

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

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

MISE EN APPLICATION SUR CAS REELS ET AMÉLIORATION DE L'OUTIL

***A TOOL TO DESIGN AND MONITOR THE ECOLOGICAL
REHABILITATION OF DEGRADED SITES
INTEGRATING NATURE-BASED SOLUTIONS
IMPLEMENTATION ON ACTUAL CASES AND IMPROVEMENT OF THE TOOL***

juillet 2023

F. BAPTIST, N. KHEDIM – Soltis environnement
J. HELLAL, E. LIMASSET – BRGM
C. ANGLADA, S. BENZEKRI – Vertigo Lab

soltis
environnement

VERTIGOLAB
ECONOMIE & ENVIRONNEMENT

brgm
Géosciences pour une Terre durable

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 collégalement 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.

- ✓ Ce travail est la poursuite des études RECORD :
 - « Mesure de la biodiversité et évaluation des services écosystémiques des milieux restaurés. Méthodes et retours d'expériences » (réf. 17-1021/1A)
 - « 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 » (réf. 19-1024/1A).
- ✓ 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. Mise en application sur cas réels et amélioration de l'outil, 2023, 107 p, n°22-1027/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

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 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 ou rural se multiplient depuis quelques années. Un des enjeux actuels des projets de réaménagement est de favoriser la renaturation des milieux naturels et contribuer à l'amélioration de la qualité de vie des usagers. 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 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 de 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. L'outil permet enfin de conserver la mémoire des données et actions entreprises sur un site.

MOTS CLES

Milieux urbains, milieux naturels, 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 fighting 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 current challenges of redevelopment projects is to encourage the renaturation of natural environments and contribute to improving the quality of life of inhabitants and users. Nevertheless, data on combined experiences of ecological rehabilitation and remediation remain limited, particularly with regards 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 (NBS). With a view towards 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 NBS 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. Finally, the tool makes it possible to conserve the memory of the data and actions undertaken on a site.

KEY WORDS

Urban and natural environments, rehabilitation, polluted sites and soils, ecological functions, ecosystem services, indicators, nature-based solutions

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 (Géorisque ex-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 – 2012, SOeS-Gis Sol), aux 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 pollués² 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 usagers³ 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 dépollution⁴ 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 urbain⁵ et donc la fourniture de services écosystémiques⁶ (SE) et de (2) témoigner du rétablissement d'un écosystème fonctionnel et autonome.

Une première étude, financée par l'association RECORD (RECORD 2018) a abouti à un état de l'art didactique ainsi qu'à un bilan critique des méthodes de mesure de la biodiversité, des fonctions⁷ et des SE dans le contexte particulier de sites dégradés 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.

Initialement prévue pour s'appliquer uniquement aux milieux prairiaux, une seconde étude a été réalisée afin de décliner et adapter ce premier travail 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 (RECORD 2022).

Dans le cadre de cette seconde phase de travail, une démarche conceptuelle et méthodologique a été élaborée 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 (SfN) ;
- De suivre par le biais d'indicateurs la restauration du fonctionnement de ces écosystèmes urbains et des SE qui y sont associés.

Study context and objectives

As a result of its industrial past, France lists more than 6,800 polluted sites that require action from the public authorities. A majority of these sites are located in urban or peri-urban areas (Géorisque ex-BASOL – 2018). In 2014, the ALUR law (access to housing and town renovation) and the LAAF law (future of agriculture, food and forestry) underlined the necessity to rethink the construction of cities on themselves, encouraging the reappointment of these abandoned, often degraded areas, with the aim of fighting soil artificialization. In France, over the past thirty years, soil artificialization has maintained a high rate (~ 137 km² / year between 2006 and 2012⁸) at the expense of agricultural land (CGDD 2018). Reclaiming degraded land is therefore a major issue in the remodeling of urban landscapes. In 2018, the French government made a strong commitment towards the biodiversity plan with the aim of achieving "zero net artificialization" (ZAN).

In the light of these observations, expenses related to the redevelopment of polluted sites have increased sharply over the past fifteen years (Bouagal, 2012) and development projects represent around 70% of the decontamination market (studies and works) (MTES 2017a, b). One of the challenges of redevelopment is to promote the creation of natural spaces in the city and to restore their general functionality so that residents and users can benefit from the resulting services (well-being, reduction of risks linked to flooding, reduction of health risks etc., Moll and Petit, 1994). Nevertheless, data on combined experiences of ecological rehabilitation and depollution remain limited, particularly regarding the general functioning of the restored ecosystem. Very few operational tools (methodology / indicators) enable (1) to guide the design of a redevelopment project to promote ecological rehabilitation of part of the urban ecosystem and therefore the provision of ecosystem services (ES) and (2) bear witness to the reestablishment of a functional and autonomous ecosystem.

A first study, financed by the RECORD association (RECORD 2018), resulted in a didactic state of the art as well as a critical assessment of methods for measuring biodiversity, functions and ES in the specific context of degraded sites rehabilitated as grasslands. Forty-six function indicators qualifying the subterranean and aerial compartments and twenty-one ES indicators were thus identified.

