

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**MESURE DE LA BIODIVERSITÉ ET ÉVALUATION DES SERVICES
ÉCOSYSTÉMIQUES DES MILIEUX RESTAURÉS**
MÉTHODES ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

***MEASURING BIODIVERSITY AND EVALUATING ECOSYSTEM
SERVICES IN RESTORED ENVIRONMENTS***
METHODS AND TRIAL APPLICATIONS

juin 2018

F. BAPTIST, T. DISCA – BIOTOPE
J. HELLAL, E. LIMASSET – BRGM
M. HORIOT, T. BINET – VERTIGO LAB



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) 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.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Mesure de la biodiversité et évaluation des services écosystémiques des milieux restaurés. Méthodes et retours d'expériences, 2018, 142 p, n°17-1021/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2018

RESUME

Les écosystèmes et plus généralement la biodiversité fournissent des biens et des services essentiels à l'Homme tels que l'approvisionnement en nourriture ou en matières premières, une eau et un air de qualité, ou encore une protection contre les aléas naturels. Certaines activités humaines (industrie, urbanisation) peuvent conduire à la détérioration de cette biodiversité à travers une dégradation chimique et/ou physique des milieux. La réglementation liée aux sites et sols pollués souligne aujourd'hui une volonté renforcée de préserver et restaurer la biodiversité. La loi pour la reconquête de la biodiversité adoptée en août 2016 intègre notamment plusieurs dispositions relatives aux sites et sols pollués. Cependant, bien que nous assistions ces dernières années à la restauration de nombre de ces sites, les données sur ces expériences et leur réussite restent limitées. Par ailleurs il n'existe pas à ce jour de méthodologie spécifiquement adaptée à ce type de sites. En revanche, de nombreuses méthodes d'analyse et de mesure de la biodiversité sont disponibles, aussi bien pour le compartiment aérien, que pour l'eau et le sol ; et pourraient être mobilisées pour évaluer la réussite des mesures de restauration. Après une synthèse des textes règlementaires français et européens relatifs à la restauration de la biodiversité et à la réhabilitation de sites et sols pollués, ce rapport offre une revue des principaux indicateurs connus pour mesurer les fonctions clés des écosystèmes. Il présente par ailleurs une liste d'indicateurs de services écosystémiques permettant de faciliter leur prise en compte et leur évaluation dans le cadre des mesures de restauration. Ne pouvant être exhaustive, l'étude s'est focalisée sur deux types de milieux restaurés : les zones humides et les milieux prairiaux. Elle propose également une grille de sélection d'indicateurs permettant d'évaluer et de suivre l'impact des mesures de restauration mises en œuvre sur les sites et sols pollués. Cet outil s'adapte à une large gamme de situations définies selon les types de dégradation et de contamination observés sur le site mais également en fonction des usages visés par la restauration. Enfin, la méthodologie développée dans ce rapport a été testée à travers trois cas de restauration de sites : un crassier métallurgique phytostabilisé, une installation de stockage de déchets et une ancienne carrière restaurée en milieu humide. Cette étude ouvre des perspectives intéressantes en matière d'évaluation de la restauration de sites dégradés.

MOTS CLES

Restauration, réhabilitation, sites et sols pollués, biodiversité, indicateurs, services écosystémiques, réglementation

SUMMARY

Ecosystems provide goods and services that are essential for humans, such as food or raw materials, clean water and air, or protection against natural hazards. Human activities such as industry and urbanisation can lead to the deterioration of this biodiversity due to chemical and/or physical degradation of the environment. Recently, French legislation related to contaminated land emphasises a strengthened commitment to preserve and restore biodiversity. Moreover, in August 2016 a law in favour of the restoration of biodiversity was voted in France with specific references to contaminated land. However, although several recent attempts have been made to restore many of these sites, data on these experiences and their successes remain limited. In addition, there is currently no methodology specifically adapted to evaluate this type of site restoration. On the other hand, many methods to analyse and measure biodiversity are available, both for above-ground biodiversity (plants and fauna) and for water and soil. Therefore, these methods could be used to evaluate the success of restoration measures.

After a synthesis of French and European legislative texts relating to the restoration of biodiversity and the rehabilitation of contaminated land, this report offers a review of the main known indicators for measuring key functions of ecosystems. It also presents a list of ecosystem services indicators to facilitate their consideration and evaluation as part of restoration measures. The study focused on two types of restored environments: wetlands and grasslands. It also proposes an Indicator Selection Tool (IST) to evaluate and monitor the impact of restoration measures implemented on contaminated land. This tool adapts to a wide range of situations defined according to the types of degradation and contamination observed on the site but also according to the uses targeted by the restoration. Finally, the methodology developed in this report has been tested on three site restorations: a phytostabilised metallurgical slagheap, a waste storage facility and an old quarry restored as a wetland. This study opens interesting perspectives evaluating biodiversity restoration in degraded sites.

KEY WORDS

Restauration, réhabilitation, contaminated land, biodiversity, indicators, ecosystem services, land legislation

Contexte et objectifs

Répondant à des enjeux environnementaux mais aussi socio-économiques, les dépenses liées à la restauration de sites dégradés ou pollués¹ sont en très forte augmentation depuis 15 ans (Bouagal 2012). Outre des enjeux évidents de santé publique, la mise en œuvre d'actions de restauration permet de rétablir la fonctionnalité des milieux et des services rendus par ces écosystèmes. Ces actions favorisent également le renouvellement de la ville sur la ville, ce qui a pour conséquence de limiter l'étalement urbain par la réaffectation des terrains après dépollution. La restauration écologique génère de ce fait un gain pour la biosphère, mais également pour l'Homme.

D'un point de vue strictement sémantique, la restauration écologique relève de processus permettant « d'assister la régénération des écosystèmes qui ont été dégradés, endommagés ou détruits » (Aronson 2010, Figure 1). Le but de cette restauration est de restituer tel qu'il était à l'origine un écosystème qui a été endommagé voire détruit par les activités humaines. Les retours d'expérience de nombreux pays montrent néanmoins que restaurer – *stricto sensu* – un écosystème historique reste utopique, les écosystèmes restaurés ne pouvant être des répliques exactes du passé. Pour ces raisons, et bien que le terme « restauration » soit utilisé de manière courante, c'est plutôt un processus de réhabilitation accompagné d'un processus de remédiation² (dans le cas de pollution chimique) qui sont généralement mis en œuvre. Enfin, lorsqu'il s'agit de restaurer un écosystème pour un tout autre usage, on parle de réaffectation. Le nouvel état obtenu n'est alors pas forcément en relation avec la structure et le fonctionnement d'un état antérieur ou spatialement proche (système de référence temporel ou spatial).

