

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**

EXEMPLES D'APPLICATION EN CONTEXTE URBAIN

***A TOOL TO DESIGN AND MONITOR THE ECOLOGICAL
REHABILITATION OF DEGRADED SITES INTEGRATING
NATURE-BASED SOLUTIONS***

EXAMPLES OF APPLICATION IN URBAN CONTEXT

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

© RECORD, 2020

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 town planning (ALUR), the law for the future of agriculture, food and forestry (LAAF) or even the strong commitment of France to achieve the objective of "zero net artificialisation" (ZAN) included in the biodiversity plan in 2018 all encourage the reappointment of formerly industrialized areas located in urban or peri-urban areas with the aim of promoting the construction of the city over the city and thus fighting against soil artificialisation. In this context, the rehabilitation and decontamination of degraded habitats in an urban context have been increasing in recent years. One of the challenges of these redevelopment projects is to promote the creation of natural areas in the city and to restore their general functionality so that residents and users can benefit from the resulting services. Nevertheless, data on the combined experiences of ecological rehabilitation and depollution remain limited, particularly with regard to the general functioning of the restored ecosystem. Likewise, very few operational tools (methodology / indicators) make it possible to orientate the design of a redevelopment project in such a way as to promote the reestablishment of a functional ecosystem, autonomous and that provides the population goods and services.

This study proposes a conceptual and methodological approach making it possible to orientate a redevelopment project in such a way as to promote 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 was developed on the basis of this approach. It allows, thanks to input data specific to a site and entered by its user (manager or manufacturer), to give access to a list of NBS that can ideally replace conventional solutions with a high environmental impact. This tool also offers 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.

Contexte de l'étude

La France recense plus de 6 800 sites 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, la loi ALUR et la loi LAAF ont souligné la nécessité de repenser la construction des villes sur elles-mêmes, encourageant la reconquête de ces espaces délaissés, souvent dégradés, dans l'objectif de lutter contre l'artificialisation des sols. En France, ces trente dernières années, l'artificialisation des sols a conservé un rythme soutenu (~137 km² / an entre 2006 – 2012¹), aux dépens de terres de très bonne qualité agricole (CGDD 2018). Ainsi, la reconquête du foncier dégradé constitue un enjeu majeur de la recomposition des fonctionnalités et des paysages urbains. Un engagement fort de la France pour atteindre l'objectif de « zéro artificialisation nette » (ZAN) a été inscrit au plan biodiversité en 2018.

Face à ce constat, les dépenses liées au réaménagement de sites pollués sont en très forte augmentation depuis une quinzaine d'années (Bouagal, 2012) et les projets d'aménagement représentent environ 70% du marché de la dépollution (MTES 2017a, b). Un des enjeux du 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 (bien-être, réduction des risques liés aux inondations, réduction des risques sanitaires etc., Moll et Petit, 1994). 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. 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 urbain² et donc la fourniture de services écosystémiques (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 permis un état de l'art didactique ainsi qu'un bilan critique des méthodes de mesure de la biodiversité, des fonctions et des SE en contexte de sites dégradés réhabilités en prairies. 46 indicateurs de fonction qualifiant le compartiment souterrain et aérien et 21 indicateurs de SE ont été identifiés et implémentés dans un prototype d'outil sous format Excel. 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 afin 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 des liens humains/nature et apparaît de plus en plus comme une alternative crédible et stratégique aux solutions d'aménagement conventionnelles dites « solutions grises ». Cette approche, et la démarche opérationnelle associée, permet d'orienter le projet de réaménagement vers une plus forte proportion d'espaces naturels réhabilités contribuant au bien-être des habitants ou à l'atténuation des changements climatiques (augmentation de la séquestration du carbone dans les sols, amélioration des conditions climatiques locales...). Elle propose également de s'appuyer sur les écosystèmes naturels et leurs fonctions écologiques pour accélérer le rétablissement d'un écosystème autonome.

Study context

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 (BASOL database - 2018). In 2014, the ALUR law and the LAAF law 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 artificialisation. In France, over the past thirty years, soil artificialisation has maintained a high rate (~ 137 km² / year between 2006 - 2012¹), at the expense 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 artificialisation" (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 (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 in regards to the general functioning of the restored ecosystem. Very few operational tools (methodology / indicators) enable (1) to guide the design of a redevelopment project so as to promote ecological rehabilitation of part of the urban ecosystem² and therefore the provision of ecosystem services (SE) and (2) bear witness to the reestablishment of a functional and autonomous ecosystem.