Initially intended to apply only to grassland environments, a second study was carried out to adapt this initial work to the redevelopment of degraded sites (including polluted sites) in an urban context, with the aim of encouraging the creation of functional natural spaces that provide services for users (RECORD 2022).

As part of this second phase of work, a conceptual and methodological approach was developed to:

- *Guide the redevelopment of degraded sites towards a reduction in the artificialization of urban ecosystems by encouraging the implementation of nature-based solutions (NBS).*
- *A NBS corresponds to a rehabilitation (ecological or SSP), management and/or preservation action aimed at maintaining, restoring or creating natural ecosystems to respond directly to societal issues in an effective and adaptive way, while ensuring human well-being (provision of ES), benefits for biodiversity and ecosystem functioning;*
- *Use indicators to monitor the restoration of these urban ecosystems and the associated SE.*

Cette démarche visait principalement 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). Il s'agissait donc 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).

Dans une optique d'opérationnalisation, un outil Excel assorti d'une notice d'utilisation a été élaboré sur la base de cette démarche (prototype 1.0). Cette première version de l'outil 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 de SfN pouvant idéalement se substituer à des solutions conventionnelles fortement impactantes.

Cet outil propose également des indicateurs de suivi des fonctions et services écosystémiques permettant de mesurer le succès de la réhabilitation écologique mise en œuvre sur le site.

Testé dans le cadre d'un atelier participatif, les retours ont mis en avant la nécessité d'affiner les propositions de SfN et d'indicateurs en fonction du contexte du projet. En effet, les préconisations émanant de ce premier prototype restaient trop larges. Des améliorations en termes d'ergonomie étaient par ailleurs nécessaires.

Dans ce contexte, une troisième phase du projet RECORD a donc été lancée dans l'objectif d'améliorer le prototype et d'élargir son spectre d'intervention en le rendant utile à tout type de contexte (urbain, péri-urbain et rural).

La démarche proposée est la suivante :

- Conception d'un guide d'entretien dans l'objectif de caractériser finement le type d'itinéraire technique mis en œuvre par les membres de l'association RECORD dans le cadre de leurs activités ;
- Réalisation d'entretiens, collecte d'éléments sur des cas d'études réels et synthèse ;
- Amélioration du prototype dans sa version 2.0 ;
- Tests sur les cas d'étude proposés par les membres de l'association RECORD ;
- Finalisation du prototype dans sa version 2.1.

This approach was primarily aimed at the ecological remediation stage, which nowadays usually takes place after the SSP remediation stage (implementation of the management plan). The aim was therefore to guide project developers in the redevelopment of a site with only residual pollution (acceptable pollution in relation to the uses planned after SSP rehabilitation).

With a view to operationalization, an Excel tool with instructions for use was developed on the basis of this approach (prototype 1.0). This first version of the tool provides access to a list of NBS that can ideally replace high-impact conventional solutions, based on site-specific input data supplied by the user (manager or manufacturer).

The tool also provides indicators for monitoring ecosystem functions and services, enabling the success of the ecological rehabilitation implemented on the site to be measured.

Tested in a participatory workshop, feedback highlighted the need to refine the NBS and indicator proposals according to the project context. Indeed, the recommendations emanating from this first prototype remained too broad. Ergonomic improvements were also needed.

Within this context, a third phase of the RECORD project was launched, with the aim of improving the prototype and broadening its spectrum of use, making it useful in all types of context (urban, peri-urban and rural).

The proposed approach is as follows:

- *Design of an interview guide with the aim of finely characterizing the type of technical itinerary implemented by the members of the RECORD association as part of their activities;*
- *Carrying out interviews, collecting data on real case studies and synthesizing the results;*
- *Improvement of the prototype to version 2.0;*
- *Tests on case studies proposed by members of the RECORD association;*
- *Finalization of prototype version 2.1.*

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 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.

³ Il est important de noter que suivant les techniques de dépollution retenues, les fonctions du sol peuvent être également impactées (perdues, maintenues, ou améliorées).

⁴ 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.

⁵ 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.

⁶ Services que les populations humaines obtiennent directement ou indirectement des fonctions des écosystèmes » (Constanza et al. 1997 ; MEA 2005). Voir définition en annexe 1.

⁷ Les fonctions écologiques désignent les processus naturels inhérents à un écosystème tels que la fonction chlorophyllienne ou le cycle de l'eau.

⁸ Source: SOeS-Gis Sol.

La démarche conceptuelle et méthodologique

Concepts

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. Ces enjeux 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 telle que la commune) ou une échelle plus **locale** (par ex. échelle de l'écosystème urbain élémentaire, du projet d'aménagement, de l'habitat etc.). 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), un enjeu lié à la présence d'une pollution résiduelle 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.

Deux grands types de solutions de réaménagement peuvent être choisies par le porteur de projet :

- Un **scénario de réaménagement conventionnel** par la mise en œuvre des méthodes conventionnelles de réaménagement ou « Solutions grises ». Cela peut inclure la construction d'une digue (avec enrochement) limitant le risque d'inondation, la création d'un bassin artificiel « de surstockage » stockant les excédents d'eau ou la mise en place généralisée de climatiseurs dans les nouveaux bâtiments limitant les risques sanitaires liés à des températures trop élevées ;
- Un **scénario de réaménagement fondé sur la nature** basé sur la présence et le fonctionnement des milieux naturels. Il peut proposer par exemple 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 favoriser la plantation d'arbres et de végétation adaptée sur toute l'emprise projet limitant 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*.