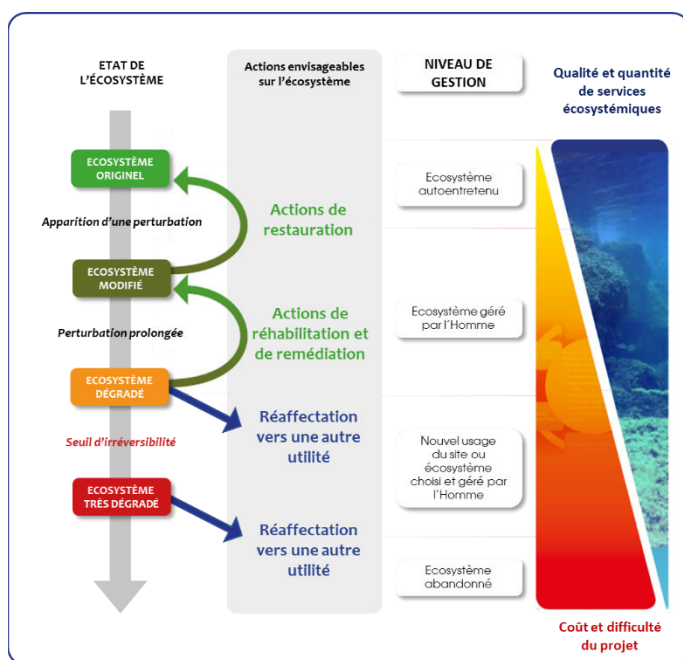


Figure 1. Les différentes actions possibles de l'Homme, en fonction de l'état de dégradation de l'écosystème (adapté de Lenfant et al. 2015)

Context and objectives

Responding to environmental as well as socio-economic challenges, the expenses related to the restoration of degraded or polluted sites have sharply increased over the past 15 years (Bouagal 2012). In addition to obvious public health issues, the implementation of restoration actions restores the functionality of the environments and services provided by these ecosystems. By reallocating lands after decontamination, these actions also favour the renewal of the city on the city, which limits urban sprawl. Thus, ecological restoration generates a gain for the biosphere, but also for humans. From a purely semantic point of view, ecological restoration is a process that "helps regenerate ecosystems that have been degraded, damaged or destroyed" (Aronson 2010, Figure 1). The goal of this restoration is to restore, as it was originally, an ecosystem that has been damaged or destroyed by human activities. However, feedback from many countries shows that restoring an original ecosystem, strictly speaking, remains utopic. Indeed, restored ecosystems cannot be exact replicas of the past. For these reasons, and although the term "restoration" is routinely used, it is rather a process of rehabilitation accompanied by a process of remediation (in the case of chemical pollution) that are generally implemented. Finally, when it comes to restoring an ecosystem for any other use, we use the term of reassignment. The new state obtained is not necessarily related to the structure or function of an earlier or spatially close state (temporal or spatial reference system).

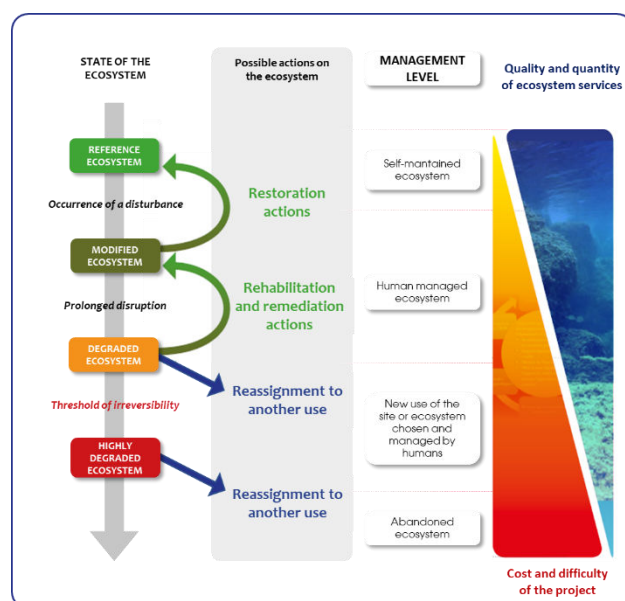


Figure 1. The different possible actions of humans, depending on the state of degradation of the ecosystem (adapted from Lenfant et al., 2015)

¹ 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. Il existe également autour de certains sites des contaminations dues à des retombées de rejets atmosphériques accumulés au cours des années voire des décennies. Source : Base de données BASOL sur les sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, <http://basol.developpement-durable.gouv.fr/accueil.php>

² Le terme remédiation se réfère à un ensemble de techniques utilisées pour dépolluer un site naturel (sol, sédiments, eaux de surface ou souterraines).

Les démarches de restauration se déroulent selon des modalités adaptées à des objectifs opérationnels et scientifiques variés, impliquant un investissement scientifique, technique et financier (Bazin et Barnaud 2002). Pour s'assurer du succès de ces actions, il est nécessaire de disposer d'indicateurs fiables (abiotiques, biotiques, sociologiques, économiques). **Pour autant, à l'heure actuelle, les indicateurs sont multiples et parfois complexes à mettre en œuvre. En outre, ils portent en général sur quelques groupes floristiques ou faunistiques (comme par exemple l'avifaune); la fonctionnalité générale de l'écosystème étant généralement peu abordée³. Enfin, les dimensions socio-économiques ne sont en général pas prises en compte, ce qui aboutit, dans certaines situations, à des difficultés d'acceptation du projet localement. L'enjeu est donc désormais d'identifier des méthodes et indicateurs qui permettent de guider efficacement les projets de restauration et favorisant par ailleurs une meilleure prise en compte de la biodiversité et le rétablissement du lien entre l'écosystème et l'Homme.**

Après un rappel réglementaire, cette étude a tout d'abord visé à clarifier le cadre conceptuel offert par l'analyse des fonctions et services écosystémiques. Il a par ailleurs été précisé dans quelles mesures ce dernier est effectivement pertinent pour évaluer le succès des opérations de restauration dans le contexte des sites et sols pollués.

Dans un second temps, une liste de 67 indicateurs a été proposée puis testée sur trois cas d'étude : un crassier métallurgique phytostabilisé, une installation de stockage de déchets et une ancienne carrière restaurée en milieu humide.

Enfin, différentes perspectives à ce travail ont été proposées.
Nota : Cette étude s'est intéressée à tous types de dégradation physique ou chimique d'un écosystème sans tenir compte de l'historique du site en tant que tel (autorisé ou non). Les résultats présentés dans ce rapport portent, par ailleurs, spécifiquement sur des actions de restauration de milieux prairiaux humides et non humides. Pour une question de lisibilité, le terme générique « restauration » a été utilisé dans l'ensemble du rapport. Il couvre l'ensemble des notions présentées ci-dessus (restauration, réhabilitation, réaffectation).

Contexte réglementaire

La politique mondiale des sols est aujourd'hui partielle et insuffisamment affirmée du fait d'un manque de dispositifs juridiques contraignants (Tableau 1). Ceci est vrai malgré la Convention sur le Développement Durable de Rio (2012) et la charte mondiale des sols (2015) qui affirment un certain nombre de principes fondamentaux et recommandent la mise en place d'actions fortes de protection des sols. Il est toutefois important de noter que certains pays (hors Union Européenne) dont les Etats Unis, le Japon, le Canada, l'Australie et le Brésil ont néanmoins établi des politiques de protection des sols qui semblent leur assurer un niveau de protection comparable à celui de l'approche préconisée par la proposition de directive européenne sur les sols de 2006.