A first study, funded by the RECORD association (Baptist et al., 2018), provided a state of the art as well as a critical assessment of methods for measuring biodiversity, functions and ES in the context of degraded sites rehabilitated as meadows. 46 function-indicators qualifying the below- and above-ground compartments and 21 ES indicators were identified and implemented in a prototype tool in Excel format, specifically designed to be applied to meadow-type environments. The aim of this new study is to adapt the tool and its dashboard to the redevelopment of degraded sites (including polluted sites) in an urban context in order to promote the creation of functional ecosystems that provide services for users.

The use of "nature-based" (NBS) solutions is a methodological approach that enables to strengthen human / nature links, and which appears more and more as a credible and strategic alternative to conventional planning solutions called "gray solutions". This approach, and the associated operational approach, makes it possible to orientate the redevelopment project towards a higher proportion of rehabilitated natural spaces contributing to the well-being of the inhabitants or to the mitigation of climate change (increase in carbon sequestration in soils, improvement of local climatic conditions, etc.). It also proposes to rely on natural ecosystems and their ecological functions to accelerate the recovery of a self-sustaining ecosystem. Unlike gray solutions which inevitably rely on the destruction of natural habitats (involving artificialisation of territories or erosion of biodiversity), NBS aim to be

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

Ainsi, il s'agit ici de proposer une démarche conceptuelle et méthodologique permettant de :

- orienter le projet de réaménagement de sites dégradés vers une réduction de l'artificialisation des écosystèmes urbains en favorisant la mise en œuvre de SfN ;
- suivre par des indicateurs la restauration du fonctionnement de ces écosystèmes urbains et des SE associés.

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

Pour ce faire, les objectifs de l'étude sont :

- Proposition d'un cadre conceptuel et méthodologique basé sur les SfN et la fourniture de SE pour orienter le projet de réaménagement ;
- Construction sous Excel d'un outil d'aide à la sélection d'indicateurs de fonctions et SE pertinents pour suivre l'efficacité du projet de réaménagement.

La démarche conceptuelle et méthodologique

Concepts

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

Généralement, en contexte de réaménagement de sites dégradés, un porteur de projet se questionne sur les **enjeux** qu'il souhaite prendre en compte dans la conception de son projet. Les enjeux spécifiques à la réhabilitation d'habitats dans des écosystèmes urbains peuvent être économiques, sociaux ou environnementaux, et s'expriment à plusieurs échelles : celle de la **planification** (ex. écosystème urbain tel que la commune) ou une échelle plus **locale** (ex. écosystème urbain élémentaire, du projet, de l'habitat).

Une fois ces enjeux identifiés, le porteur de projet conçoit le type de solution à mettre en œuvre pour y répondre.

efficient, sustainable, respectful of the environment and to have a positive impact on biodiversity as well as humankind.

Thus, in the present study we propose a conceptual and methodological approach enabling to:

- *Reduce artificialisation of urban ecosystems by promoting the implementation of NBS in degraded sites rehabilitation schemes;*
- *Use indicators to monitor restoration of functions and associated ES in urban ecosystems.*

The approach developed here mainly applies to the ecological rehabilitation stage, which generally takes place after attending pollution issues if the latter was necessary on the site. The aim is to guide the project leader during the redevelopment of a site that would present only residual pollution ("acceptable" according to the redevelopment plans).

To do this, the objectives of the study were:

- *To propose a conceptual and methodological framework based on the NBS and ES provision to guide redevelopment projects;*
- *Build a tool in Excel to help with the selection of relevant function and SE indicators to monitor the effectiveness of the redevelopment project.*

The conceptual and methodological approach

Concepts

Since the 2018 Biodiversity Plan, a public policy framework has been established to set an objective of Zero Net Artificialisation (ZAN) in France. Planners are therefore invited to reconsider their choices for innovative development methods based on the rehabilitation or conservation of natural areas.

Generally, in the context of redevelopment of degraded sites, a project leader identifies the issues they wish to take into account in the design of their project. The issues specific to the rehabilitation of habitats in urban ecosystems can be economic, social or environmental, and are expressed at several scales: that of planning (e.g. urban ecosystem such as the municipality) or a more local scale (e.g. elementary urban ecosystem, of the project, of the habitat).

Once these issues have been identified, the project leader designs the type of solution to be implemented to meet them.

¹ Source : SOeS-Gis Sol.