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 de réaménagement et du contexte dans lequel celui-ci se situe, tous milieux confondus (par ex. en milieux urbains, ce sera à l'échelle de l'écosystème urbain élémentaire).

Conceptual and methodological approach

Concepts

Since the 2018 Biodiversity Plan, a public policy framework was implemented to set a goal of Zero Net Artificialization (ZAN) in France. In this context, developers are invited to reconsider their choices and move towards innovative development methods based on the rehabilitation and/or conservation of natural spaces.

Generally speaking, when redeveloping degraded sites, project developers need to consider the issues they wish to take into account when designing their projects. These issues can be economic, social or environmental in nature, and can be expressed at several scales: a planning scale (e.g. the urban ecosystem such as the commune) or a more local scale (e.g. the scale of the elementary urban ecosystem, the development project, the habitat, etc.). This may for example, include an issue linked to flood risk (presence of a flood risk prevention plan in the project), an issue linked to the presence of residual pollution, or an issue linked to climatic conditions (risk of heat island formation, which it will be important to fight).

Once the project developer has identified these issues, they can then design the type of solution they will implement to address them.

- *A conventional redevelopment scenario using conventional redevelopment methods or "Grey Solutions". This may include the construction of a dyke (with riprap) to limit the risk of flooding, the creation of an artificial "overstock" basin to store excess water, or the widespread installation of air conditioning units in new buildings to limit the health risks associated with too-high temperatures;*
- *A nature-based redevelopment scenario based on the presence and functioning of natural environments. This could, for example, include a vegetated basin to contain floodwaters in the event of flooding, anticipate the preservation of (semi)natural environments as close as possible to the watercourse and which could be used by farmers (outside flood periods), or encourage the planting of trees and suitable vegetation throughout the project area, thus limiting temperature increase in summer.*

The proposals arising from this second scenario call for so-called NBS.

Approach

In the context of this study, the proposed approach and the associated tool are based first and foremost on the identification by the project manager of the issues observed at the scale of the redevelopment project and the context in which it is located, all environments taken together (e.g. in urban environments, this will be at the scale of the elementary urban ecosystem).

Depending on the issues at stake, the tool designed will provide:

- *A panel of development solutions (NBS) to support pollution management (in the case of residual pollution) or ecological rehabilitation of degraded habitats;*
- *A list of indicators to monitor the effectiveness of the measures, relating to the ES rendered by the site or the functions expressed therein.*

Selon ces enjeux, l'outil conçu lui permet de disposer de :

- Un panel de solutions d'aménagement (SfN) pour appuyer la réhabilitation SSP (en cas de pollution résiduelle) ou écologique des habitats dégradés ;
- Une liste d'indicateurs pour suivre l'effectivité des mesures, relatifs aux SE rendus par le site ou aux fonctions qui s'y expriment.

La Figure 1 présente de manière très simplifiée les données d'entrée et de sortie de l'outil.

Figure 1 provides a highly simplified presentation of the tool's input and output data.

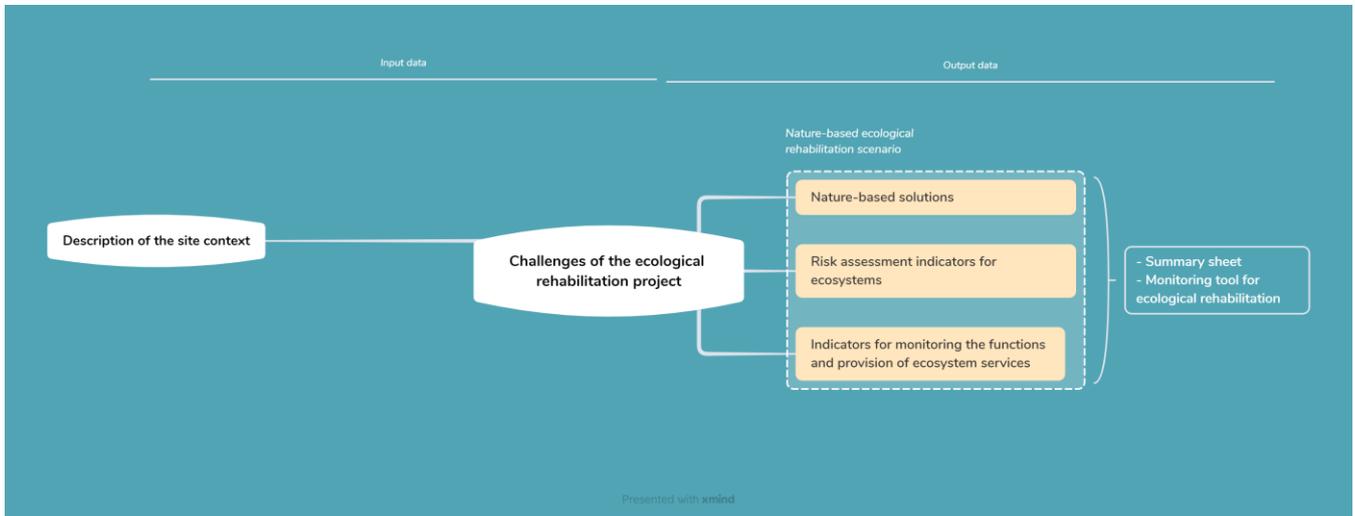


Figure 1: Schéma simplifié de la démarche conceptuelle de l'outil (RECORD, 2023)
Figure 1: Simplified diagram of the tool's conceptual approach (RECORD, 2023)