Ce constat à l'échelle mondiale se fait également à l'échelle européenne. Pour l'instant, rares sont les Etats membres de l'UE disposant de législations spécifiques sur les sols, (cas des

Restoration approaches are conducted according to modalities adapted to various operational and scientific objectives, involving a scientific, technical and financial investment (Bazin and Barnaud 2002). To ensure the success of these actions, it is necessary to have reliable indicators (abiotic, biotic, sociological, economic). However, at present, indicators are multiple and sometimes complex to implement. In addition, they generally relate to some floristic or faunal groups (for example, bird life) and the general functionality of the ecosystem is usually poorly addressed⁴.

Finally, the socio-economic dimensions are generally not taken into account, which leads, in certain situations, to difficulties in accepting the project locally. The present challenge is to identify methods and indicators that can effectively guide restoration projects and promote a better consideration of biodiversity and the restoration of the link between ecosystems and humans.

After an introduction on the regulatory context, this study first aimed to clarify the conceptual framework offered by the analysis of ecosystem functions and services. It also specifies to what extent the latter is indeed relevant to evaluate the success of restoration operations in the context of polluted sites and soils.

In a second step, a list of 67 indicators was proposed and then tested on three case studies: a phytostabilised metallurgical slag, a waste storage facility and a former quarry restored in a wetland. Finally, different perspectives for this work have been suggested.

Nota: This study looked at all types of physical or chemical degradations of an ecosystem without taking into account the history of the site as such (authorised or not). The results presented in this report specifically relate to restoration actions of wetlands and dry grasslands. For a question of readability, the generic term "restoration" was used throughout the report. It covers all the concepts presented above (restoration, rehabilitation and reassignment).

Regulatory context

Global soil policy is nowadays partial and insufficiently affirmed because of a lack of binding legal provisions (Table 1). This is true despite the Rio Convention on Sustainable Development (2012) and the World Soil Charter (2015), which affirm several fundamental principles and recommend the implementation of strong soil protection actions. It is important to note, however, that some countries (outside the European Union) including the United States, Japan, Canada, Australia, and Brazil have nonetheless established soil protection policies that appear to provide them with a level of protection comparable to that of the approach advocated by the European Soil Directive proposal of 2006.

This observation on a global scale is also made on a European scale. At present, there are few EU Member States with specific soil legislations (e.g. the Netherlands,

³ A ce titre, l'exemple de l'évolution du raisonnement concernant la restauration du Lac Hornborga (Suède) paraît intéressant. Ses promoteurs sont passés, entre 1965 et 1985, d'un projet visant à reconstituer un « optimal bird-lake » à une intervention plus complexe intégrant d'autres fonctions et valeurs du site (Bazin et Barnaud 2002).

⁴ In this respect, the example of the evolution of the restoration approach of Lake Hornborga (Sweden) seems interesting. Its promoters moved between 1965 and 1985 from a project aimed at reconstituting an "optimal bird-lake" to a more complex intervention integrating other functions and values of the site (Bazin and Barnaud 2002).

Pays-Bas, de l'Allemagne, mais ne couvrant qu'une partie des enjeux liés à la gestion des sols). De plus, aucun pays ne semble avoir développé jusqu'ici des objectifs de protection comprenant la multifonctionnalité des sols. Ainsi, suite à l'échec de la proposition de directive cadre en 2006, les sols ne font toujours pas l'objet au sein de l'Union de règles exhaustives et cohérentes. Les politiques européennes en place, dans les domaines tels que l'agriculture, l'eau, les déchets ou la prévention de la pollution industrielle apportent des dispositions indirectes de protection des sols. Mais ces politiques, ayant des objectifs et des champs d'actions différents, ne sont bien sûr pas suffisantes pour assurer la protection des sols dont l'Europe aurait besoin.

Germany, but covering only a few of the issues related to soil management). Moreover, no country seems to have developed so far protection objectives including the multifunctionality of soils. Thus, following the failure of the Framework Directive proposal in 2006, soils are still not subject to exhaustive and consistent rules within the Union. Existing European policies in areas such as agriculture, water, waste or the prevention of industrial pollution provide indirect soil protection provisions. However, these policies, having different objectives and fields of action, are of course not sufficient to ensure soil protection in Europe.

Tableau 1 : Synthèse sur la politique de protections des sols (hors Etats Unis)

Politique Mondiale	Politique Européenne	Politiques nationales en EU
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Partielle ➤ Insuffisamment affirmée ➤ Peu contraignante ➤ Pas d'objectifs de développement durable sur la multifonctionnalité des sols 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Echec de la directive cadre 2006 ➤ Pas de politique dédiée ➤ Dispositions indirectes par le biais d'autres législations ➤ Actions restant sectorielles ➤ Initiatives non contraignantes 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rares pays ayant une législation sol spécifique ➤ Pour les autres : réglementations sectorisées où le sol n'est pas l'objet principal ➤ Prise en compte des fonctions du sol rare

Tableau 1: Synthesis on soil protection policies (excluding the United States)

Global policy	European policy	EU national policies
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Partial ➤ unsound ➤ Not very demanding ➤ No sustainable development objectives on the multifunctionality of soils 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Failure of the framework directive ➤ No dedicated policy ➤ Indirect provisions through unspecific legislations ➤ Actions are sectorial ➤ Initiatives are not very demanding 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Few countries possess as legislation specific to soils ➤ For others: regulation is either sectorial or not the specific goal ➤ Soil functions are rarely considered

Concernant la politique de restauration de la biodiversité, on retiendra que bien qu'elle soit apparue avec une portée contraignante assez limitée, la convention des Nations Unies sur la Diversité Biologique de 1992, a finalement pu être appliquée assez concrètement au sein de l'UE. Cependant, l'examen à mi-parcours (2016) de la Stratégie Biodiversité de la Commission Européenne, (avec des objectifs à l'horizon 2020 pour la protection et amélioration de l'état de la biodiversité), souligne la nécessité de redoubler d'efforts pour enrayer la perte de biodiversité. Pour exemple, un des objectifs de la stratégie (2) vise notamment à maintenir ou restaurer les écosystèmes et leurs services en encourageant la mise en place « d'infrastructures vertes » dans les politiques d'urbanisme et d'aménagement et de restaurer au moins 15% des écosystèmes dégradés en 2020. Parmi les actions ciblées pour atteindre cet objectif, les Etats membres doivent cartographier et évaluer l'état et la valeur économique des écosystèmes et de leurs services. La réalisation de cette cartographie est toujours en cours pour certains pays. La Commission Européenne a par ailleurs bien conscience que l'utilisation des sols, demeurant toujours non durable, est en train de compromettre les objectifs qu'elle s'est fixés à l'échelle mondiale ou domestique en matière de biodiversité et de changement climatique.

Regarding the biodiversity restoration policy, we can point out that although it appeared rather undemanding; the 1992 UN Convention on Biological Diversity was in fact applied quite concretely within the EU. However, the mid-term review (2016) of the European Commission's Biodiversity Strategy (with targets for 2020 to protect and improve the state of biodiversity), underlines the need to increase efforts to halt biodiversity loss. For example, one of the aims of the strategy is to maintain or restore ecosystems and their services by encouraging the establishment of "green infrastructures" in planning and development policies and to restore at least 15% of degraded ecosystems in 2020. Among the actions targeted to achieve this goal, Member States must map and assess the state and economic value of ecosystems and their services. The acquisition of this mapping is still ongoing for some countries. The European Commission is also aware that land use, which is still unsustainable, is undermining its global or domestic biodiversity and climate change goals.