² Selon le CGDD (2018b), 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. According to the CGDD (2018b), the urban ecosystem is a meta-ecosystem made up of a juxtaposition of elementary ecosystems on an urban territory defined administratively. It is made up of areas that can significantly differ in their shapes, sizes, and degrees of naturalness or artificiality. The elementary ecosystems that make up this urban meta-ecosystem include, in particular, green areas, green roofs, urban forests, wasteland, waterbodies, recreation areas, waterproofed surfaces, etc.

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 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 SfN. Une SfN est 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 situ³.

Démarche

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

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

- un panel de solutions d'aménagement (SfN) pour appuyer la réhabilitation écologique à mettre en œuvre sur les 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 simplifiée les données d'entrée et de sortie de l'outil.

Two main types of redevelopment solutions can be chosen by the project leader:

- A **conventional redevelopment scenario** by implementing conventional redevelopment methods or "Gray solutions". This may include the construction of a dike (with riprap) limiting the risk of flooding, the creation of an artificial "overstock" basin storing excess water or the widespread installation of air conditioners in new buildings limiting health risks associated with high temperatures.
- A **redevelopment scenario based on nature based solutions** on the presence and functioning of natural environments. For example, it can offer a vegetated basin making it possible to contain submersion water in the event of a flood, anticipate the preservation of (semi) natural environments as close as possible to the watercourse and which farmers could make use of (outside the flood perimeter) or promote trees planting and suitable vegetation over the entire project, limiting the rise in temperatures during the summer.

The proposals resulting from this second scenario call on NBS. A NBS is an action of rehabilitation (ecological or SSP), management and / or preservation aimed at maintaining, restoring or creating natural ecosystems to directly respond to the challenges of society in an efficient and adaptive manner while ensuring human well-being. (ES provision), benefits for biodiversity and the functioning of other ecosystems in situ³.

Procedure

As part of this study, the proposed approach and the associated tool are based on the identification, by the project leader, of the main issues at the scale of the development project or of the elementary urban ecosystem.

According to these challenges, the tool gives:

- a panel of development solutions (NBS) to support ecological rehabilitation to be implemented in degraded habitats;
- a list of indicators to monitor the effectiveness of the measures, relating to the ES provided by the site or to the functions expressed there.

Figure 1 shows the input and output data of the tool in a simplified manner.

³ Définition adaptée de 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.

Definition adapted from IUCN resolution WCC-2016-Res-069 which indicates that NBS are actions aimed at protecting, sustainably managing and restoring natural or modified ecosystems, to directly address societal challenges in an effective manner and adaptive while ensuring human well-being and biodiversity benefits

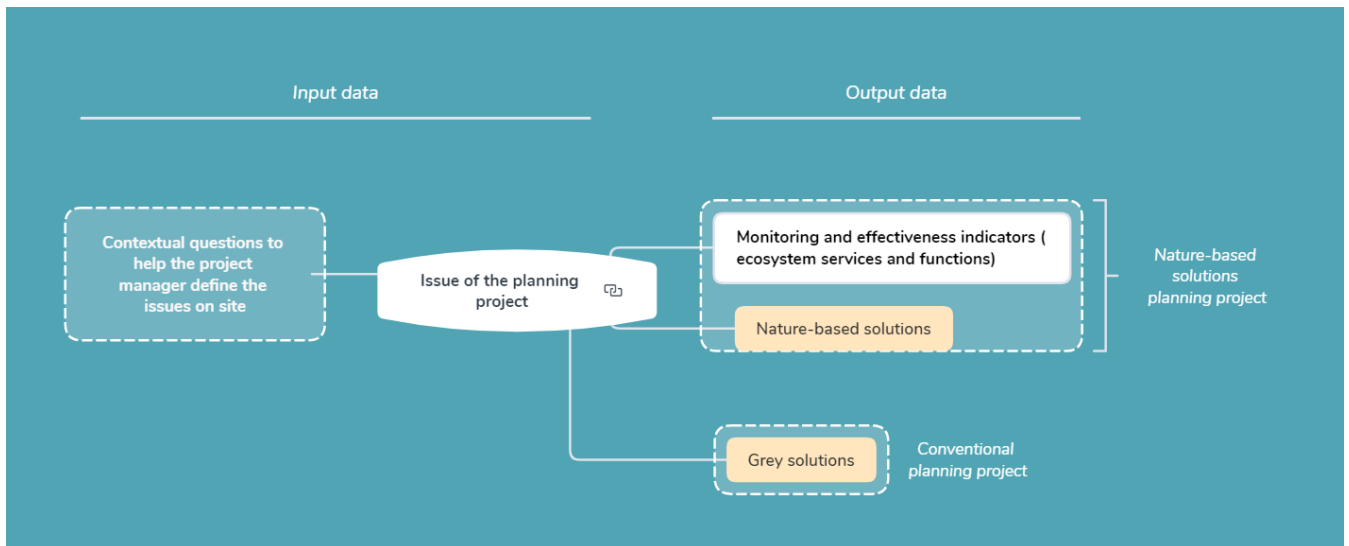


Figure 1. Simplified diagram of the conceptual approach of the indicator selection tool (RECORD, 2021)