Dans les faits, la mécanique de l'outil se base sur un certain nombre de matrices d'interrelations qui permettent d'associer les enjeux et le type de réhabilitation envisagé aux SfN, SE et fonctions.

Echelle spatiale et temporelle

Selon le type d'enjeu ou de SfN, l'échelle à laquelle sont suivies les mesures diffère.

Certaines SfN sont par exemple menées à l'échelle du projet de réhabilitation (ex. stratégies d'aménagement spécifiques de densification). Le suivi sera à réaliser à **l'échelle de l'écosystème urbain élémentaire** selon la définition donnée par EFESE

En revanche, d'autres types de SfN ne peuvent être évalués qu'à l'échelle de l'habitat, tout comme le suivi de la restauration de certaines fonctions et SE (ex. action de phytoremédiation). Les indicateurs proposés devront donc être renseignés à **l'échelle de l'habitat**.

Sur le plan temporel, afin de vérifier le succès de la réhabilitation écologique, les indicateurs proposés doivent être collectés a minima avant le démarrage du projet et une fois le projet de réaménagement mis en œuvre et effectif. Il est également possible de les mesurer durant toute la mise en œuvre du projet pour s'assurer d'être sur la trajectoire souhaitée de réhabilitation.

In practice, the mechanics of the tool are based on a number of inter-relationship matrices, which make it possible to associate issues and the type of rehabilitation foreseen with NBS, ES and functions.

Spatial and temporal scale

Depending on the type of issue or NBS, the scale at which measures are monitored differs.

Some NBS are for example carried out at the scale of the rehabilitation project (e.g. specific densification strategies). Monitoring is carried out at the scale of the elementary urban ecosystem as defined by EFESE.

On the other hand, other types of NBS can only be assessed at habitat level, as can the monitoring of the restoration of certain functions and ES (e.g. phytoremediation actions). The proposed indicators should therefore be provided at habitat level.

In terms of time, in order to check the success of the ecological rehabilitation, the proposed indicators should be collected at least before the start of the project and once the redevelopment project has been implemented and is effective. It is also possible to measure them throughout the implementation of the project to ensure that we are on the desired rehabilitation trajectory.

Les typologies en appui à la démarche et indicateurs associés

Typologie des enjeux

La démarche méthodologique de l'étude propose une entrée par la qualification des enjeux auxquels est soumis le projet de réaménagement.

La typologie de ces enjeux a été réalisée sur la base des résultats obtenus dans le cadre du projet « Nature4cities 9 ». On distingue ainsi les enjeux selon le type de problématique qu'ils adressent (climatique, environnemental, social, relatif aux ressources) (Tableau 1).

Supporting typologies and associated indicators

Typology of issues

The study's methodological approach is based on a classification of the issues to which the redevelopment project is subject.

The typology of these issues is based on the results of the "Nature4cities" project. Issues are distinguished according to the type of problem they address (climatic, environmental, social, resource-related) (Table 1).

Tableau 1 : Typologie des enjeux retenus dans le cadre de cette étude
Table 1: Typology of issues selected for this study

Category	Major issue	Issue
CLIMATE	Climate problems	Mitigation of Climate change
		Adaptation to Climate change
ENVIRONMENT	Quantitative management of water resources	Infiltration issues for groundwater recharge
		Flood management
	Qualitative management of water resources	Protection of water resources from pollution on site
		Water quality improvement through natural purification processes
	Air quality management	Air quality management
	Soil quality management	Health issues linked to the presence of pollutants in soils
Soil re-functionalization issues for soil health		
Preservation or restoration of biodiversity	Preservation and restoration of biodiversity in urban ecosystems	
RESOURCES	Resource efficiency	Production of resources (water, energy, food)
SOCIAL	Public health and well-being	Mitigation of noise pollution through dense plant cover
		Improving landscape quality

Typologie des services écosystémiques

Depuis la publication du MEA (Constanza et al. 1997 ; MEA 2005), le concept de SE a évolué et sa définition a été précisée. La Stratégie nationale pour la biodiversité (2011-2020) mentionne « l'utilisation par l'Homme des fonctions de certains écosystèmes, à travers des usages et une réglementation qui encadrent cette utilisation » (MEDDE, 2012). L'EFESE a récemment proposé une nouvelle classification des SE (Puydarrieux, Beyou 2017) qui ne retient que trois catégories : biens produits par les écosystèmes, services de régulation, services culturels.