Dans le cas de la France, la loi pour la reconquête de la biodiversité de la nature et des paysages, de 2016, transposée dans le code de l'Environnement, a résulté en un engagement fort en matière de préservation de la biodiversité, des milieux, des ressources ainsi que de la sauvegarde des services qu'ils fournissent et des usages qui s'y rattachent. Elle a pour ambition

In France, the 2016 law in favour of the restoration of biodiversity and natural landscapes, transposed into the Environment Code, resulted in a strong commitment towards the preservation of biodiversity, environmental resources and the safeguarding of the services they provide as well as the uses associated to them. Its ambition is to better conciliate human activities and biodiversity, by taking into account ecosystem services. Furthermore, on January 1st, 2017, the French Agency for Biodiversity (AFB) was

de mieux concilier activités humaines et biodiversité notamment à travers la prise en compte des services écosystémiques. Le 1er janvier 2017, l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB) a également été créée pour accompagner les acteurs de la biodiversité et de l'aménagement du territoire.

En revanche, malgré ces avancées notables en matière de biodiversité, il n'existe toujours pas de politique nationale globale des sols et ceux-ci sont principalement abordés par différentes politiques sectorielles telles que les sites et sols pollués, la prévention des risques naturels, l'urbanisme ou encore la politique agricole et forestière. Les réglementations en place comme « ICPE », « Déchets » et la loi ALUR 2014 permettent toutefois d'établir la responsabilité et d'encadrer la réhabilitation des sites et sols pollués dans la plupart des cas. Ces réglementations ainsi que la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, sont favorables à la prise en compte de la biodiversité lors des réhabilitations de sites et à la préservation des sols imposant que la biodiversité soit prise en compte dans l'évaluation des risques. Cependant, il n'y a pas encore d'outils méthodologiques nationaux pour aider dans la prise en compte des écosystèmes dans l'évaluation des risques associés aux sites et sols pollués. Les outils de gestion proposés sont encore très orientés sur les enjeux liés à la santé humaine. Des efforts pour pallier ce manque ont été identifiés.

Quelques concepts clés

Selon le texte original de la Convention sur la diversité biologique (CDB) ainsi que l'Article L. 110-1 du Code de l'environnement, la **biodiversité** (ou diversité biologique) se définit comme la « variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie : cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes. » (Nations Unies 1992).

L'**écosystème** est un ensemble dynamique d'organismes vivants (plantes, animaux et micro-organismes) appelé la biocénose, qui interagissent entre eux et avec le milieu (le biotope) dans lequel ils vivent, se nourrissent et se reproduisent. Les dimensions des écosystèmes peuvent varier considérablement. Les composants de l'écosystème développent un réseau dense de dépendances, d'échanges d'énergie, d'information et de matière permettant le maintien et le développement de la vie.

Les **fonctions écologiques** désignent les processus naturels inhérents à un écosystème tels que la fonction chlorophyllienne ou le cycle de l'eau. Chacune des fonctions d'un écosystème peut être caractérisée par un ou plusieurs processus chimiques, physiques ou biologiques, qui peuvent être générateurs de SE. Bien que différentes nomenclatures existent, on distingue généralement trois grandes catégories de fonctions :

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

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

created to help stakeholders in biodiversity and land use planning.

On the other hand, despite these significant advances for biodiversity, there is still no comprehensive national soil policy, or, when there is, it is only addressed by various sectoral policies such as contaminated land, natural hazard prevention or agricultural and forestry policies. The existing regulations such as French domestic IPPC, "Waste legislation" and the 2014 ALUR legislation nevertheless make it possible to establish responsibility and to supervise the rehabilitation of contaminated land in most cases. These regulations, along with the national methodology for the management of contaminated land, encourage the consideration of biodiversity during site rehabilitation and soil conservation. This requires that biodiversity is considered in risk assessment. However, to date, there are no national methodological tools available to help consider ecosystems in risk assessments associated with contaminated land. The existing management tools focus mainly on issues related to human health. Efforts to address this lack are discussed.

A few key concepts

According to the original text of the Convention on Biological Diversity (CBD) and Article L. 110-1 of the Environmental Code, **biodiversity** (or biological diversity) is defined as: "The variability of living organisms of all origins including terrestrial, marine and other aquatic ecosystems and the ecological complexes of which they are part. This includes species and species diversity as well as ecosystem diversity" (United Nations 1992).

An **ecosystem** is a dynamic set of living organisms (plants, animals and micro-organisms) called the biocenosis, which interact with each other and with the environment (biotope) in which they live, feed and reproduce. The dimensions of ecosystems can vary considerably. The components of the ecosystem develop a dense network of dependencies, exchanges of energy, information and material for the maintenance and development of life.

Ecological functions refer to natural processes inherent in an ecosystem such as chlorophyll function or the water cycle. Each of the functions of an ecosystem can be characterised by one or more chemical, physical or biological processes, which can generate ecosystem services.

Although different nomenclatures exist, there are generally three broad categories of functions:

- Hydro-geomorphological functions (e.g. slowing runoff, sediment retention, groundwater recharge, soil stabilisation, etc.);
- Biogeochemical functions (e.g. purification functions, carbon sequestration);
- Biological functions (e.g. species habitats, connectivity).

Finally, **ecosystem services (ES)** are defined as "the services that human populations obtain directly or indirectly from ecosystem functions" (Costanza et al., 1997, MEA 2005). The range of goods and services is wide and varied, from material goods (e.g. medicines, wood, food) to non-material benefits (e.g. erosion and flood control, eco-tourism) or intrinsic benefits of ecosystems (e.g. quality of existence). The Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005) - is the most commonly accepted by the scientific community and government entities for structuring ES economic valuations (Brahic and Terreaux). 2009, DSS 2010, Reveret 2011, UK NEA, nd).

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

Elle distingue quatre catégories de services (Figure 2) :

- Les **services d'approvisionnement** : il s'agit des produits obtenus directement des écosystèmes pour l'alimentation, l'énergie combustible, la fabrication de matériaux, la pharmacopée etc. ;
- Les **services culturels** : les services culturels comprennent l'ensemble des bénéfices récréatifs, esthétiques, existentiels, spirituels, scientifiques, éducationnels et patrimoniaux procurés par les écosystèmes ;
- Les **services de régulation** : ce sont les fonctions de régulation de processus naturels exercées par les écosystèmes qui bénéficient à l'Homme. Ils incluent des services aussi divers que la régulation du climat, le cycle de l'eau, la qualité de l'air, la lutte contre l'érosion, la régulation de certaines maladies etc. ;
- Les **services de support** : ces services ne bénéficient pas directement à l'Homme mais conditionnent le bon fonctionnement des écosystèmes. Ces services peuvent inclure le recyclage des nutriments, la formation des sols, la production primaire de biomasse, etc.

