructives, iii) des mesures de restriction d'usage du milieu et iv) une surveillance de la qualité du milieu.

Les experts français du domaine de gestion des SSP, utilisent aussi les expressions « mise en œuvre de mesures de gestion », « gestion d'une pollution », ou parfois aussi le terme issu de l'anglais et traduit littéralement « remédiation ». Le terme de remédiation n'est pas ainsi toujours utilisé en France à bon escient. Ainsi dans le cadre de cette étude, on préférera utiliser le terme de réhabilitation SSP au sens site et sol pollué (SSP). **L'expression « réhabilitation SSP » ou le terme dépollution seront utilisés dès que nécessaire dans cette étude afin d'éviter toute confusion possible avec la notion de « réhabilitation écologique » (voir définition ci-dessous).**

Note 1 : On peut noter que le recours à l'expression « remédiation durable » (sous-entendant réhabilitation SSP durable) a aussi été introduite au début des années 2000 (Ferber et al. 2006). Par exemple, elle peut être définie comme « la démonstration pratique, en termes d'indicateurs environnementaux, économiques et sociaux, que le bénéfice de la dépollution à mettre en œuvre est

supérieure à son impact et que la solution de dépollution optimale est sélectionnée via l'utilisation d'un processus d'aide à la décision équilibré » (adapté de l'approche Surf UK, CL :AIRE 2011)

Note 2 : Concernant certains travaux de dépollution permettant de réduire les risques inacceptables liés à la pollution, la mise en œuvre de techniques telles que la phytoremédiation peuvent être considérées comme SfN telle que définie dans cette étude.

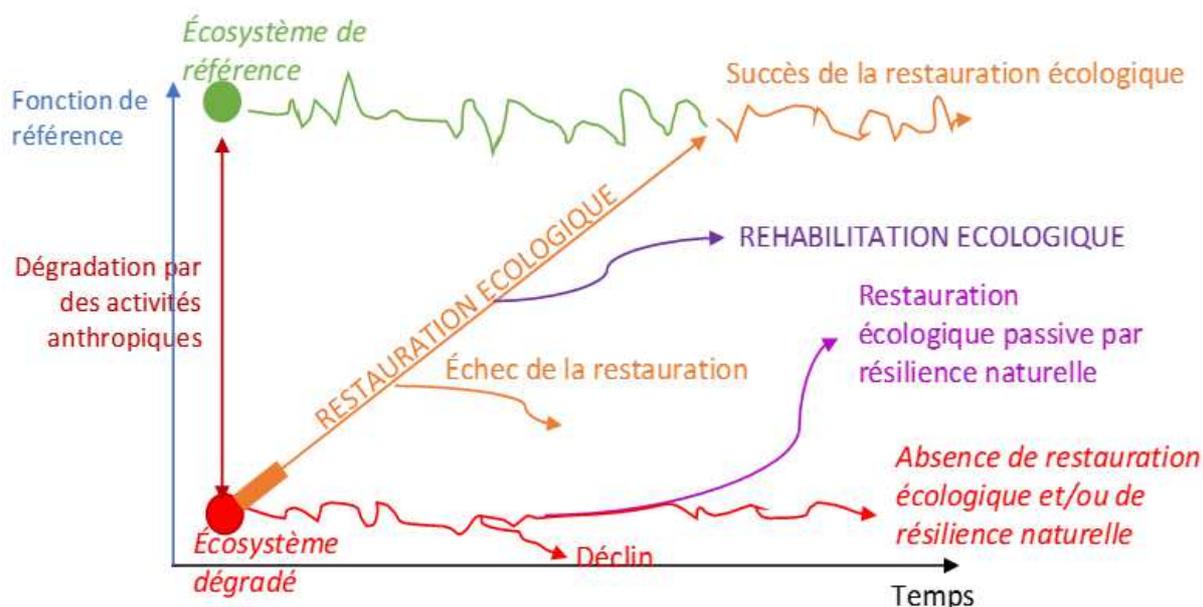
■ Réhabilitation écologique

Tout comme dans le cas de la restauration (voir définition ci-dessous), la réhabilitation écologique se sert en général des écosystèmes historiques ou préexistants comme références²¹ mais les buts et stratégies des deux activités diffèrent (Aronson 2010). La réhabilitation vise à réparer un ou plusieurs attributs, processus ou services d'un écosystème. Elle peut comprendre la stabilisation des terres, les garanties de sécurité publique, l'amélioration esthétique et le retour de l'écosystème utile dans le contexte régional (SER, Society for Ecological Restoration International, Science & Policy Working Group, 2004). La réhabilitation insiste donc sur la réparation et la récupération des processus, et sur la fourniture de services écosystémiques de manière durable et autonome tandis que la restauration vise également à rétablir l'intégrité biotique préexistante, en termes de composition spécifique et de structure des communautés (Gann et al. 2019). La réhabilitation ne vise donc pas le rétablissement de l'écosystème original mais plutôt un fonctionnement écosystémique autonome et durable.

■ Restauration écologique :

D'un point de vue strictement sémantique, la restauration écologique relève de processus permettant « d'assister la régénération des écosystèmes qui ont été dégradés, endommagés ou détruits » (Aronson 2010). Le but de cette restauration est dans l'idéal de restituer tel qu'il était à l'origine un écosystème qui a été endommagé voire détruit par les activités humaines (mais voir Gann et al. 2019, Marchand et al. 2021). Il s'agit donc d'accompagner l'écosystème à revenir à un état avant perturbation en accélérant le rétablissement d'un écosystème tout en respectant, le mieux possible, la composition spécifique, la structure communautaire, les fonctions écologiques, la capacité de l'environnement physique à supporter son biote et la connectivité avec le paysage alentour (Laugier 2012). Les retours d'expérience de nombreux pays montrent néanmoins que restaurer – *stricto sensu* – un écosystème historique reste en général utopique.

Les schémas ci-dessous permettent de montrer la distinction conceptuelle entre la réhabilitation écologique et la restauration écologique.



²¹ La recherche a évolué récemment sur ces questions. L'écosystème de référence n'est plus uniquement un écosystème natif mais peut également être un système qui présente un niveau de fonctionnalité ou d'usages correspondant à l'objectif visé par la réhabilitation écologique (écosystèmes non natifs, voir Gann et al. 2019).

Figure 9. Illustration des termes "restauration" et "réhabilitation". D'après Aronson et al. (1993), Buisson (2011) et Jaunâtre (2012).

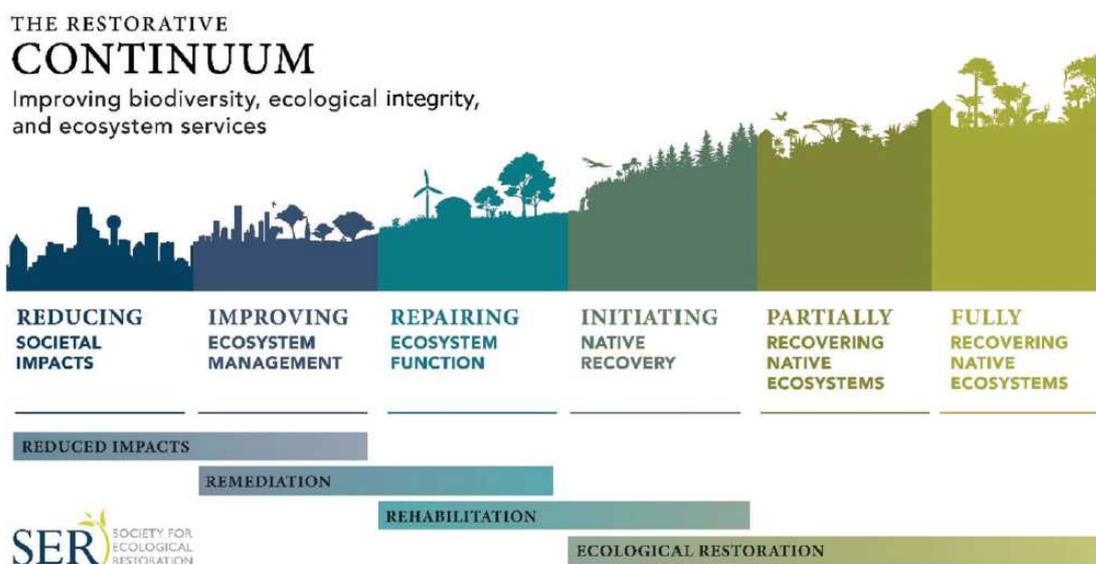


Figure 10. Le processus de restauration au sens large inclut différents types d'actions (réduction des impacts, remédiation, réhabilitation et enfin restauration). Ce processus s'applique tant en milieu agricole qu'industriel ou urbain (d'après Gann et al. 2019).