La démarche méthodologique retenue et proposée ici reprend la typologie des SE du groupe de travail EFESE en y ajoutant le patrimoine naturel (biodiversité ordinaire et endémique) afin d'intégrer les SE reposant sur le non-usage (identification, legs, altruisme) (Tableau 2).

Typology of ecosystem services

Since the publication of the Millennium Ecosystem Assessment (Constanza et al. 1997; MEA 2005), the concept of ES has evolved and its definition has been clarified. The National Biodiversity Strategy (2011-2020) mentions "the use by Man of the functions of certain ecosystems, through uses and regulations that frame this use" (MEDDE, 2012). EFESE has recently proposed a new classification of ES (Puydarrieux, Beyou 2017) that retains only three categories: goods produced by ecosystems, regulating services, cultural services.

The methodological approach adopted and proposed here takes up the EFESE working group's typology of ES, adding natural heritage (ordinary and endemic biodiversity) in order to integrate ES based on non-use (identification, legacies, altruism) (Table 2).

⁹ <https://geocluster4nbs.nature4cities-platform.eu/#nbs>

Tableau 2 : Typologie de SE retenus (adapté de la typologie du groupe de travail EFESE)
Table 2: Typology of selected ES (adapted from the EFESE working group typology)

ES category	ES title
Ecosystem goods	Products of agriculture (farming, animal husbandry, shared gardens)
	Gathering products
	Beekeeping
Regulating services Global	Climate regulation
	Local climate regulation
	Air quality regulation
	Regulation of noise pollution
	Flood regulation
	Regulation of water resources
	Regulation of soil quality
Pollination	
Cultural services	Recreational and leisure interest
	Landscape amenities
	Educational, scientific and pedagogical interest
Natural heritage	Protected ecosystem components and ordinary biodiversity

Typologie des fonctions

Les **fonctions écologiques** désignent les processus naturels inhérents à un écosystème. Chaque fonction peut être caractérisée par un ou plusieurs processus chimiques, physiques ou biologiques, potentiellement générateurs de SE.

On distingue trois grandes catégories de fonctions (Tableau 3) :

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

La démarche méthodologique intègre cette notion, en retenant seulement les fonctions pouvant être exprimées par des milieux naturels présents dans les écosystèmes urbains. La liste des fonctions retenues est présentée dans le tableau suivant.

Typology of functions

Ecological functions refer to the natural processes inherent in an ecosystem. Each function can be characterized by one or more chemical, physical or biological processes, potentially generating ES.

There are three main categories of function (Table 3):

- *hydrogeomorphological (e.g. runoff slowdown, sediment retention, groundwater recharge, soil stabilization);*
- *biogeochemical (e.g. purification, carbon sequestration);*
- *biological (e.g. species habitats, connectivity).*

The methodological approach integrates this notion, retaining only those functions that can be expressed by natural environments present in urban ecosystems. The list of functions retained is presented in the table below.

Tableau 3 : Typologie des fonctions retenues
Table 3: Typology of selected functions

Main types of function	Function title
Hydrogeomorphological functions	Water retention
	Sediment retention
	Water circulation and infiltration
	Stable physical support
Biogeochemical functions	Storage, recycling and transformation of organic matter (carbon)
	Retention, transformation and elimination of organic and inorganic pollutants (water, air, soil)
	Retention and supply of nutrients for soil organisms and plants
	Control of atmospheric chemistry and contribution to climatic processes (temperature, hygrometry)
Biological functions	Species habitats
	Connectivity

Typologie des solutions fondées sur la nature

La typologie de SfN est inspirée des projets européens Nature4cities et ThinkNature ainsi que des retours des membres de l'association RECORD, qui définissent trois grands types de SfN :

- Type 1 : Actions liées aux stratégies de réaménagement urbain et/ou de conservation des écosystèmes ;
- Type 2 : Actions de gestion durable des écosystèmes ;
- Type 3 : Actions de création de nouveaux écosystèmes.

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. Elle est également reconnue par le standard instauré par l'UICN ([Global Standard](#), juillet 2020).

Notre approche reprend partiellement cette typologie. Seules les SfN de type 2 et 3 ont été retenues, les SfN de type 1 étant plus pertinentes dans le contexte de la planification du territoire que dans le contexte d'un projet de réaménagement.

Les SfN de type 2 - Actions de gestion durable des écosystèmes, ont été classées en 3 sous-types :

- Milieux cultivés (ex. Mise en œuvre d'une fertilisation raisonnée, ajout de paillage, ruches, etc.) ;
- Parcs et jardins (ex. gestion différenciée, hôtel à insectes, compostage de déchets organiques, etc.) ;
- Milieux naturels (ex. utilisation d'animaux de pâturage, fauche tardive, mis en défens, etc.).