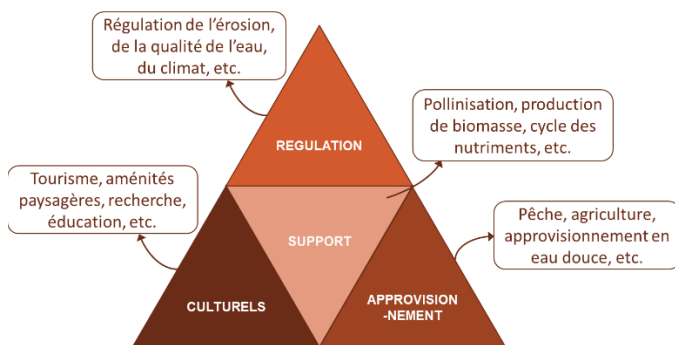


Figure 2 : Catégories de services identifiées par le Millennium Ecosystem Assessment et exemples de SE associés (MEA, 2005)

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

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

L'EFESE considère en effet les services de support comme des fonctions écologiques. Par ailleurs, une partie des services culturels (au sens du MEA) ne sont plus assimilés à des services écosystémiques. En effet, certains d'entre eux reposant sur des valeurs de non-usage (identification, legs, altruisme, etc.), la notion de service écosystémique, associée à un usage, n'est plus appropriée. Ils sont par conséquent regroupés dans une catégorie spécifique intitulée « Patrimoine naturel » (Tableau 2).

It distinguishes four categories of services (Figure 2):

- **provisioning services:** these are products obtained directly from ecosystems for food, fuel energy, materials manufacturing, pharmacopoeia, etc;
- **Cultural services:** cultural services include all the recreational, aesthetic, existential, spiritual, scientific, educational and heritage benefits provided by ecosystems;
- **Regulating services:** these are the functions of regulation of natural processes undertaken by ecosystems that benefit humans. They include services as diverse as climate regulation, the water cycle, air quality, erosion control, disease regulation, and so on;
- **Supporting services:** these services do not directly benefit humans but are the foundations of ecosystems functioning. These services may include nutrient recycling, soil formation, primary biomass production, etc.

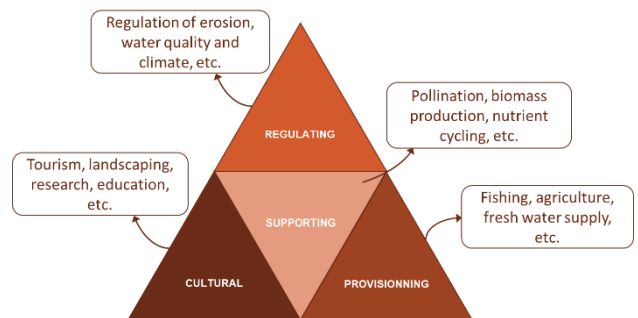


Figure 2: Service categories identified by the Millennium Ecosystem Assessment and examples of associated ES (MEA, 2005)

Since the publication of the Millennium Ecosystem Assessment in 2005, the concept of ES has evolved, and its definition has been clarified. The National Strategy for Biodiversity (2011-2020) mentions in particular "the use by humans of the functions of certain ecosystems, through uses and regulations that regulate this use" (MEDDE, 2012). The French Assessment of Ecosystems and Ecosystem Services (EFESE), initiated in 2012 by the French Ministry of the Environment, has recently proposed a new ES classification (Puydarrieux, Beyou 2017). Unlike the MEA, this classification retains only three categories of goods and services:

- Goods produced by ecosystems;
- Ecosystem services for regulation;
- Cultural ecosystem services.

EFESE considers support services as ecological functions. In addition, some cultural services (in the MEA sense) are no longer considered as ecosystem services. Indeed, some of them are based on non-use values (identification, legacy, altruism, etc.). Thus, the concept of ecosystem services, linked to use values, is no longer appropriate. These types of services are therefore grouped under a specific category called "Natural Heritage" (Table 2).

Tableau 2 : Tableau de correspondance entre les typologies du MEA et de l'EFESE (Puydarrieux et Beyou 2017)

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

Table 2: Correspondences between MEA and EFESE typologies (Puydarrieux et Beyou 2017)

EFESE Typology	MEA Typology (2005)
Ecological functions	Supporting services
Goods produced by ecosystems	Provisioning Services
Regulating Services	Regulating Services
Cultural Services	Cultural and spiritual Services
Natural heritage	

Dans le cadre de cette présente étude, c'est la classification EFESE qui a été retenue.

In the present study, we used the EFESE's classification.

Méthodes d'évaluation de l'efficacité de la restauration des sites dégradés ou pollués

Methods for evaluating the effectiveness of degraded or polluted site restoration

Quelles approches pour évaluer le succès de la restauration ?

Which approaches to evaluate restoration success?

Selon l'International Primer on Ecological Restoration (SER 2004), un écosystème est restauré lorsqu'il possède les neuf attributs suivants (Cristofoli et Mahy 2010) :

According to the International Primer on Ecological Restoration (SER 2004), an ecosystem is restored when it has the following nine attributes (Cristofoli and Mahy 2010):

- L'écosystème restauré contient un ensemble caractéristique d'espèces de l'**écosystème de référence** qui procure une structure communautaire appropriée ;
- L'écosystème restauré est constitué pour la plupart d'espèces indigènes ;
- Tous les groupes fonctionnels nécessaires à l'évolution continue et/ou à la stabilité de l'écosystème restauré sont représentés ou, s'ils ne le sont pas, les groupes manquants ont la capacité à le coloniser naturellement ;
- L'environnement physique de l'écosystème restauré est capable de maintenir des populations reproductrices d'espèces nécessaires à sa stabilité ou à son évolution continue le long de la trajectoire désirée ;
- L'écosystème restauré fonctionne en apparence normalement lors de sa phase écologique de développement et les signes de dysfonctionnement sont absents ;
- L'écosystème restauré est intégré comme il convient dans une matrice écologique plus large ou un paysage, avec qui il interagit par des flux et des échanges biotiques et abiotiques ;
- Les menaces potentielles du paysage alentour sur la santé et l'intégrité de l'écosystème restauré ont été éliminées ou réduites autant que possible ;
- L'écosystème restauré est suffisamment résilient pour faire face à des événements normaux de stress périodiques de l'environnement local, ce qui sert à maintenir l'intégrité de l'écosystème ;
- L'écosystème restauré se maintient lui-même au même degré que son écosystème de référence et a la capacité à persister indéfiniment sous les conditions environnementales existantes.