■ **Restauration écologique passive :**

Cette notion fait suite à la reconnaissance de l'incapacité de l'homme à restaurer toutes les fonctions perdues par un écosystème trop fortement dégradé. Elle fait référence au choix d'une forme de restauration écologique consistant à laisser l'écosystème évoluer de manière spontanée en intégrant les changements d'usage associés et les impacts dus au changement climatique.

■ **Services écosystémiques**

Services que les populations humaines obtiennent directement ou indirectement des fonctions des écosystèmes » (Constanza et al. 1997 ; MEA 2005). La gamme de biens et services est large et variée, des biens matériels (médicaments) aux bénéfiques non matériels (lutte contre l'érosion et les inondations, écotourisme) voire intrinsèques des écosystèmes (qualité d'exister). Ces SE profitent de manière plus ou moins directe à l'homme. On distingue ainsi les services directs des services indirects. Certains SE sont à la base de la vie quotidienne comme la nourriture et l'eau, tandis que d'autres servent de support à la production d'autres services (les récifs coralliens abritent et nourrissent des poissons que nous consommons). Enfin, on distingue également les SE de portée locale ou à échelle plus large, régionale ou globale selon les cas. Par exemple, les forêts procurent localement du bois d'œuvre et des fibres, mais participent aussi à la régulation de notre climat à l'échelle mondiale en séquestrant le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère. Néanmoins, en règle générale, les services écosystémiques se distinguent des fonctions écologiques par leur échelle plus large. Ces dernières se mesurent en effet à l'échelle de l'habitats tandis que la portée des SE associés à cet habitat peut être beaucoup plus étendue.

Le terme disservice accompagne souvent la notion de services écosystémiques aux fonctions/entités d'un écosystème qui sont, ou sont perçues comme, négatives pour le bien-être humain. C'est par exemple la prolifération de moustiques ou encore les allergies générées par certaines plantes. Les disservices n'ont pas été considérés dans cette étude mais pourront être intégrés dans une future version.

■ **Solutions fondées sur la Nature (SfN)**

Dans le cadre de cette étude, les SfN correspondent à des actions de réhabilitation (écologique ou SSP), de gestion et/ou de préservation visant à maintenir, restaurer ou créer des écosystèmes naturels. Ces actions visent à répondre directement aux enjeux de société de manière efficace et adaptative tout en assurant le bien-être humain par la fourniture de services écosystémiques et les avantages pour la biodiversité et le fonctionnement d'autres écosystèmes *in situ*.

■ Usages

Dans le secteur spécifique des sites et sols pollués, le terme « usage » présente une définition spécifique. Ainsi, dans le rapport, le sens accordé à ce terme est systématiquement précisé quand il est lié à la définition accordée dans le domaine des sites et sols pollués.

La politique nationale de gestion des sites et sols pollués s'appuie sur un principe directeur de gestion des risques selon l'**usage du site** considéré (voir paragraphe sur la réhabilitation SSP). Selon (INERIS 2020), la signification de l'usage renvoie aux localisations et aux délimitations des différentes zones d'urbanisation précisées dans les documents d'urbanisme tels que les PLU (plan local d'urbanisme). Les usages doivent prendre en compte le risque sanitaire attaché à l'exposition des populations pouvant être présentes dans les aménagements et/ou constructions, mais également celles pouvant exercer une activité à l'extérieur en disposant des ouvrages et aménagements possiblement associés. L'usage retenu sur un site doit permettre d'identifier le type de populations concernées par les expositions (adultes et/ou enfants, résidents, visiteurs ou travailleurs), ainsi que les voies d'exposition principales des populations (ingestion et inhalation).

Différents types d'usages sont possibles et sont à mettre en relation avec les différentes destinations et sous-destinations de construction. On retient ainsi en termes d'usage la typologie suivante :

- Exploitations agricoles et forestières
- Habitation
- Commerce et activité de service
- Equipement d'intérêt collectif et services publics
- Autres activités des secteurs secondaires ou tertiaires (industrie, entrepôt etc.)

Le changement d'usage d'un site est envisagé dès la conception d'un projet d'aménagement et l'implantation de nouvelles activités qui influent sur les paramètres d'exposition. Ainsi, il est nécessaire d'établir d'un point de vue sanitaire la compatibilité entre l'état de pollution des sols et les destinations ou sous-destinations envisagées pour les bâtiments et immeubles laissés en place.

■ Emergence de la typologie de SfN retenue dans l'étude :

Afin de préciser notre scénario fondé sur la nature, nous avons choisi de catégoriser les SfN en trois types qui ont été établis et repris par plusieurs travaux reconnus par l'UICN. Ce découpage a été fait dans un premier temps sur le *concept général de SfN* par le groupe de travail Biodiversa coordonné par la FRB et a donné lieu à plusieurs publications (Balian et al. 2014, Hilde Eggermont et al. 2015). C'est sur cette typologie que s'est basée l'UICN en 2016 pour exprimer et définir sa position sur les SfN et planifier les travaux pour apporter plus de contenu et de robustesse à cette notion (Cohen-Shacham et al. 2016). En 2017, l'IDDRI s'est également saisie de cette typologie de SfN pour définir sa position au sein des politiques climatiques mondiales (Rankovic et al. 2019).

Le choix de catégoriser les SfN faisant spécifiquement référence au milieu urbain a été cadré par plusieurs travaux supplémentaires. En particulier, nous avons repris une typologie de solutions fondées sur la nature détaillée par Nature4Cities. Cette typologie distingue les SfN de type 1,2 renommées Stratégies et Actions, et les SfN de type 3 sous le nom de Objets, Formes, Projets Physiques.

Nature4Cities est un projet de 2016 du programme Horizon 2020 de recherche et innovation financé par l'UE et qui a pour but de créer une plateforme de références de SfN en ville. Cette plateforme a pour but de créer une base de données et de connaissances communes pour aider les porteurs de projet à intégrer les SfN comme solutions d'aménagement. Elle propose des solutions techniques, méthodes et outils pour améliorer la prise de décision dans l'aménagement urbain. L'approche implique à la fois des citoyens, chercheurs, politiques, industriels et repose sur des processus participatifs et de partage des Best Practices.

D'autre part, ThinkNature, dont l'UICN fait partie du réseau, se base également sur cette typologie. ThinkNature est un projet de 2016 du programme Horizon 2020 de recherche et innovation financé par l'UE et qui a pour but de développer une plateforme permettant une meilleure compréhension et une promotion efficiente des SfN. Elle est particulièrement adaptée pour promouvoir la résilience urbaine et

trouver des solutions techniques pour lever les barrières réglementaires, économiques pouvant être perçues par les porteurs de projets. La plateforme a également pour ambition de stimuler un dialogue entre les parties prenantes des projets de réaménagement afin d'apprendre et de promouvoir les SfN les plus efficaces pour l'aménagement durable des villes.