La mécanique de l'outil se base sur des matrices d'interrelations permettant d'associer :

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

Sur la base des enjeux identifiés, 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 est présentée et associée aux indicateurs de SE permettant de suivre leur efficacité. Enfin, selon les fonctions associées, une liste d'indicateurs de fonctions est proposée.

Echelle spatiale et temporelle

Selon le type d'enjeu ou de SfN, l'échelle d'évaluation de l'effectivité des mesures diffère.

Certaines SfN sont menées à l'échelle du projet de réaménagement (ex. stratégies d'aménagement spécifiques de densification). Le suivi sera à réaliser à **l'échelle de l'écosystème urbain élémentaire** selon la définition de l'« Evaluation Française des Ecosystèmes et Services Ecosystémiques » (EFESE). D'autres 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 réhabilitation⁴.

The mechanics of the tool are based on interrelationship matrices allowing to associate:

- *Issues / ES;*
- *ES / NBS;*
- *NBS / Final natural habitats;*
- *ES / functions;*
- *ES, functions and function indicators;*

Based on the issues identified, a modifiable ES list is automatically proposed. The project leader can complete and modify this list. According to the targeted ES, a list of NBS is presented and associated with ES indicators to monitor their effectiveness. Finally, according to the associated functions, a list of function indicators is proposed.

Temporal and spatial scale

Depending on the type of issue or NBS, the scale for evaluating the effectiveness of the measures differs.

Some NBS are carried out at the scale of the redevelopment project (eg specific densification development strategies). The monitoring is carried out at the level of the elementary urban ecosystem according to the definition of the "French Assessment of Ecosystems and Ecosystem Services" (EFESE). Other NBS can only be assessed at the habitat scale, as can be the monitoring of functions and ES restoration (e.g. phytoremediation action). The proposed indicators should therefore be completed at the habitat level.

In terms of time scale, in order to verify the success of the ecological rehabilitation, the proposed indicators must be collected at least before the start of the project and once the redevelopment project is implemented and effective. It is also possible to measure them throughout the implementation of the project to ensure that you are on the desired rehabilitation path⁴.

⁴ *Pour s'assurer d'être sur une trajectoire souhaitée, il faut pouvoir fixer, pour chaque indicateur sélectionné, l'objectif cible à atteindre par rapport à une référence nationale (si existante) ou locale (site de référence locale) (Marchand et al. 2021). To ensure that we are on a desired trajectory, it is necessary to be able to set, for each indicator selected, the target objective to be reached in relation to a national (if existing) or local (local reference site) reference (Marchand et al. . 2021).*

Les typologies en appui à la démarche et indicateurs associés

Typologie des enjeux urbains

La démarche méthodologique de l'étude propose une entrée par les enjeux urbains visés par le projet. Il s'agit 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 « Nature4cities⁵ ».

On distingue les enjeux urbains selon la problématique qu'ils adressent (climatique, environnementale, sociale, relative aux ressources) et l'échelle de répercussion (locale ou de la planification) (Tableau 1).

The typologies supporting the approach and associated indicators

Typology of urban issues

The methodological approach of the study offers an entry point through the urban issues targeted by the project. The aim here is to define and list the issues conventionally encountered in the context of an urban redevelopment project. This work was carried out on the basis of the results obtained within the framework of the "Nature4cities⁵" project.

Urban issues are distinguished according to the problem they address (climatic, environmental, social, relating to resources) and the scale of impact (local or planning) (Table 1).

Tableau 1. Typologie des enjeux urbains retenus
Table 1: Typology of urban issues selected

Category	Major issue	Issue
CLIMATE	Climate issues	Climate change mitigation
		Climate change adaptation
	Water quality management	Urban water quality management
		Flood management
ENVIRONMENT	Air quality management	Air quality management
	Soil quality management	Soil quality management
	Urban space organization and urban biodiversity	Preservation and restoration of biodiversity in urban ecosystems
RESOURCES	Resource efficiency	Resource production (water, energy, food)
SOCIAL	Public health and well-being	Improving quality of life
		Guarantee population health

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

The methodological approach adopted and proposed here uses the ES typology from the EFESE "urban environments" working group but also includes natural heritage (ordinary and endemic biodiversity) in order to integrate ES based on non-use (identification, legacy, altruism) (Table 2).