- *The restored ecosystem contains a characteristic set of species of the **reference ecosystem** that provides an appropriate community structure;*
- *The restored ecosystem is made up mostly of native species;*
- *All the functional groups necessary for the continuous evolution and/or stability of the restored ecosystem are represented or, if they are not, the missing groups have the capacity to colonize it naturally;*
- *The physical environment of the restored ecosystem can maintain breeding populations of species necessary for its stability or continuous evolution along the desired path;*
- *The restored ecosystem appears to evolve normally during its ecological development phase and there are no signs of dysfunction;*
- *The restored ecosystem is appropriately integrated into a broader ecological matrix or landscape, with which it interacts through biotic and abiotic flows and exchanges;*
- *The potential threats of the surrounding landscape to the health and integrity of the restored ecosystem have been eliminated or reduced as much as possible;*
- *The restored ecosystem is resilient enough to face normal periodic stress events in the local environment, which serves to maintain the integrity of the ecosystem;*
- *The restored ecosystem maintains itself to the same degree as its reference ecosystem and can persist indefinitely under existing environmental conditions.*

Sur la base de ces éléments, on comprend que le succès de cette restauration écologique peut être évalué selon différentes approches :

On the basis of these elements, the success of an ecological restoration can be evaluated according to different approaches:

- L'évaluation peut se faire **par comparaison des conditions du site entre un moment t et t + 1 et par l'analyse de sa**

- *The evaluation can be done by comparing **the site conditions between a time t and t + 1 and by analysing its trajectory** (Bazin and Barnaud 2002). The objective is thus to select indicators constructed over an interval of values ranging from altered conditions to conditions*

trajectoire (Bazin et Barnaud 2002). L'objectif est alors de sélectionner des indicateurs construits sur un intervalle de valeurs allant des conditions altérées aux conditions garantissant le fonctionnement écologique du système concerné ;

- Il est également possible de faire appel à **des sites dits de référence, observés à proximité du site et présentant un bon état de fonctionnement**. Il s'agit alors de comparer l'état du site dégradé/pollué à celui du site de référence et s'assurer que la trajectoire suivie converge vers une structure et un fonctionnement similaire à ce qui est observé sur le site de référence ;
- Enfin, et selon les données disponibles, **il est possible de comparer le site en cours de restauration avec le système original qui a subi la dégradation**. Cette comparaison doit néanmoins tenir compte des variations naturelles que peuvent subir les milieux naturels dans le temps, outre les perturbations humaines. Ceci nécessite également d'avoir réalisé des inventaires et des analyses avant la perturbation selon des protocoles similaires à ceux mis en place au cours de la restauration. Ce cas de figure s'avère par conséquent relativement rare.

Aussi, deux écosystèmes intacts n'étant jamais complètement identiques, la comparaison entre les systèmes restaurés et ceux de référence doit être réalisée de manière pragmatique, incluant parfois un jugement de valeur (SER, 2004). Les résultats des comparaisons, et finalement la détermination du succès de l'opération, dépendent largement du choix du site de référence et de la manière dont il englobe les objectifs de la restauration entreprise (Bazin et Barnaud 2002).

Outre le choix du système de référence, une évaluation efficace de la restauration écologique passe par la prise en compte de trois aspects de l'écosystème :

- La régénération de l'écosystème endommagé (au travers de ses composantes biotiques et abiotiques) ;
- La restauration des fonctions écologiques de cet écosystème ;
- Le rétablissement des SE associés à cet écosystème, en adéquation avec son futur usage.

Dans ce contexte, il a semblé approprié de conduire la présente étude à travers le prisme des SE, dont l'approche tient compte de ces trois composantes.

En effet, l'écosystème, les fonctions et les SE sont connectés entre eux. L'écosystème, via ses différentes composantes et leurs interactions, assure la réalisation des fonctions écologiques. Ce sont ces dernières qui sont à l'origine des SE, dont l'homme peut tirer des bénéfices. Ces bénéfices représentent une valeur économique, sociale ou sanitaire qui peut être traduite sous forme monétaire.

La Figure 3 ci-dessous illustre le lien entre écosystèmes, fonctions et SE.

guaranteeing the ecological functioning of the system concerned;

- *It is also possible to use so-called **reference sites, observed near the site and in good working order**. It is then a question of comparing the state of the degraded/polluted site with that of the reference site and to make sure that the trajectory followed converges towards a structure and a functioning similar to what is observed on the reference site;*
- *Finally, and according to the available data, **it is possible to compare the site being restored with the original system that has been damaged**. However, this comparison must take into account the natural variations that can occur in natural environments over time, in addition to human disturbances. This also requires having made inventories and analyses before the disturbance according to protocols like those put in place during the restoration. This case is therefore relatively rare.*

Also, since two intact ecosystems are never identical, the comparison between the restored and the reference systems must be done in a pragmatic way, sometimes including a value judgment (SER, 2004). The results of the comparisons, and finally the determination of the success of the operation, depend largely on the choice of the reference site and the way in which it encompasses the objectives of the restoration undertaken (Bazin and Barnaud 2002).

In addition to choosing the reference system, an effective assessment of ecological restoration involves taking into account three aspects of the ecosystem:

- *The regeneration of the damaged ecosystem (through its biotic and abiotic components);*
- *The restoration of the ecological functions of this ecosystem;*
- *The restoration of ES associated with this ecosystem, in line with its future use.*

In this context, it seemed appropriate to conduct the present study through the ES prism, which considers these three components.

Indeed, ecosystems, functions and ES are connected to each other. The ecosystem, through its various components and interactions, ensures the achievement of ecological functions. These functions are the foundations of ES, from which humankind can benefit. These benefits represent an economic, social or health value that can be translated into monetary terms.

Figure 3 below illustrates the link between ecosystems, functions and ES.

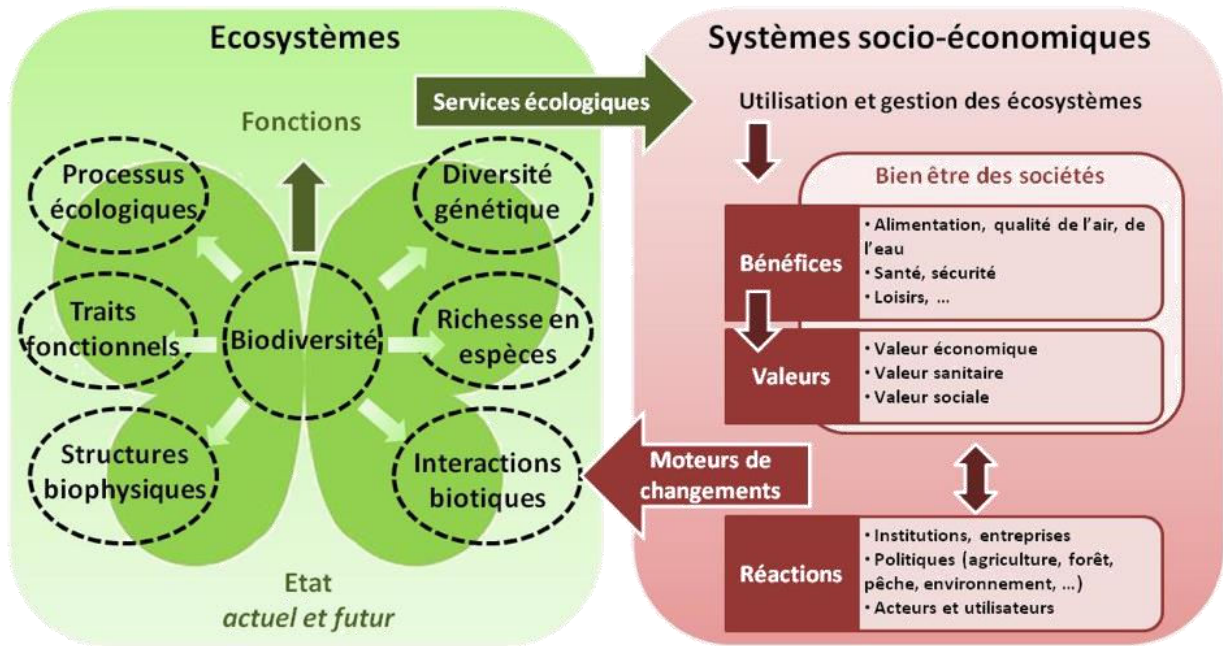


Figure 3 : Cadre conceptuel des écosystèmes et de leurs services (MEDDE 2012)