La publication de l'UICN France « Les Solutions Fondées sur la Nature pour lutter contre les changements climatiques et les risques naturels en France » distingue également ce découpage de SfN qui peuvent être combinées lors de l'entreprise d'un projet de réaménagement.

Enfin, en juillet 2020, l'UICN a instauré un standard portant sur les Solutions Fondées sur la Nature, connu sous le nom de [Global Standard](#). Il a pour but de répondre aux besoins de clarification et de précisions du concept pour intégrer les SfN aux politiques, les faire adopter effectivement sur le terrain, et ainsi réussir leur déploiement. Ce standard à destination des gouvernements, des collectivités locales, des villes, aménageurs, entreprises, financeurs, institutions financières et ONG aide à renforcer l'efficacité, la durabilité et l'adaptabilité des SfN choisies.

Le Global Standard est structuré par huit critères dont l'un concerne les avantages nets des SfN vis-à-vis de la biodiversité et les écosystèmes. Ce gain net de biodiversité s'appuie sur l'appréciation de la relation découlant des SfN entre le degré de complexité écologique ou l'optimisation des services écosystémiques, et le degré d'ingénierie appliqué aux écosystèmes par ces SfN. Il peut ainsi être de trois types selon cette relation : services issus des écosystèmes naturels, écosystème géré ou restauré, ou création d'un nouvel écosystème. Cette typologie adaptée de Balian, Eggermont et Le Roux (2014) est reprise par le Global Standard sur les Solutions Fondées sur la Nature de UICN publié en 2020. Notre approche est ainsi fondée sur cette typologie partagée par les parties prenantes majeures de l'opérationnalisation du concept de SfN au niveau international.

L'ensemble de ces éléments justifient donc de la légitimité de la catégorisation retenue pour la typologie de SfN spécifiques aux milieux urbains créée dans cette étude.

Annexe 2. Liste des SE retenus dans le programme EFESE général et spécifique aux écosystèmes urbains

Catégories de SE	Liste des SE dans EFESE	EFESE – écosystèmes urbains	SE écosystèmes urbains retenus dans l'étude
Biens issus des écosystèmes	Eau potable et destinée aux usages agricoles	-	-
	Plantes, algues et animaux sauvages et leurs produits destinés à l'alimentation, l'agriculture ou l'aquaculture	Produits de la cueillette / Apiculture	Produits de la cueillette / Apiculture
	Plantes cultivées, animaux d'élevage et leurs produits destinés à l'alimentation	Produits de l'agriculture	Produits de l'agriculture
	Biomasse végétale	-	-
	Eaux destinées aux usages industriels	-	-
	Fibres et autres matériaux issus de plantes, d'algues et d'animaux	-	-
	Molécules et substances naturelles	-	-
Services de régulation	Régulation de l'érosion	-	-
	Protection contre les risques naturels	Régulation des inondations	Régulation des inondations
	Régulation du cycle de l'eau	-	-
	Régulation des déchets et des sources de pollution	-	-
	Réduction des nuisances olfactives, sonores et visuelles	Régulation des nuisances sonores	Régulation des nuisances sonores
	Régulation du climat mondial	Régulation du climat global	Régulation du climat global
	Régulation du climat local	Régulation du climat local	Régulation du climat local
	Régulation de la qualité de l'air	Régulation de la qualité de l'air	Régulation de la qualité de l'air
	Régulation de la qualité de l'eau	Régulation de la qualité de l'eau	Régulation de la qualité de l'eau
	Qualité du sol et fertilité	Régulation de la qualité des sols	Régulation de la qualité des sols
	Régulation des risques de santé	-	-
Régulation des conditions de cultures et d'élevage	-	-	
Services culturels	Récréation sans prélèvement	Intérêt récréatif, de loisir	Intérêt récréatif, de loisir
	Récréation avec prélèvement	-	-
	Education et connaissance	Intérêt éducatif et pédagogique / Intérêt scientifique	Intérêt éducatif et pédagogique / Intérêt scientifique
	Aménités paysagères	Aménités paysagères	Aménités paysagères
Patrimoine naturel	Culture d'attachement et identité	-	Eléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire
	Esthétique et spiritualité	-	
	Eléments protégés des écosystèmes		
	Eléments labellisés des écosystèmes		
	Biens issus des écosystèmes à valeur patrimoniale		

Annexe 3. Tables de correspondance entre les différentes matrices

Matrice Enjeux – SE

	Biens issus des écosystèmes			Services de régulation						Services culturels			Patrimoine naturel	
	Produits de l'agriculture	Produits de la cueillette	Apiculture	Régulation du climat global	Régulation du climat local	Régulation de la qualité de l'air	Régulation des nuisances sonores	Régulation des inondations	Régulation de la qualité de l'eau	Régulation de la qualité des sols	Intérêt récréatif, de loisir	Aménités paysagères	Intérêt éducatif et pédagogique	Eléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire
Enjeu														
Atténuation du changement climatique				X										
Adaptation au changement climatique					X									
Gestion des eaux urbaines et de leur qualité									X					
Gestion des inondations								X						
Gestion de la qualité de l'air						X								
Gestion de la qualité des sols										X				
Préserver ou restaurer la biodiversité dans les écosystèmes urbains														X
Production de ressources (eau, énergie, alimentation)	X	X	X											
Amélioration de la qualité de vie											X	X	X	
Garantie de santé des populations					X	X	X		X	X				

Matrice SE – SFN

SFN	Biens issus des écosystèmes			Services de régulation							Services culturels			Patrimoine naturel
	Produits de l'agriculture	Produits de la cueillette	Apiculture	Régulation du climat global	Régulation du climat local	Régulation de la qualité de l'air	Régulation des nuisances sonores	Régulation des inondations	Régulation de la qualité de l'eau	Régulation de la qualité des sols	Intérêt récréatif, de loisir	Aménité paysagère	Intérêt éducatif et pédagogique	Éléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire
Maintien et amélioration de la continuité avec le réseau écologique														X
Prise en compte de la répartition des espaces verts publics à travers la ville					X	X					X	X		X
Outils de planification contrôlant l'expansion urbaine				X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Restrictions ou interdiction d'accès à un espace donné											X			X
Restrictions ou interdiction de certains usages et pratiques											X			X
Mise en œuvre d'une fertilisation raisonnée et utilisation de fertilisants organiques	X		X			X			X	X			X	X
Ajout de paillage	X												X	X
Gestion différenciée			X									X	X	X
Gestion intégrée des adventices et des ravageurs	X		X										X	X
Utilisation d'animaux de pâturage	X												X	X
Hotel à insectes	X												X	X

SIN	Biens issus des écosystèmes			Services de régulation							Services culturels			Patrimoine naturel
	Produits de l'agriculture	Produits de la cueillette	Apiculture	Régulation du climat global	Régulation du climat local	Régulation de la qualité de l'air	Régulation des nuisances sonores	Régulation des inondations	Régulation de la qualité de l'eau	Régulation de la qualité des sols	Intérêt récréatif, de loisir	Aménité paysagère	Intérêt éducatif et pédagogique	Eléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire
Ruches	X		X										X	X
Compost, recyclage des déchets organiques compostables	X												X	X
Création d'un parc public, jardin botanique (place, square, terrain de sport, aire de jeu)					X	X	X				X	X	X	X
Création d'une haie et clôture végétale	X				X		X					X		X
Création de jardins privés					X						X	X	X	X
Aménagement de champs de fleurs		X	X		X							X		X
Création d'une pelouse, prairie		X	X		X							X		X
Plantation d'un arbre isolé					X	X						X		X
Création d'un boisement		X	X	X	X	X	X					X		X
Création d'une voie verte autour des voiries communes (tram, routes etc.)					X				X			X		X
Création d'espaces verts d'accompagnement des infrastructures					X				X			X		X
Plantation d'arbres le long des voiries communes				X	X	X	X					X		X