⁵ <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	Agriculture products
	Gathered products
	Beekeeping
Regulating services	Global climate regulation
	Local climate regulation
	Air quality regulation
	Regulation of noise pollution
	Regulation of floods
	Regulation of water resources
	Regulation of soil quality
Cultural service	Recreational and leisure interest
	Landscape amenities
	Educational, scientific and pedagogical interest
Natural heritage	Protected elements of ecosystems and ordinary biodiversity

Indicateurs de SE :

Les indicateurs ont été choisis sur la base des indicateurs listés dans l'étude RECORD1 (Baptist et al. 2018) et complétés par les éléments disponibles dans la littérature.

Pour chaque indicateur est indiqué :

- Le SE ciblé ;
- La catégorie du SE ;
- Les bénéficiaires du SE (personnes directement impactées par les bénéfices des SE mesurés) ;
- L'interprétation des indicateurs et les méthodes de mesure ;
- Les références.

Typologie des fonctions écologiques

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.

SE indicators:

The indicators were chosen on the basis of the indicators listed in the RECORD1 study (Baptist et al. 2018) and supplemented by the elements available in the literature.

For each indicator is indicated:

- *The targeted ES;*
- *The ES category;*
- *ES beneficiaries (people directly impacted by the benefits of measured ES);*
- *Interpretation of indicators and measurement methods;*
- *References.*

Typology of ecological functions

Ecological functions refer to the natural processes inherent to 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 functions (Table 3):

- *hydrogeomorphological (e.g. reducing water runoff, sediments 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 the functions that can be expressed by natural environments present in urban ecosystems. The list of selected functions is presented in the following table.

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

Major types of functions	Function
Hydrogeomorphological functions	Water retention, circulation and infiltration
	Sediment retention
	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 the chemical composition of the atmosphere and contribution to climatic processes (temperature, hygrometry)
Biological functions	Species habitats
	Connectivity

Indicateurs de fonctions :

Cette étude aboutit à une liste d'indicateurs pouvant être intégrée dans l'outil pour permettre à un porteur de projet, selon son 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 selon les enjeux initialement identifiés.

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 selon la littérature disponible.

Pour chaque indicateur est indiqué :

- L'intitulé de l'indicateur ;
- La fonction associée ;
- Le SE associé ;
- La question à laquelle il répond ;
- Les méthodes de mesure ;
- Le complément ;
- L'existence 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 :
 - 1 : opérationnel, actuellement proposé par les bureaux d'études, laboratoires d'analyse privés ;
 - 2 : quasi opérationnel, en cours de transfert vers l'opérationnel ;
 - 3 : encore en développement, non disponible pour les opérateurs de la restauration dans un cadre classique ;
- Une estimation du coût : faible (< 100 €) : €, modéré (< 1000 €) : €, élevé (> 1000 €) : €€€ ;
- Les références.

Typologie des solutions fondées sur la nature

Depuis la première proposition de typologie par Balian, Eggermont et Le Roux (2014) dans le cadre d'un groupe de travail d'experts reconnu sur les SfN, l'IUCN a essayé cette classification en trois types lors de ses différentes participations à des travaux sur les SfN. Notre étude se propose de reprendre et adapter la typologie proposée par les projets Nature4cities et ThinkNature définissant trois grands types de SfN⁶ et reconnue

⁶ Cette typologie est reconnue par les experts de l'IUCN et reprise dans plusieurs travaux de projets européens sur les SfN (voir rapport complet).

This typology is recognized by IUCN experts and used in several European projects on SfN (see full report).

Function indicators:

This study provides a list of indicators that can be integrated into the tool to allow a project leader, according to their redevelopment project, to dispose of a selection of relevant indicators for monitoring ecological rehabilitation and to certify the success of its development according to the issues initially identified.

The function indicators were chosen on the basis of the indicators proposed as part of the RECORD1 study (Baptist et al. 2018) when they were measurable and relevant for an application in an urban ecosystem. Additional indicators were selected according to the available literature.

For each indicator are provided:

- The title of the indicator;
- The associated function;
- The associated ES;
- The question it answers;
- Measurement methods;
- The complement;
- The existence of 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:
 - 1: operational, currently sold by private analysis laboratories;
 - 2: quasi-operational, in the process of being transferred to operational;
 - 3: still in development, not available in a traditional setting;
- An estimate of the cost: low (<100 €): €, moderate (<1000 €): €, high (> 1000 €): €€€;
- References.