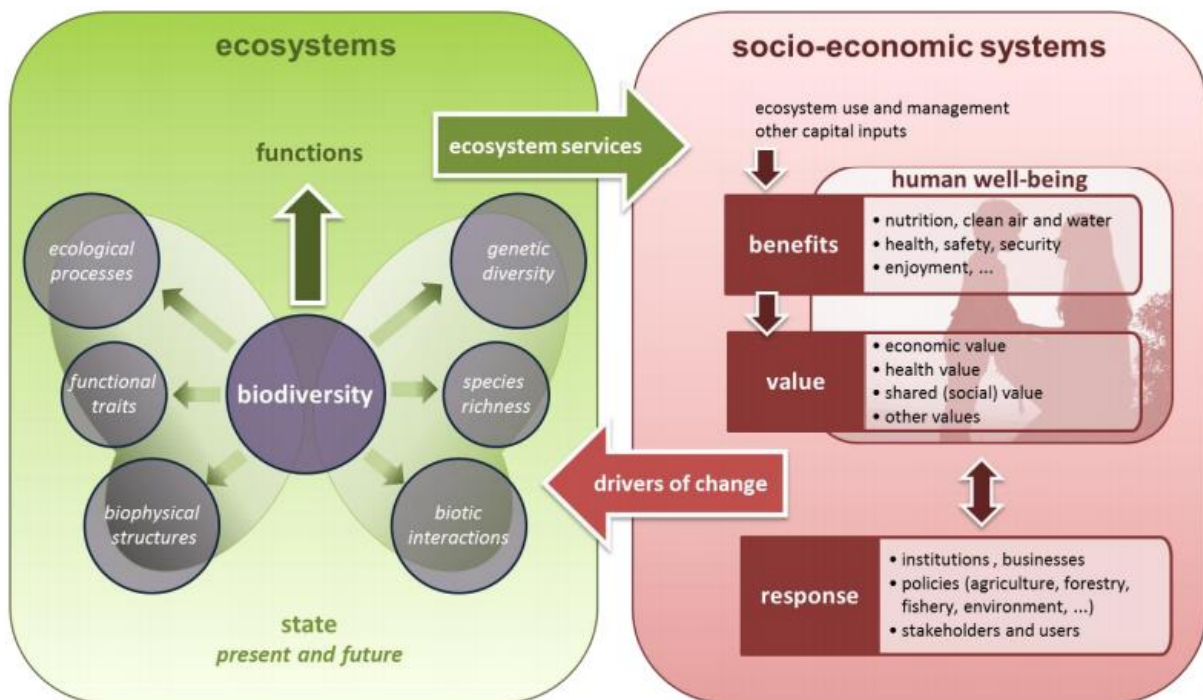


Figure 3: Conceptual framework of ecosystems and their services (MEDDE 2012).

Ce cadre conceptuel constitue une nouvelle démarche structurée et systémique qui permet d'établir les relations entre le bon fonctionnement des écosystèmes et les SE qui leur sont associés. Appliquée au cadre de la restauration écologique de sites pollués et dégradés, elle offre un cadre pertinent pour étudier, optimiser et évaluer la régénérescence des fonctions et services écosystémiques du milieu.

La restauration d'un système fonctionnel et autonome est un préalable essentiel à l'installation pérenne des milieux et espèces visés. Outre l'incidence des conditions édapho-climatiques sur les compartiments biotiques de l'écosystème,

This conceptual framework constitutes a new structured and systemic approach that establishes the relationships between the correct functioning of ecosystems and the associated ES. Applied to the ecological restoration of contaminated land, it provides a relevant framework for studying, optimising and evaluating the regeneration of ecosystem functions and services in the environment.

The restoration of a functional and autonomous system is an essential prerequisite for the sustainable installation of the environments and species targeted. In addition to the impact of soil and climate conditions on the biotic

des recherches récentes montrent l'importance des interactions entre les organismes du sol et le compartiment végétal dans la dynamique des écosystèmes. Restaurer le fonctionnement du sol, notamment dans le cadre des SSP (pollution des sols), contribue à favoriser la dynamique des couverts végétaux (et des réseaux trophiques supérieurs) et inversement : les couverts végétaux influencent les microorganismes au travers de leur litière, des composés exsudés par les racines, ou encore de l'incidence du réseau racinaire sur la structuration des sols (Chapman et al. 2009, Schimel et Bennett 2004). **La bonne restauration du sol, au même titre que la composition des communautés végétales, est donc à la clé d'un bon rétablissement de la fonctionnalité générale des milieux.**

La prise en compte des SE permet par ailleurs de contribuer à une meilleure compréhension de la complexité des processus et des relations entre écosystèmes et usages (Figure 4). Elle rappelle que l'Homme est en interaction permanente avec les écosystèmes et que son bien-être dépend directement du bon fonctionnement de ces derniers. L'approche par les SE permet également d'identifier de manière précise les services rendus par le site restauré et leurs bénéficiaires. De cette manière, elle montre que le périmètre socio-économique bénéficiant des services rendus par le site s'étend au-delà des limites des écosystèmes. L'approche économique peut ainsi convaincre du bienfondé des projets de restauration, ce qui peut s'avérer utile pour justifier les coûts financiers de ces projets et favoriser leur acceptabilité.

Evaluer le succès de la restauration d'un écosystème donné passe donc par le suivi d'indicateurs portant à la fois sur le compartiment aérien ou souterrain, sur des composantes biotiques ou abiotiques et enfin sur des composantes socio-économiques.

compartments of the ecosystem, recent research shows the importance of interactions between soil organisms and the plant compartment in ecosystem dynamics. Restoring the functioning of the soil, especially in the context of contaminated land, helps to promote the dynamics of plant cover (and upper food webs) and vice versa: plant cover influences microorganisms through their litter, root exudates, or the impact of the root system on soil structure (Chapman et al., 2009, Schimel and Bennett 2004). Good soil restoration, as well as the composition of plant communities, is therefore key to a good recovery of the environments general functionality. Considering ES also contributes to a better understanding of the complexity of processes and relationships between ecosystems and uses (Figure 4). It reminds us that humans are in permanent interaction with ecosystems and that their well-being directly depends on the proper functioning of ecosystems. The ES approach also makes it possible to identify the services provided by the restored site and their beneficiaries. In this way, it shows that the socio-economic perimeter benefiting from the services provided by the site extends beyond the limits of the ecosystems. Moreover, the economic approach can help convince of restoration projects benefits, which can be useful to justify the financial costs of these projects and to favour their acceptability.