SfN	Biens issus des écosystèmes			Services de régulation							Services culturels			Patrimoine naturel
	Produits de l'agriculture	Produits de la cueillette	Apiculture	Régulation du climat global	Régulation du climat local	Régulation de la qualité de l'air	Régulation des nuisances sonores	Régulation des inondations	Régulation de la qualité de l'eau	Régulation de la qualité des sols	Intérêt récréatif, de loisir	Aménité paysagère	Intérêt éducatif et pédagogique	Éléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire
Aménagement d'une ferme urbaine (jardin potager, verger, vignes) ou jardins partagés	X										X		X	
Gestion des sols pollués par phytoremediation, phytostabilisation, bioremédiation, mycoremédiation									X	X				
Utilisation de la végétation pré-existante														X
Introduction d'espèces indigènes et diversification de la végétation														X
Actions d'amélioration de la qualité du sol	X			X					X	X				X
Actions de renforcement et structuration du sol	X			X					X	X				X
Reprofilage des berges par des techniques végétales								X	X					
Mise en place de structures végétalisées pour le contrôle de l'érosion des berges								X	X					
Aménagement d'un jardin d'infiltration ou jardin pluvial								X	X					
Aménagement d'un espace désimperméabilisé (et systèmes								X						

SIN	Biens issus des écosystèmes			Services de régulation							Services culturels			Patrimoine naturel
	Produits de l'agriculture	Produits de la cueillette	Apiculture	Régulation du climat global	Régulation du climat local	Régulation de la qualité de l'air	Régulation des nuisances sonores	Régulation des inondations	Régulation de la qualité de l'eau	Régulation de la qualité des sols	Intérêt récréatif, de loisir	Aménité paysagère	Intérêt éducatif et pédagogique	Éléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire
associés, comme le dallage perméable)														
Création de zones humides artificielles pour favoriser l'épuration des eaux (phytoépuration)									X					
Réalisation d'un champ d'expansion des crues								X						
Aménagement d'un toit végétalisé (extensif, intensif, semi-intensif)					X	X						X		X
Création d'un système de mur végétalisé					X	X	X					X		X
Création d'une pergola végétalisée					X	X						X		X

Matrice SE – Fonctions

		Fonctions hydrogéomorphologiques			Fonctions biogéochimiques				Fonctions biologiques	
		Rétention, circulation et infiltration de l'eau	Rétention des sédiments	Support physique stable	Stockage, recyclage et transformation des matières organiques (carbone)	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau, sol, air)	Rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux	Contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques (température, hygrométrie)	Habitats d'espèces	Connectivité
Services Ecosystémiques										
Services d'approvisionnement	Produits de l'agriculture	X					X			
	Produits de la cueillette									
	Apiculture								X	
Services de régulation	Régulation du climat global				X					
	Régulation du climat local							X		
	Régulation de la qualité de l'air					X				
	Régulation des nuisances sonores									
	Régulation des inondations	X		X						
	Régulation de la qualité de l'eau	X	X		X	X	X			
	Régulation de la qualité des sols				X	X	X			
Patrimoine naturel	Eléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire	X				X			X	X

Habitats				Création d'un parc public, jardin botanique (place, square, terrain de sport, aire de jeu)	Création d'une haie et clôture végétale	Création de jardins privés	Aménagement de champs de fleurs	Création d'une pelouse, prairie	Plantation d'un arbre isolé	Création d'un boisement	Création d'une voie verte autour des voiries communes (tram, routes etc.)	Création d'espaces verts d'accompagnement des infrastructures	Plantation d'arbres le long des voiries communes	Aménagement d'une ferme urbaine (jardin potager, verger, vignes)	Mise en place de structures végétalisées pour le contrôle de l'érosion des berges	Aménagement d'un jardin d'infiltration ou jardin pluvial	Aménagement d'un espace desimperméabilisé (et systèmes associés, comme le dallage <small>perméabilisé</small>)	Création de zones humides artificielles pour favoriser l'épuration des eaux (phytoépuration)	Réalisation d'un champ d'expansion des crues	Aménagement d'un toit végétalisé (extensif, intensif, semi-intensif)	Création d'un système de mur végétalisé	Création d'une pergola végétalisée
			1.9.6	Groupements herbacés et héliophytes de bord de cours d'eau				X							X	X						
Eaux de surface et zones littorales	2.4	Système de gestion et de traitement des eaux pluviales (dont bassin de stockage temporaire et jardin d'infiltration) et résiduelles urbaines	2.4.2	Bassins de stockage temporaire des eaux pluviales, jardin d'infiltration, zones humides artificielles pour l'épuration des eaux												X	X					
Zones productives, culture ou élevage	3.1	Jardins collectifs (familiaux, partagés, insertion, pédagogique)	-	-										X								
Linéaires végétalisés / arbres isolés	4.1	Alignements d'arbres, haies arbustives en bord de cours d'eau (milieux rivulaires)	4.1.1	Majoritairement composé d'espèces indigènes		X									X							
	4.2	Alignements d'arbres, haies arbustives (hors milieux rivulaires)	4.2.1	Majoritairement composé d'espèces indigènes		X																
	4.3	Bandes enherbées, bordure des infrastructures linéaires routières et ferroviaires, vélo route, tramway	-	-							X											
	4.4	Arbres d'alignement sur les voiries communes	4.4.1	Espèces indigènes					X				X									

		Habitats	
		groupés ou non	
Surfaces fortement artificialisées ou imperméabilisées ou hors-sol	5.1	Habitats collectives ou individuelles avec toiture et/ou murs végétalisés (non productifs) et/ou aménagement ponctuel en faveur de la biodiversité	5.1.1
			Avec toiture et/ou murs végétalisés (non productifs) et/ou aménagement ponctuel en faveur de la biodiversité
			Création d'un parc public, jardin botanique (place, square, terrain de sport, aire de jeu)
			Création d'une haie et clôture végétale
			Création de jardins privés
			Aménagement de champs de fleurs
			Création d'une pelouse, prairie
			Plantation d'un arbre isolé
			Création d'un boisement
			Création d'une voie verte autour des voiries communes (tram, routes etc.)
			Création d'espaces verts d'accompagnement des infrastructures
			Plantation d'arbres le long des voiries communes
			Aménagement d'une ferme urbaine (jardin potager, verger, vignes)
			Mise en place de structures végétalisées pour le contrôle de l'érosion des berges
			Aménagement d'un jardin d'infiltration ou jardin pluvial
	X		Aménagement d'un espace desimperméabilisé (et systèmes associés, comme le dallage permeable)
			Création de zones humides artificielles pour favoriser l'épuration des eaux (phytoépuration)
			Réalisation d'un champ d'expansion des crues
	X		Aménagement d'un toit végétalisé (extensif, intensif, semi-intensif)
	X		Création d'un système de mur végétalisé
	X		Création d'une pergola végétalisée

Annexe 4. Note sur les approches moléculaires proposées pour caractériser les fonctions écologiques microbiennes du sol dans le cadre d'une réhabilitation écologique

Introduction

Dans le cadre des travaux du projet RECORD sur l'évaluation du succès des opérations de réhabilitation écologique et de dépollution des habitats dégradés en contexte urbain, un outil de suivi opérationnel destiné aux gestionnaires et industriels a été proposé. Une des matrices établies dans cette étude identifie les fonctions et processus écologiques réalisés par les sols, les indicateurs de ces processus ainsi que les outils de mesure disponibles pour les évaluer. Parmi ces outils sont proposés la quantification de la biomasse moléculaire des sols, l'évaluation de la diversité microbienne par séquençage d'ADN microbien et la mesure de l'abondance de gènes impliqués dans des activités spécifiques.