Typology of Nature Based Solutions

Since the first typology proposal by Balian, Eggermont and Le Roux (2014) as part of a recognized expert working group on NBS, IUCN has spread this classification into three types during its various participations in work on NBS. Our study proposes to take up and adapt the typology proposed by the Nature4cities and ThinkNature projects defining three major types of NBS⁶ and recognized by the standard established by the IUCN ([Global Standard](#), July 2020).

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

Les trois classes ainsi reprises dans notre approche sont :

- 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.

Présentation de l'outil

L'outil de sélection des indicateurs propose 7 onglets qui sont ouverts successivement par l'utilisateur au fur et à mesure qu'il renseigne ce qui lui est demandé.

Quelques illustrations de cet outil sont fournies ci-dessous (Figure 2). Une notice d'utilisation est disponible dans le rapport de l'étude.

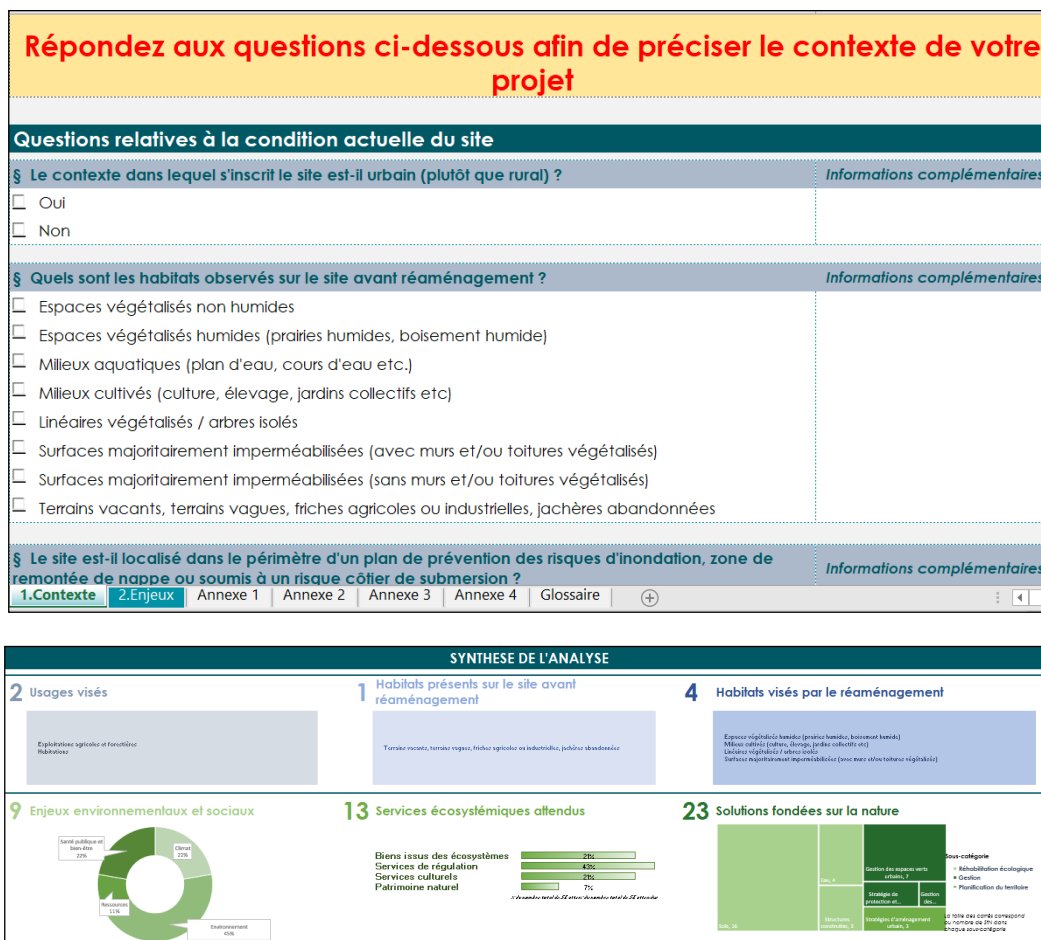
The three classes thus included in our approach are:

- Type 1: Actions linked to urban redevelopment and / or ecosystem conservation strategies.
- Type 2: Actions for the sustainable management of ecosystems.
- Type 3: Actions to create new ecosystems.