Les SfN de type 3 - Actions de création de nouveaux écosystèmes, ont été classées en 6 thématiques :

- Pollution (ex. phytoextraction, phytostabilisation, biodégradation dynamisée, etc.) ;
- Sol (ex. actions d'amélioration de la qualité du sol, récupération de l'horizon de surface conservé, revégétalisation spontanée, etc.) ;
- Végétalisation (ex. utilisation de la végétation préexistante, ensemencement, plantation destinée à l'alimentation, à la production de biomasse, etc.) ;
- Surfaces construites (ex. aménagement d'un toit végétalisé, création d'un système de mur végétalisé, etc.) ;
- Erosion et stabilisation (ex. Mise en place d'aménagements anti-érosifs, reprofilage des berges, etc.) ;
- Eau (ex. désimperméabilisation du site, création de zones humides artificielles, réalisation d'un champ d'expansion des crues, etc.).

Présentation des indicateurs

Indicateurs de fonctions

Les indicateurs de fonctions ont été choisis sur la base des indicateurs proposés dans le cadre des phases 1 et 2 (Record, 2018, 2021).

Ils permettent :

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

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 ;

Typology of nature-based solutions

The NBS typology is inspired by the European Nature4cities and ThinkNature projects and feedback from RECORD association members, who define three main types of NBS:

- *Type 1: Actions linked to urban redevelopment and/or ecosystem conservation strategies;*
- *Type 2: Sustainable ecosystem management actions;*
- *Type 3: Actions to create new ecosystems.*

This typology was first proposed by Balian, Eggermont and Le Roux (2014) as part of a recognized expert working group on NBS. It is also recognized by the standard introduced by the UICN (Global Standard, July 2020).

Our approach is partly based on this typology. Only type 2 and 3 NBS have been considered, as type 1 NBS are more relevant in the context of land-use planning than in the context of a redevelopment project.

Type 2 NBS - Actions for the sustainable management of ecosystems - have been classified into 3 subtypes:

- *Cultivated environments (e.g. implementation of reasoned fertilization, addition of mulch, beehives, etc.);*
- *Parks and gardens (e.g. differentiated management, insect hotels, composting of organic waste, etc.);*
- *Natural environments (e.g. use of grazing animals, late mowing, fencing, etc.).*

Type 3 NBS - Actions to create new ecosystems, have been classified into 6 themes:

- *Pollution (e.g. phytoextraction, phytostabilization, dynamized biodegradation, etc.);*
- *Soil (e.g. actions to improve soil quality, recovery of preserved surface horizon, spontaneous revegetation, etc.);*
- *Revegetation (e.g. use of pre-existing vegetation, seeding, planting for food, biomass production, etc.);*
- *Constructed surfaces (e.g. installation of a green roof, creation of a green wall system, etc.);*
- *Erosion and stabilization (e.g. installation of anti-erosion measures, bank reprofiling, etc.);*
- *Water (e.g. desealing soil, creation of artificial wetlands, creation of flood expansion fields, etc.).*

Presentation of indicators

Function indicators

Function indicators have been chosen on the basis of those proposed for phases 1 and 2 (Record, 2018, 2021).

They make it possible to:

- *Establish an initial assessment of the environment;*
- *Monitor the restoration of functions during ecological rehabilitation;*
- *Validate the success and therefore the sustainability of a "green" rehabilitation project.*

For each indicator is indicated:

- *The associated function;*
- *The associated ES;*
- *The question it answers;*
- *The indicator's title;*
- *The measurement methods;*
- *Whether or not there is a known range of variation in the value of the indicator;*
- *The range of variation observed (if known);*
- *The degree of maturity according to three categories:*

- 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.

Indicateurs de services écosystémiques

Comme pour les indicateurs de fonctions, les indicateurs de SE ont été choisis dans le cadre des phases 1 et 2 (Record, 2018, 2021).

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

- Sélection des principaux SE rendus par les milieux naturels et semi-naturels ;
- 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.

Pour chaque indicateur est indiqué :

- 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.

Caractérisation des trajectoires de réhabilitation écologique et présentation des sites tests

Afin de proposer un outil témoignant le plus fidèlement possible des pratiques des acteurs de la réhabilitation écologique, différents entretiens ont été menés auprès des membres Record mais aussi de la société NOVASOL et du conseil départemental des Pyrénées Atlantique très actifs sur ces sujets.

Ces entretiens avaient pour objectif :

- De caractériser les scénarii de réhabilitation écologique les plus couramment mis en œuvre au sein de leur structure ;
- D'identifier des sites sur lesquels tester l'outil, une fois remanié, et s'assurer ainsi de la pertinence des solutions fondées sur la nature et des indicateurs proposés.

Cinq entretiens ont été menés sur la période juillet 2022 – septembre 2022. Un guide d'entretien semi-directif a été préalablement élaboré ainsi qu'un tableau permettant d'obtenir des informations précises sur le type de réhabilitation mise en œuvre.

Les résultats de ces entretiens indiquent plusieurs trajectoires possibles.

Si les habitats initiaux, support de la réhabilitation écologique, sont très diversifiés (ex. cultures, friches abandonnées

- *Category 1: operational, currently offered by private engineering firms and analysis laboratories;*
- *Category 2: quasi-operational, in the process of being transferred to the operational sphere;*
- *Category 3: still in the development stage, not available to restoration operators; in a conventional context;*
- *A cost estimate: low (< €100): €, moderate (< €1000): €€, high (> €1000): €€€;*
- *Available sources.*

Indicators of ecosystem services

As with function indicators, ES indicators were selected for phases 1 and 2 (Record, 2018, 2021).