L'objectif de cette note est de présenter plus en détail les approches moléculaires de mesure de la diversité génétique et fonctionnelle des communautés microbiennes qui sont aujourd'hui à différents niveaux d'opérationnalité.

Remarque : Cette note présente uniquement les approches moléculaires utilisées pour cibler les communautés microbiennes du sol et non les approches appliquées aux organismes supérieurs et basées sur l'ADNe. L'analyse d'ADN environnemental ou ADNe consiste à récupérer dans une matrice environnementale (eau, sol) les traces d'ADN laissées par les organismes vivants (Taberlet et al., 2018). En effet tous les organismes vivants laissent des traces d'ADN, témoin de leur passage et libéré par la peau, les mucus, les fèces, l'urine... dans un mélange complexe d'ADNe nucléaire, mitochondrial ou chloroplastique, se trouvant sous forme intracellulaire (contenu dans des cellules vivantes) ou extracellulaire. Selon les conditions du milieu (température, humidité...), cet ADNe sera conservé plus ou moins longtemps dans l'environnement. En bref, les techniques d'analyse pour étudier ces ADNe sont les mêmes que pour les communautés microbiennes (PCR, séquençage) mais ciblent d'autres marqueurs génétiques. La démocratisation des méthodes de séquençage permet aujourd'hui d'approfondir les connaissances sur l'ADNe, de développer et standardiser les méthodes et de caler les données avec des méthodes d'échantillonnage plus traditionnelles. Bien que son utilisation dans le monitoring tend à se développer dans les sols, il reste encore des verrous scientifiques qui requièrent aujourd'hui davantage de données empiriques afin de standardiser la méthodologie d'échantillonnage notamment (Garlapati et al. 2019, Ruppert et al., 2019).

Origine et concept des approches moléculaires

Dans les sols ont lieu de nombreuses fonctions écologiques qui contribuent au bon fonctionnement des écosystèmes et à la provision de services au bénéfice de l'homme et de son environnement. Les microorganismes hébergés par le sol y jouent des rôles clés parmi lesquels le recyclage de la matière organique, la fourniture de nutriments aux plants, le maintien de la structure du sol, ou encore une source de nourriture pour d'autres organismes de la chaîne trophique. L'hétérogénéité du sol et la variation des réactions qui s'y produisent font que les sols hébergent une forte diversité de microorganismes (bactéries et archées, champignons, virus, algues). Cette diversité et l'activité du compartiment microbien du sol sont fortement dépendantes de la composante abiotique des sols (pH, humidité, teneur en C, N, présence de polluants...). Ainsi une bonne compréhension de l'état et du fonctionnement des sols nécessite de savoir qui est présent, pour quelles fonctions, mais aussi comment les microorganismes interagissent avec leur environnement (Biswas et Sarkar 2018).

Pour acquérir ces connaissances, les microbiologistes ont longtemps été limités à des approches dites « culturelles » pour étudier les activités et la diversité microbiologique des sols alors qu'on considère que seuls 1 % des bactéries du sol sont cultivables. L'avènement de méthodes s'affranchissant de la nécessité des cultures pour étudier les communautés microbiennes des sols avec notamment la découverte de l'ADN et de l'amplification de gènes par PCR (réaction de polymérisation en chaîne) et le développement des méthodes moléculaires à partir des années 80 ont permis de commencer à ouvrir la boîte noire que représentait la diversité microbienne des sols. A partir des années 2000, ces avancées se sont poursuivies avec le développement puis la démocratisation de méthodes de séquençage dites de prochaine génération (NGS : next generation sequencing), en particulier, la métagénomique ciblée ou metabarcoding qui fait référence à l'étude des séquences d'un gène connu et amplifié.

Le terme de métagénomique a été proposé en 1998 par Handelsman et al., pour désigner l'étude de multiples génomes dans un environnement spécifique, alors que la génomique fait référence à une analyse appliquée à un seul organisme. Le terme « **omique** » est la quantification ou caractérisation de molécules d'origine biologique pour détecter les fonctions, la structure, la physiologie et les mécanismes moléculaires d'un organisme ou d'un ensemble d'organismes (Feng, 2013). Ce terme regroupe alors les différentes approches permettant de caractériser la diversité génétique et fonctionnelle des microorganismes dans leur ensemble sans *a priori* et par l'analyse en haut débit des **ADN** (métagénomique), **ARN** (métatranscriptomique), **protéines** (métaprotéomique) ou des **métabolites** (métabolomique) (Bouchez et al. 2017) (Figure 1). L'**ADN** est la molécule ciblée en génomique environnementale et son étude permet d'accéder à la densité et à la diversité des communautés microbiennes, l'**ARN** reflète l'ADN transcrit et permet d'accéder à la quantification et l'identification de populations ou métabolismes actifs dans un environnement donné. La protéomique cible les **protéines** synthétisées à partir des ARN par les communautés microbiennes et permet d'accéder à la fonctionnalité à travers l'étude des enzymes produits et réellement responsables d'une activité dans un environnement donné. Enfin, l'étude des **métabolites** synthétisés par les communautés microbiennes permet l'identification de produits finaux ou intermédiaires de leur activité.

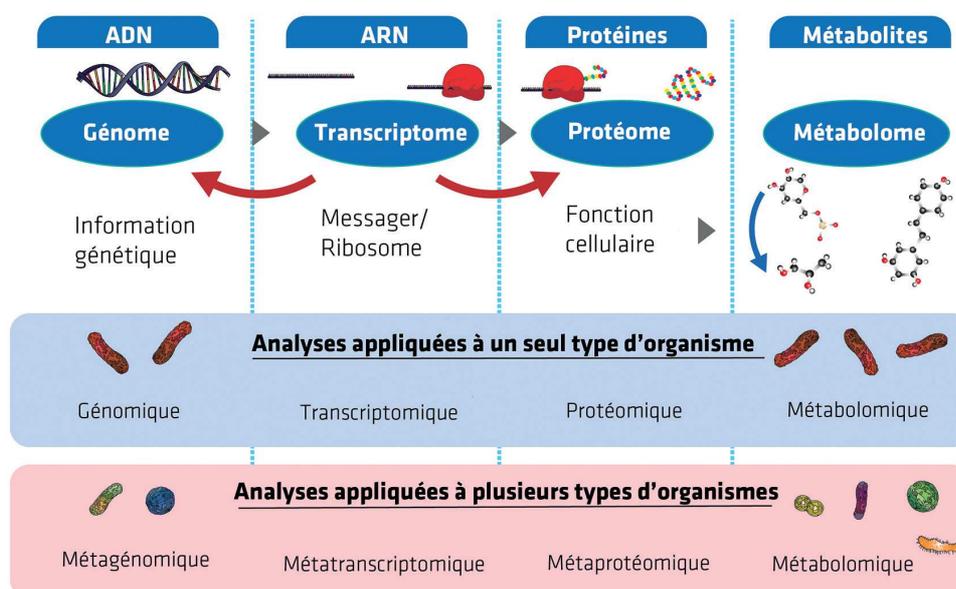


Figure 1. Différents niveaux d'intégration des techniques de microbiologie moléculaire (ADEME©, schéma issue de l'ouvrage Bouchez et al., 2017).

Méthodes basées sur l'ADN et l'ARN (génomique et transcriptomique)

A l'exception de la méthode FISH, toutes ces approches sont basées d'abord sur l'extraction de l'ADN ou des ARN de l'échantillon environnemental. La concentration en ADN extrait est une mesure de biomasse appelée « biomasse moléculaire » qui est également un indicateur biologique. Le tableau ci-dessous présente succinctement les techniques les plus courantes pour l'étude de l'ADN et ARN microbien dans l'environnement.