Presentation of the tool

The indicator selection tool offers 7 tabs which are opened successively by the user as they fill in what is requested. Some illustrations of this tool are provided below (Figure 2). Instructions for use are available in the study report.

Figure 2 : Illustrations de l'outil de sélection des indicateurs construit sous Excel.
Figure 2: Illustrations of the indicator selection tool built in Excel



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	Service écosystémique	Indicateur de service																																																								
Produits de l'agriculture	Régulation et fourniture des intrants pour les organismes du sol et les végétaux	Enrichir les sols en matière organique	Taux de matière organique totale Taux de carbone fixe Indicateur de l'humus Taux de Nitrates (N) et de Phosphore (P) dans le sol Taux de Phosphore (P) dans le sol Taux de Potassium (K) dans le sol Taux de Magnésium (Mg) dans le sol Taux de Calcium (Ca) dans le sol Taux de Sulfure (S) dans le sol Taux de Bore (B) dans le sol Taux de Zinc (Zn) dans le sol Taux de Cuivre (Cu) dans le sol Taux de Manganèse (Mn) dans le sol Taux de Sodium (Na) dans le sol Taux de Chlorure (Cl) dans le sol Taux de Fluorure (F) dans le sol Taux de Silicium (Si) dans le sol Taux de Sélénium (Se) dans le sol Taux de Vanadium (V) dans le sol Taux de Cobalt (Co) dans le sol Taux de Molybdène (Mo) dans le sol Taux de Nickel (Ni) dans le sol Taux de Cadmium (Cd) dans le sol Taux de Plomb (Pb) dans le sol Taux de Mercure (Hg) dans le sol Taux de Baryum (Ba) dans le sol Taux de Strontium (Sr) dans le sol Taux de Rubidium (Rb) dans le sol Taux de Césium (Cs) dans le sol Taux de Francium (Fr) dans le sol Taux de Radium (Ra) dans le sol Taux de Thorium (Th) dans le sol Taux de Protactinium (Pa) dans le sol Taux de Uranium (U) dans le sol Taux de Plutonium (Pu) dans le sol Taux de Néptunium (Np) dans le sol Taux de Americium (Am) dans le sol Taux de Curium (Cm) dans le sol Taux de Berkelium (Bk) dans le sol Taux de Californium (Cf) dans le sol Taux de Einsteinium (Es) dans le sol Taux de Fermium (Fm) dans le sol Taux de Mendelevium (Md) dans le sol Taux de Nobelium (No) dans le sol Taux de Lawrencium (Lr) dans le sol Taux de Rutherfordium (Rf) dans le sol Taux de Dubnium (Db) dans le sol Taux de Seaborgium (Sg) dans le sol Taux de Bohrium (Bh) dans le sol Taux de Hassium (Hs) dans le sol Taux de Meitnerium (Mt) dans le sol Taux de Darmstadtium (Ds) dans le sol Taux de Tennessine (Ts) dans le sol Taux de Oganesson (Og) dans le sol	Agriculture	Yield (kg/ha)	Produits de l'agriculture	Yield (kg/ha)	Taux de matière organique totale	Taux de carbone fixe	Indicateur de l'humus	Taux de Nitrates (N) et de Phosphore (P) dans le sol	Taux de Phosphore (P) dans le sol	Taux de Potassium (K) dans le sol	Taux de Magnésium (Mg) dans le sol	Taux de Calcium (Ca) dans le sol	Taux de Sulfure (S) dans le sol	Taux de Bore (B) dans le sol	Taux de Zinc (Zn) dans le sol	Taux de Cuivre (Cu) dans le sol	Taux de Manganèse (Mn) dans le sol	Taux de Sodium (Na) dans le sol	Taux de Chlorure (Cl) dans le sol	Taux de Fluorure (F) dans le sol	Taux de Silicium (Si) dans le sol	Taux de Sélénium (Se) dans le sol	Taux de Vanadium (V) dans le sol	Taux de Cobalt (Co) dans le sol	Taux de Molybdène (Mo) dans le sol	Taux de Nickel (Ni) dans le sol	Taux de Cadmium (Cd) dans le sol	Taux de Plomb (Pb) dans le sol	Taux de Mercure (Hg) dans le sol	Taux de Baryum (Ba) dans le sol	Taux de Strontium (Sr) dans le sol	Taux de Rubidium (Rb) dans le sol	Taux de Césium (Cs) dans le sol	Taux de Francium (Fr) dans le sol	Taux de Radium (Ra) dans le sol	Taux de Thorium (Th) dans le sol	Taux de Protactinium (Pa) dans le sol	Taux de Uranium (U) dans le sol	Taux de Plutonium (Pu) dans le sol	Taux de Néptunium (Np) dans le sol	Taux de Americium (Am) dans le sol	Taux de Curium (Cm) dans le sol	Taux de Berkelium (Bk) dans le sol	Taux de Californium (Cf) dans le sol	Taux de Einsteinium (Es) dans le sol	Taux de Fermium (Fm) dans le sol	Taux de Mendelevium (Md) dans le sol	Taux de Nobelium (No) dans le sol	Taux de Lawrencium (Lr) dans le sol	Taux de Rutherfordium (Rf) dans le sol	Taux de Dubnium (Db) dans le sol	Taux de Seaborgium (Sg) dans le sol	Taux de Bohrium (Bh) dans le sol	Taux de Hassium (Hs) dans le sol	Taux de Meitnerium (Mt) dans le sol	Taux de Darmstadtium (Ds) dans le sol	Taux de Tennessine (Ts) dans le sol	Taux de Oganesson (Og) dans le sol
	Régulation du climat global	Stabilité des températures	Indice de température		Régulation du climat local		Stabilité des températures																																																						
Régulation du climat local	Stabilité des températures	Indice de température	Régulation du climat global	Stabilité des températures	Indice de température																																																								
Régulation de la qualité de l'air	Stabilité des températures	Indice de température	Régulation de la qualité de l'air	Stabilité des températures	Indice de température																																																								
Régulation de la qualité de l'eau	Stabilité des températures	Indice de température	Régulation de la qualité de l'eau	Stabilité des températures	Indice de température																																																								
Régulation des nuisances sonores	Stabilité des températures	Indice de température	Régulation des nuisances sonores	Stabilité des températures	Indice de température																																																								
Régulation du climat global	Stabilité des températures	Indice de température	Régulation du climat global	Stabilité des températures	Indice de température																																																								
Régulation du climat local	Stabilité des températures	Indice de température	Régulation du climat local	Stabilité des températures	Indice de température																																																								