The selection of indicators was based on the following criteria:

- *Selection of the main ES provided by natural and semi-natural environments;*
- *Adaptation to the context of ecological rehabilitation;*
- *Suitability for use by environmental economists in economic assessment of ES.*

For each indicator is indicated:

- *The ES targeted;*
- *The ES category;*
- *The beneficiaries of the ES, i.e. the people directly impacted by the benefits of the ES measured;*
- *The indicators used to evaluate the ES;*
- *Interpretation of these indicators and measurement methods;*
- *References.*

Characterization of ecological rehabilitation paths and presentation of test sites

In order to provide a tool that reflects as accurately as possible the practices of those involved in ecological rehabilitation, a number of interviews were conducted with Record members, as well as with NOVASOL and the Atlantic Pyrenees departmental council, all of which are very active in this field.

The aim of these interviews was to:

- *Characterize the ecological rehabilitation scenarios most commonly implemented within their structures;*
- *Identify sites on which to test the tool, once redesigned, and thus ensure the relevance of the NBS and indicators proposed.*

Five interviews were conducted over the period July 2022 - September 2022. A semi-directive interview guide was drawn up beforehand, along with a table providing precise information on the type of rehabilitation implemented.

The results of these interviews indicate several possible trajectories.

While the initial habitats supporting ecological rehabilitation are highly diversified (e.g. crops, recently abandoned wasteland, industrial extraction or waste sites, lagoons, etc.), the targeted habitats mainly include the rehabilitation of wet or non-wet grasslands and meadows.

Targeted uses mainly include

- *Renaturation;*
- *Energy production through solar farms or biomass energy.*

récemment, sites industriels d'extraction ou de déchets, bassins de lagunage, etc.), les habitats visés incluent principalement la réhabilitation de pelouses et prairies humides ou non humides.

Les usages visés, incluent majoritairement :

- Un usage de renaturation ;
- Un usage de production énergie avec la mise en place de fermes solaires ou d'exploitation de biomasse énergie.

Au-delà des trajectoires de réhabilitation écologique, différents paramètres complémentaires ont été identifiés relatifs aux enjeux visés, aux contraintes techniques et réglementaires, aux modalités de réhabilitation SSP le cas échéant. L'ensemble de ces éléments ont permis d'améliorer le protocole pour aboutir à un outil beaucoup plus opérationnel et ancré dans la réalité des projets de réaménagement.

Différents sites ont été proposés par les membres de l'association RECORD pour vérifier que l'outil réponde bien aux attentes des industriels et collectivité. Le test de l'outil sur ces sites a permis d'identifier différents points d'amélioration sur la qualification des usages, les mesures de gestion de la pollution, les contraintes liées aux eaux pluviales ou encore sur l'inclusion du SE « Pollinisation » et sur le suivi des fonctions. Des propositions d'amélioration en termes d'ergonomie ont également été évoquées.

Présentation générale de l'outil

Le prototype 2.1 a été conçu sous Excel. Il est fonctionnel sous la version Office 2019. Certaines fonctionnalités sont inopérantes pour des versions Excel inférieures à 2019.

L'outil se décline en différentes onglets détaillés dans le tableau ci-dessous.

Une notice d'utilisation de l'outil a par ailleurs été rédigée. Elle permet de guider l'utilisateur dans sa manipulation de l'outil. Cette notice a vocation à être mise à disposition de manière indépendante à tout futur utilisateur de l'outil.

In addition to the ecological rehabilitation trajectories, a number of additional parameters were identified, relating to the issues at stake, technical and regulatory constraints, and polluted soil rehabilitation methods where applicable. All of these elements were used to improve the protocol, resulting in a much more operational tool, anchored in the reality of redevelopment projects.

Various sites have been proposed by members of the RECORD association to check that the tool meets the expectations of both industry and local authorities. Testing the tool on these sites enabled us to identify various points for improvement, such as the qualification of uses, pollution management measures, stormwater constraints, the inclusion of the "Pollination" ES and the monitoring of functions. Suggestions for ergonomic improvements were also made.

General presentation of the tool

Prototype 2.1 was designed using Excel. It is functional with Office 2019. Some functionalities are inoperative for Excel versions dating before 2019.

The tool is available in various tabs, detailed in the table below.

A user manual has also been produced. It is intended to guide users through the use of the tool. These instructions are intended to be made available independently to all future users of the tool.