Tableau 1. Présentation des différentes méthodes d'analyses.

Analyse	Méthode	Définition
Détection/abondance de microorganismes ou de fonctions	PCR quantitative	Quantification de l'abondance d'un gène ciblé (spécifique à une activité donnée ou pour évaluer l'abondance d'une communauté microbienne dans un échantillon).

Analyse	Méthode	Définition
	FISH (Hybridation Fluorescente In Situ)	Hybridation de sondes ADN couplées à un fluorochrome sur l'ADN de cellules microbiennes ce qui permet leur identification et dénombrement visuel par observation au microscope à fluorescence ou confocal.
Diversité génétique/ fonctionnelle de la communauté microbienne	Capture de gènes	Capture d'un gène ciblé par hybridation préalablement au séquençage, permettant d'éviter les biais liés à la PCR. Pour plus d'information voir Denonfoux et al. (2013).
	Puce à ADN	Fixation de sondes (petites séquences d'ADN) sur une base solide pour y hybrider les gènes complémentaires de ces séquences d'ADN et contenus dans un échantillon. Cette approche permet d'étudier simultanément tous les gènes d'un organisme et d'identifier plusieurs milliers de gènes dans un environnement. Pour plus d'information voir Dugat-Bony et al. (2012).
	Séquençage d'amplicons ciblés	Séquençage d'un fragment d'ADN préalablement amplifié par PCR : soit un gène universel, par ex. le gène codant l'ARNr 16S pour les bactéries ou celui codant l'ARNr 18S pour les champignons, permettant une identification de la diversité de la communauté dans son ensemble, soit d'un gène spécifique d'une population ou fonction spécifique. Pour plus d'information voir Terrat et al. (2015)
	Séquençage d'ADN global (Shotgun)	Séquençage sans <i>a priori</i> des ADN d'un échantillon, permettant d'identifier l'ensemble des gènes d'une communauté et la reconstruction de génomes et de cycles biogéochimiques dans un environnement donné – accès aux fonctions portées par la communauté ainsi qu'à sa diversité.
Structure génétique de la communauté microbienne	Analyses électrophorétiques (empreintes moléculaires: DGGE, CE-SSCP, T-RFLP, ARISA)	Visualisation sur gel ou profils capillaires de la structure des communautés microbiennes – peut également cibler le gène codant l'ARNr 16S, 18S ou un autre gène (fonctionnel) connu. Pour plus d'information voir Ranjard et al. (2000).

Focus sur les techniques proposées dans l'étude RECORD

Les indicateurs utilisant des méthodes moléculaires proposés dans le cadre de RECORD sont basés sur des analyses d'ADN du sol, soit dans un contexte d'évaluation de la diversité (fonction habitat pour la diversité) soit pour évaluer un potentiel de dégradation ou de transformation de nutriments ou de polluants (fonction rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux et fonction de rétention et dégradation des polluants). En conséquence, les techniques proposées sont basées sur l'extraction et la quantification des ADN du sol (biomasse moléculaire), l'amplification de gènes ciblés par PCR ou qPCR (PCR quantitative) ainsi que le séquençage d'amplicons (gènes ciblés amplifiés). Bien que d'autres méthodes existent (voir paragraphe précédent), ces techniques sont les plus accessibles et les plus utilisées aujourd'hui dans un contexte de monitoring des sols.

Biomasse moléculaire (ADN extrait)

A la base de nombreuses techniques de microbiologie moléculaire, l'extraction d'ADN représente généralement l'une des premières étapes dans l'étude des communautés microbiennes du sol. Pour y parvenir une norme a été développée (ISO 11063, 2012) mais il existe également de nombreux kits commerciaux pour les extraire. La quantification de l'ADN extrait ou mesure de biomasse moléculaire est sensible à la physico-chimie du milieu étudié et peut constituer une première bioindication de l'état microbiologique du sol. A travers des programmes tels que le RMQS (Référentiel de Mesure de la Qualité des Sols), des référentiels biogéographiques pour les sols français sont disponibles (Dequiedt et al. 2011), bien qu'une comparaison avec un sol de référence local peut être également recommandée.

PCR quantitative (qPCR)

La qPCR (réaction de polymérisation en chaîne quantitative en temps réel) est une technique de biologie moléculaire qui permet de mesurer l'abondance de gènes connus. La mesure de l'abondance de gènes microbiens permet de quantifier la biomasse microbienne (bactérienne, archéenne ou fongique) présente ou un potentiel génétique du milieu à dégrader ou à transformer un polluant ou à réaliser une activité métabolique (cycles biogéochimiques par exemple).

La qPCR mesure l'abondance d'un gène présent lorsqu'elle cible l'ADN ou son expression lorsqu'elle cible l'ARN (après une étape de transcription reverse de l'ARN en ADN). L'amplification par PCR consiste à dupliquer de manière exponentielle et maîtrisée un fragment d'ADN contenu dans un échantillon. Le début de cette amplification est proportionnel à la quantité d'ADN cible dans le milieu et permet de déterminer un seuil (Cq) (Figure 2) qui, rapporté à une gamme étalon, permet de déduire le nombre de copies du gène. Cette approche nécessite de connaître le gène ciblé afin de l'amplifier spécifiquement.

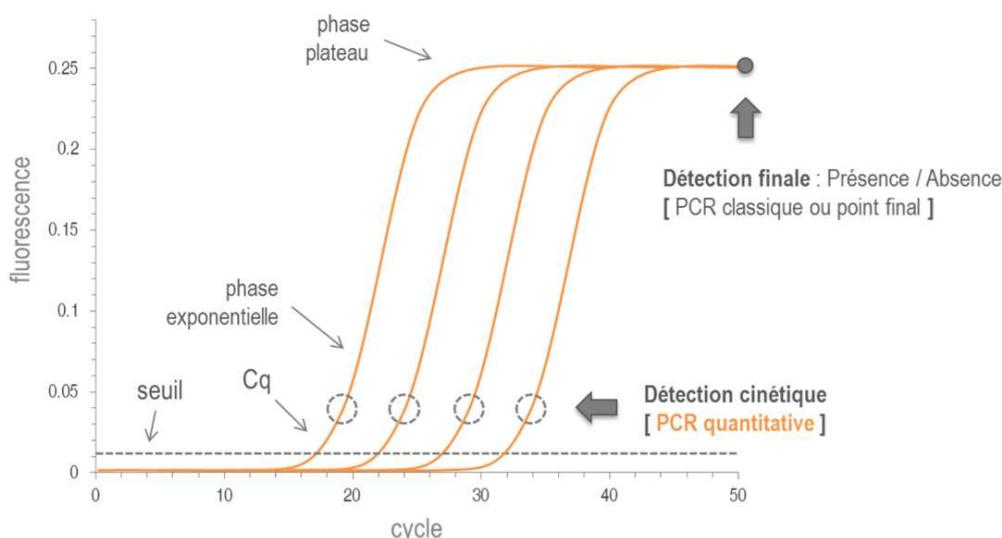


Figure 2. Principe de la qPCR (extrait des fiches techniques innovantes <http://ssp-infoterre.brgm.fr/fiches-sites-sols-pollues-techniques-innovantes>)