Conclusion et perspectives

L'outil créé permet à un porteur de projet d'identifier les SfN qu'il pourrait mettre en place selon les enjeux de son site ainsi que les indicateurs de suivi des SE et des fonctions pour vérifier le succès de la réhabilitation écologique.

- Une notice d'utilisation est proposée pour accompagner sa prise en main et un atelier d'acculturation a été organisé pour :
- vérifier qu'il répond aux besoins des porteurs de projet ;
 - assurer sa diffusion effective et l'essaimage des SfN 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 SE 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.

L'ensemble des résultats vient 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 diagnostics 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.

Cet outil ne permet pas de comparer différents scénarii d'aménagement et leurs incidences sur les fonctions et SE restaurés. Le prototype pourrait évoluer et permettre cette comparaison. Il serait intéressant de proposer une évaluation et une comparaison des bénéfices sociaux et économiques liés à la fourniture de services pour chaque scénario par une analyse des coûts évités et des valeurs d'usage et de non-usage des SE rendus par les scénarii.

Conclusion and perspectives

The tool created allows a project leader to identify the NBS that he could set up according to the challenges of his site as well as the monitoring indicators of ES and functions to verify the success of ecological rehabilitation.

- A user manual is available to accompany its handling and an acculturation workshop was organized to:
- check that it meets the needs of project leaders;
 - ensure its effective dissemination and the spin-off of NBS in the spheres specific to development actors.

Beyond the design of this tool, this work made it possible to establish a very complete list of function and ES indicators that can be used in a broader framework than that of this study. To our knowledge, this is the first time in France that such a database has been established.

All the results enrich the range of tools made available to project leaders to design projects with lower environmental impact and helping to reduce the artificialisation of territories.

Different perspectives can be mentioned for the future of the tool which now needs to be tried out, tested and improved in support of diagnostics or monitoring of real redevelopment projects in order to verify that it is able to take into account all the local specificities of the site concerned.

This tool does not make it possible to compare different layout scenarios and their impact on the functions and restored ES. The prototype could evolve and allow this comparison. It would be interesting to propose an evaluation and a comparison of the social and economic benefits linked to the provision of services for each scenario by an analysis of the avoided costs and the use and non-use values of the ES provided by the scenarios.

Bibliography

- 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. et al. 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.*
- 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*
- 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.*
- MTES. 2017a.** *Biodiversité et présentation des enjeux. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biodiversite-presentation-et-enjeux>*
- MEDDE. 2012.** *Stratégie nationale pour la biodiversité 2011-2020. 60 p.*
- 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.*