Tableau 4 : Présentation détaillée des différents onglets du prototype 2.1
Table 4: Detailed presentation of the various 2.1 prototype tabs

Tab title	Description
PREAMBLE	<p>This tab shows :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ The tool's authors ▪ Funders ▪ Objectives ▪ A summary of the project ▪ Update outlook ▪ Contacts for questions or comments <p>An explanation is also given to enable the user to start an analysis.</p>
CONTEXT OF THE SITE	<p>This tab corresponds to the elements that the user must enter to enable the tool to function.</p> <p>It concerns:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ The habitats observed on the site before rehabilitation (T0) ▪ The intended uses ▪ Soil pollution constraints ▪ The habitats targeted by rehabilitation (TF) ▪ Site constraints of a regulatory or technical nature <p>According to these elements, some of the issues proposed at the end of the form are pre-ticked. Users can modify the results by ticking/unticking those that do not appear relevant to their project, and then update the results.</p> <p>Depending on the issues and uses ticked, NBS, function and ES indicators are automatically selected in their respective tabs.</p>
Recommended	<p>As mentioned, there are two types of NBS, NBS linked to habitat creation/restoration and NBS linked to habitat management. Within these two categories, the proposed</p>

Tab title	Description
	NBS are broken down according to the compartment to which they apply and/or the nature of the residual pollution. NBS are automatically pre-ticked according to the elements indicated in the "Site context" tab. They can be unticked if they do not appear relevant. In this case, it is necessary to update the results using the corresponding button.
INDICATORS_RISKS	This tab introduces elements that were not initially present in the V1.0 prototype, directing the user to indicators that can be used to assess the environmental risk associated with any residual contamination. These indicators can be used as part of the TRIADE approach (ISO 192204 standard) currently being tested as part of various R&D projects.
INDICATORS_SE	This tab lists the ES indicators adapted to the challenges of the site and the ecological rehabilitation project. It is possible to tick those that will be specifically monitored. It is then necessary to click again on the "Update results" button.
INDICATORS_FUNCTIONS	This tab lists the function indicators adapted to the challenges of the site and the ecological rehabilitation project. It is possible to tick those that will be specifically monitored. It is then necessary to click again on the "Update results" button.
SYNTHESIS	This tab summarizes all the results as well as the selected NBS and indicators. Graphs illustrate the results obtained.
FOLLOW-UP	This tab is currently in the demonstrator phase. Its purpose is to monitor ecological rehabilitation using selected indicators. In this sense, the 2.1 prototype becomes a presentation and monitoring tool, enabling the memory of existing information to be preserved.
BD_RISK_VF	This tab presents the complete database of risk indicators. In fact, only those indicators considered as operational are presented in the "RISK_INDICATORS" tab.
BD_SE_VF	This tab presents the complete database of ES indicators. In fact, only those indicators considered as operational are presented in the "SE_INDICATORS" tab.
BD_FUNCTION_VF	This tab presents the complete database of function indicators. In fact, only those indicators considered as operational are presented in the "FUNCTION_INDICATORS" tab.
GLOSSARY	This tab defines the various terms used, such as "NBS", "SE", "Functions", etc.

Conclusion et perspectives

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

- D'orienter un projet de réaménagement de façon à favoriser la réhabilitation SSP et 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 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.

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.

Conclusion and Outlook

The aim of this study is to design a conceptual and methodological approach that will make it possible to:

- *Guide a redevelopment project in such a way as to promote the management of polluted sites and ecological rehabilitation of part of the urban ecosystem through the implementation of NBS and thus promote the provision of ES;*
- *Create tools to monitor, through indicators, the restoration of the functioning of these ecosystems and the associated ES.*

The work carried out as part of this study has resulted in the construction of an Excel-based prototype enabling a project developer to identify the nature-based solutions he could implement according to the issues at stake on his site, as well as the indicators for monitoring ecosystem services and functions to verify the success of ecological rehabilitation.

A user's guide is provided to accompany the tool.

In addition to the design of this tool, this work has enabled us to draw up a very comprehensive list of ecosystem service and function indicators that can be used in a broader context than that of this study. To our knowledge, this is the first time that such a database has been compiled in France.

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 incluant notamment :

- L'inclusion d'un volet complet sur l'évaluation du risque pour l'environnement liée à la présence éventuelle d'une pollution résiduelle (selon l'avancée des projets de R&D en cours financés par l'ADEME, tels que TRIPODE ou DIVA etc.);
- Le développement de l'onglet "Suivi" de manière à automatiser le suivi du ou des indicateurs sélectionnés dans l'onglet "Indicateurs_Fonction".

Enfin cet outil pourrait être transposé sous une interface web pour favoriser sa prise en main, son utilisation et améliorer l'ergonomie. Sa mise à jour en fonction des avancées scientifiques et réglementaires en serait également facilitée.

Overall, the results of this study enhance the range of tools available to project developers to help them design projects that have less environmental impact and contribute to reducing land artificialization.

There are a number of possible future developments for the tool, including

- *The inclusion of a complete section on environmental risk assessment linked to the possible presence of residual pollution (depending on the progress of ongoing R&D projects financed by ADEME, such as TRIPODE or DIVA, etc.);*
- *The development of the "Follow-up" tab to automatize monitoring of the indicator(s) selected in the "Indicators_Function" tab.*

Finally, this tool could be transposed to a web interface to make it easier to learn and use, and to improve ergonomics. It would also make it easier to update in line with new scientific and regulatory developments.

Bibliographie

- 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.
- 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.
- 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)
- CGDD. 2018a.** Objectif « Zéro artificialisation nette ». Éléments 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 EFESSE 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.
- 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>
- Jaunâtre 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.

- 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
- 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., Touroult 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.