Séquençage haut-débit d'amplicons ciblés

Le séquençage haut-débit est une technique de biologie moléculaire qui permet de séquencer un très grand nombre de brins d'ADN. L'approche la plus avancée et opérationnelle (métagénomique ciblée ou metabarcoding) cible un gène d'intérêt connu : un fragment défini de ce gène est amplifié par PCR et les amplicons sont séquencés à haut-débit (Figure 3). Le séquençage haut-débit génère plusieurs milliers de séquences et l'analyse bioinformatique de ces métadonnées permet d'appréhender précisément la diversité du gène ciblé et l'abondance relative des différents taxons identifiés. Appliquée par exemple au gène codant l'ARNr 16S, marqueur universel des bactéries, cette approche permet l'étude de la biodiversité bactérienne et archéenne d'un compartiment environnemental (sols, eaux...). En effet, l'analyse des séquences renseigne sur l'identité et l'abondance relative des microorganismes présents dans un milieu. Les connaissances sur le rôle de certains taxons dans les cycles biogéochimiques connus donnent un aperçu du potentiel métabolique de la microflore de l'environnement étudié. L'impact d'une pollution sur la microflore du site peut être évaluée ainsi que la présence de taxons impactant les polluants. En plus du séquençage de gènes universels tels que celui codant l'ARNr 16S, la méthode peut également être utilisée sur d'autres marqueurs, notamment sur des gènes de dégradation ou transformation des polluants, pour caractériser la diversité et l'abondance relative de groupes métaboliques définis. Le séquençage ciblé du gène codant l'ARNr 16S fournit une identification des microorganismes présents au niveau du genre et une indication de leur abondance relative dans un milieu donné.

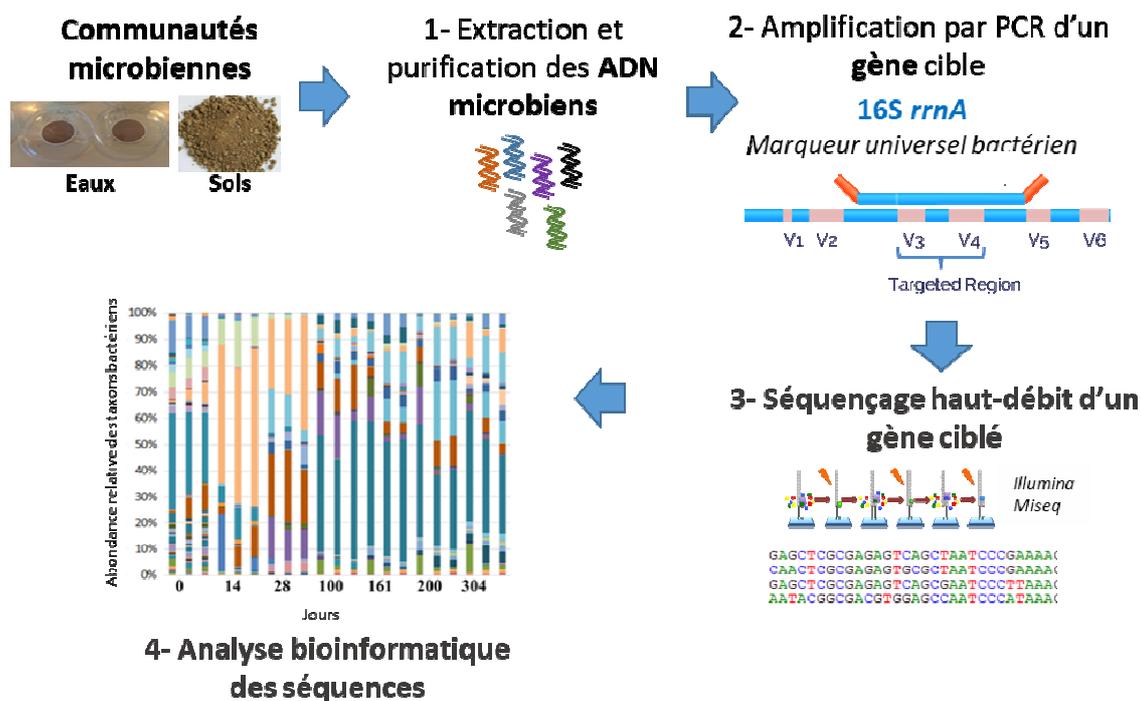


Figure 3. Les étapes du séquençage haut-débit (figure issue des fiches techniques innovantes <http://ssp-infoterre.brgm.fr/fiches-sites-sols-pollues-techniques-innovantes>)

Autres technologies omiques : les outils de demain ?

La métatranscriptomique

La métatranscriptomique consiste à séquencer de manière aléatoire les ARN messagers microbiens qui peuvent être utilisés pour identifier la régulation et l'expression des fonctions biologiques d'une communauté microbienne, basé sur l'ARN transcrit dans différentes conditions (Nair and Raja 2017). L'avantage majeur de travailler sur les ARN d'une communauté est d'en étudier la fraction « active ». En effet, l'ADN permet d'identifier « qui est là » mais l'ARN permet d'identifier « qui est là et qui est actif, voire qui fait quoi ». Aujourd'hui la limite majeure d'utilisation des ARN est leur demi-vie courte et la difficulté de d'extraction dans la matrice sol.

La métaprotéomique

L'analyse de la biodiversité fonctionnelle des communautés microbiennes peut également être appréhendée à travers l'étude des protéines produites par les microorganismes. La métaprotéomique consiste en l'étude de l'ensemble des protéines isolées d'un échantillon environnemental et permet une visibilité fonctionnelle des communautés (Nair and Raja 2017). La procédure requière une extraction des protéines du sol, leur séparation avec des approches d'électrophorèse à deux dimensions et enfin l'identification des protéines par spectrométrie de masse. Les difficultés de la métaprotéomique résident en l'extraction des protéines du sol qui s'avère être une faible source de protéines et le manque de référentiels pour identifier les protéines (Bastida et al. 2009). Une fois que ces questions seront résolues, la métaprotéomique pourrait fournir des informations sur l'état biogéochimique des sols et les bioréactions qui s'y produisent et être utilisée comme bioindicateur de la qualité des sols (Bastida et al. 2009).

La métabolomique

La métabolomique permet de réaliser des cartographies des profils métaboliques d'une communauté microbienne. Basée sur l'extraction et l'analyse chimique des métabolites produits par les microorganismes (acides aminés, acides organiques...) elle permet de mesurer des impacts de changements environnementaux sur les métabolismes bactériens ou de reconstruire des voies

métaboliques (Nair and Raja 2017). Cette méthode offre donc la possibilité de révéler des voies métaboliques complexes dans les communautés microbiennes des sols et d'avoir une cartographie de la fonctionnalité des sols. Cependant, il est encore nécessaire d'étudier ces profils métaboliques dans différentes situations afin de disposer de référentiels et permettre l'utilisation de ces approches pour une évaluation quantitative de la qualité des sols (Withers et al. 2020).

Quelle application de ces approches dans le cadre d'une réhabilitation écologique ?

Tous les approches d'écologie microbienne moléculaire sont issues de laboratoires de recherche. Bien que certaines de ces méthodes telles que la (méta)transcriptomique, la (méta)protéomique, la (méta)bolomique ou le séquençage global dans les sols ne soient pas encore assez mûrs pour des applications en routine de diagnostic du fonctionnement des sols, elles offriront demain de nouvelles perspectives de diagnostic. Les approches de génomique ou métagénomique sont par contre plus développées et les avancées ces dernières années en termes de génération et traitement des métadonnées les rendent accessibles *via* des prestataires de service. Elles tendent vers l'opérationnalité grâce notamment à la création progressive de référentiels tels que celui du RMQS porté par l'INRA et qui a conduit à la publication de l'atlas français des bactéries du sol (Karimi et al., 2019). A travers différents projets de recherche à différents échelles (dont le programme Bioindicateurs de l'ADEME²², des projets européens tels que ECOFINDERS²³) et des approches expérimentales, les connaissances en écologie microbienne des sols ont très fortement progressé ces dernières années et permettent une appréciation globale de l'état fonctionnel des sols. On sait aujourd'hui que la biodiversité microbienne des sols influence la stabilité et le fonctionnement des communautés (Tardy et al. 2014) et l'on voit émerger des recommandations pour l'utilisation de ces bioindicateurs dans la gestion de la fertilité des sols, en particulier des sols agricoles (Lemanceau et al. 2015).

D'autres approches proposées dans la matrice du projet RECORD sont la quantification de gènes spécifiques impliqués dans des cycles biogéochimiques tels que le cycle de l'azote qui va jouer un rôle central dans la fonctionnalisation des sols. Ces approches ne disposent pas aujourd'hui de référentiels d'interprétation et sont davantage étudiées dans des projets de recherche. Elles permettent de conclure sur l'état fonctionnel d'un sol et une re-fonctionnalisation en interprétant les données en fonction de celles d'un sol témoin non perturbé par exemple. Il sera nécessaire de mettre en place de nouveaux référentiels pour interpréter correctement ces données quantitatives et également compter sur leur déploiement plus massif qui permettrait d'enrichir les connaissances et d'améliorer les diagnostics.

Conclusion : les enjeux de demain

Les approches omiques apportent une compréhension très fine de la diversité et du fonctionnement des sols. Cependant, comme discuté dans cette note, à ce jour seul un nombre restreint d'approches peut être utilisé en routine comme bioindicateurs des sols avec des référentiels d'interprétation qui restent encore très insuffisants. De plus, bien que la littérature scientifique et technique soit très riche dans des contextes agricoles, les données restent encore à acquérir sur les sols dégradés et réhabilités.

- Parmi les enjeux de demain nous pouvons donc citer :
- La construction de référentiels en fonction des types de sols et surtout en fonction des enjeux et fonctions ciblés par la réhabilitation (par usage) ;
- Le transfert technique de la recherche vers l'appliqué qui émerge concrètement par le développement de startup tels que Novasols-Experts (<https://novasol-experts.com>), Sol&Co (<https://sol-et-co.com>) ou Argaly (<https://www.argaly.com>) et des avancées technologiques pour vulgariser d'avantage les approches « méta » ;

²² <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/>

²³ <https://projects.au.dk/ecofinders/>

- Le développement de nouvelles méthodes et outils tels que la miniaturisation du séquençage avec le Minion (Oxford Nanopore Technologies), la diminution des coûts des approches et la normalisation des techniques d'un bout à l'autre de la chaîne pour permettre la comparaison de données à grande échelle.

Références

- Ademe. 2017. Microbiologie moléculaire au service du diagnostic environnemental. 174 p.
- Bastida, F., Moreno, J. L., Nicolás, C., Hernández, T., & García, C. (2009) Soil metaproteomics: a review of an emerging environmental science. Significance, methodology and perspectives. *European Journal of Soil Science*, 60, 845-859.
- Biswas, R. & Sarkar, A. (2018). 'Omics' Tools in Soil Microbiology: The State of the Art. In *Advances in Soil Microbiology: Recent Trends and Future Prospects: Volume 1: Soil-Microbe Interaction*, eds. T. K. Adhya, B. Lal, B. Mohapatra, D. Paul & S. Das, 35-64. Singapore: Springer Singapore.
- Bouchez, T., Blioux, A.-L., Dequiedt, S., Domaizon, I., Dufresne, A., Ferreira, S., Godon, J.-J., Hellal, J., Joulain, J., Quaiser, A., Martin-Laurent, F., Mauffret, A., Monier, J.-M., Peyret, P., Schmitt-Koplin, P., Sibourg, O., d'Oiron, E., Bispo, A., Deportes, I., Grand, C., Cuny, P., Maron, P.-A., & Ranjard, L. (2017) La microbiologie moléculaire au service du diagnostic environnemental. *Etude et Gestion des Sols*, 24, 9-31.
- Denonfoux, J., Parisot, N., Dugat-Bony, E., Biderre-Petit, C., Boucher, D., Morgavi, D.P., Le Paslier, D., Peyretailade, E., & Peyret, P. (2013) Gene Capture Coupled to High-Throughput Sequencing as a Strategy for Targeted Metagenome Exploration. *DNA Research*, 20, 185-196.
- Dequiedt, S., Saby, N.P.A., Lelievre, M., Jolivet, C., Thioulouse, J., Toutain, B., Arrouays, D., Bispo, A., Lemanceau, P. & Ranjard, L. (2011) Biogeographical patterns of soil molecular microbial biomass as influenced by soil characteristics and management. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 641-652.
- Dugat-Bony, E., Peyretailade, E., Parisot, N., Biderre-Petit, C., Jaziri, F., Hill, D., Rimour, S., & Peyret, P. (2012) Detecting unknown sequences with DNA microarrays: explorative probe design strategies. *Environmental Microbiology*, 14, 356-371.
- Feng, Y.Y. (2013) Omics breakthroughs for environmental microbiology. *Omics Environ Microbiol* 40:18–33.
- Garlapati, D., B. Charankumar, K. Ramu, P. Madeswaran & M. V. Ramana Murthy (2019) A review on the applications and recent advances in environmental DNA (eDNA) metagenomics. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18, 389-411.
- Handelsman, J., M. R. Rondon, S. F. Brady, J. Clardy & R. M. Goodman (1998) Molecular biological access to the chemistry of unknown soil microbes: a new frontier for natural products. *Chemistry & Biology*, 5, R245-R249.
- Karimi, B., Chemidlin Prévost-Bouré, N., Dequiedt, S., Terrat, S. et Ranjard, L. 2018. Atlas Français des bactéries du sol, Biotope, Mèze, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 192p.
- Lemanceau, P., P.-A. Maron, S. Mazurier, C. Mougél, B. Pivato, P. Plassart, L. Ranjard, C. Revellin, V. Tardy & D. Wipf (2015) Understanding and managing soil biodiversity: a major challenge in agroecology. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 67-81.
- Nair, G. R. & S. S. S. Raja (2017) Decoding Complex Soil Microbial Communities through New Age “Omics”. *Journal of Microbiol and Biochemical Technology*, 9, 301-309.
- Ranjard, L., F. Poly & S. Nazaret (2000) Monitoring complex bacterial communities using culture-independent molecular techniques: application to soil environment. *Research in Microbiology*, 151, 167-177.

- Ruppert, K. M., R. J. Kline & M. S. Rahman (2019) Past, present, and future perspectives of environmental DNA (eDNA) metabarcoding: A systematic review in methods, monitoring, and applications of global eDNA. *Global Ecology and Conservation*, 17, e00547.
- Taberlet P, Bonin A, Zinger L, Coissac E. 2018 Environmental DNA For Biodiversity Research and Monitoring. Oxford university Press.
- Tardy, V., O. Mathieu, J. Lévêque, S. Terrat, A. Chabbi, P. Lemanceau, L. Ranjard & P.-A. Maron (2014) Stability of soil microbial structure and activity depends on microbial diversity. *Environmental Microbiology Reports*, 6, 173-183.
- Terrat, S., P. Plassart, E. Bourgeois, S. Ferreira, S. Dequiedt, N. Adele-Dit-De-Renseville, P. Lemanceau, A. Bispo, A. Chabbi, P.-A. Maron & L. Ranjard (2015) Meta-barcoded evaluation of the ISO standard 11063 DNA extraction procedure to characterize soil bacterial and fungal community diversity and composition. *Microbial Biotechnology*, 8, 131-142.
- Withers, E., P. W. Hill, D. R. Chadwick & D. L. Jones (2020) Use of untargeted metabolomics for assessing soil quality and microbial function. *Soil Biology and Biochemistry*, 143, 107758.