Therefore, evaluating the success of the restoration of a given ecosystem must involve indicators relating to both the above and belowground compartment, biotic or abiotic components and finally socio-economic components.

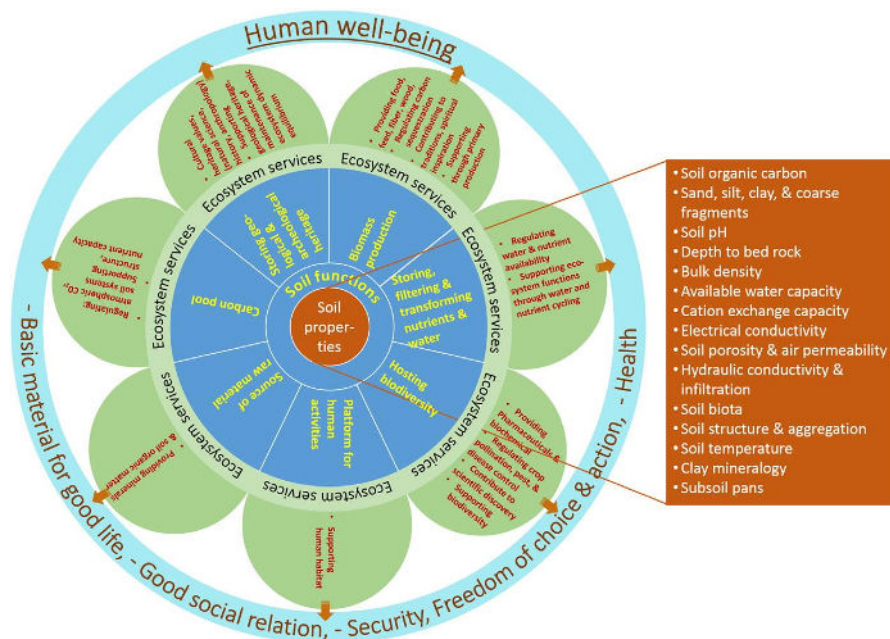


Figure 4 : Diagramme conceptuel reliant les propriétés clés des sols aux services écosystémiques à travers les fonctions du sol (Adhikari et al. 2016)

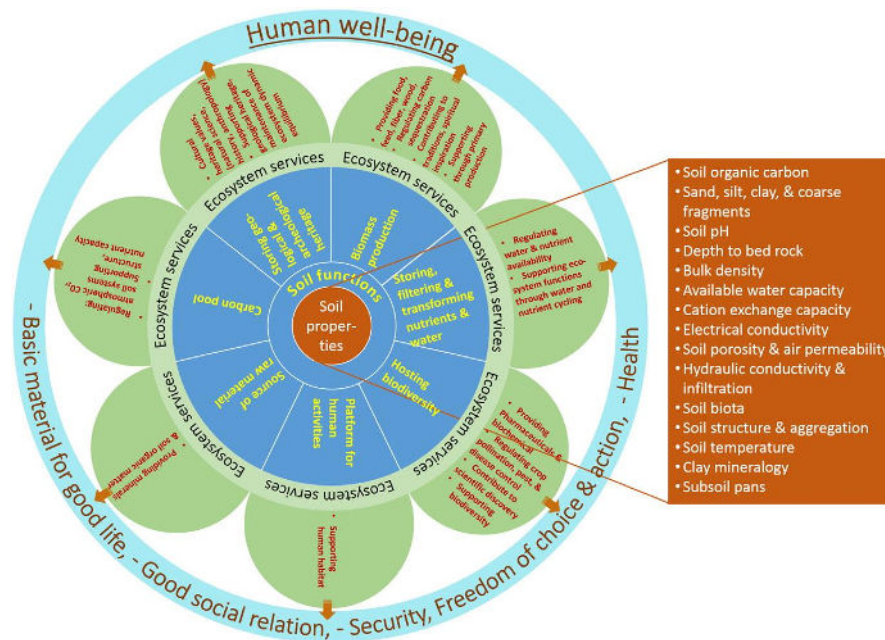


Figure 4: Conceptual diagram linking the key properties of soils to ecosystem services through soil functions (Adhikari et al., 2016).

Les indicateurs de suivi de l'efficacité de la restauration

Le cœur de cette étude a consisté à lister sur la base de la littérature existante et du dire d'expert des indicateurs de mesure de la biodiversité, de la fonctionnalité des milieux ainsi que des services écosystémiques permettant de suivre et d'évaluer le succès de la restauration d'environnements particuliers à savoir les milieux humides, les prairies et les pelouses sèches.

Ces milieux expriment un éventail de fonctions qui sont à l'origine de nombreux biens et services fournis à la société. Les milieux prairiaux (non humides) jouent notamment un rôle essentiel en termes de stabilisation des sols et de réduction du transfert de particules polluantes dans l'air ou dans les eaux. Du fait de leurs caractéristiques intrinsèques (rugosité des sols, présence de matière organique dans les sols, texture des sols), ces milieux sont également à même de ralentir les écoulements ou encore de recharger les nappes. Néanmoins, ils présentent une opportunité plus faible d'exprimer ces fonctions comparativement aux prairies humides, du fait de leur position géographique (pas de lien direct avec la nappe, eaux de ruissellements limitées etc.). En termes de processus biogéochimiques, la restauration de prairies non humides favorise la séquestration du carbone dans les sols, la rétention des polluants ou encore la restauration d'une fertilité propice à une fonctionnalité optimale (en cas de sol pauvre initialement). Ces processus sont particulièrement longs à se mettre en place et il faut donc en tenir compte dans la mise en place de suivis et l'interprétation des résultats.

Les zones humides présentent des fonctions similaires mais du fait de leurs interactions avec les masses d'eau (superficielle, souterraine), elles contribuent de manière évidente au ralentissement des écoulements, à la recharge des nappes, à la rétention des sédiments et au soutien d'étiage. Également en raison de conditions très spécifiques (conditions faiblement oxygénées limitant la dégradation de la matière organique), les sols peuvent accumuler des quantités de carbone relativement importantes. Enfin, ces milieux sont en capacité de retenir, transformer voire éliminer certains polluants tels que les

Indicators to monitor restoration effectiveness

The goal of this study was to list, on the basis of existing literature and expert testimony, indicators for measuring biodiversity, ecosystem functioning and ecosystem services in order to evaluate the success of restoration schemes in special environments, namely wetlands and grasslands.

These environments express a range of functions that are at the root of many goods and services provided to society. Dry grasslands play a key role in terms of soil stabilisation and reduction of the transfer of polluting particles into air or water. Because of their intrinsic characteristics (soil structure, presence of organic matter, soil texture), these environments are also able to slow down water runoff and contribute to aquifer recharge. Nevertheless, they encounter fewer opportunities to express these functions compared to wet meadows, because of their geographical position (no direct link with the water table, limited runoff water, etc.). In terms of biogeochemical processes, the restoration of non-humid grasslands favours carbon sequestration in soils, retention of pollutants and the restoration of soil fertility for optimal functionality (in the case of initially poor soil). These processes take a long time to develop and this must be taken into account in the implementation of monitoring and in the result interpretation.

Wetlands express similar functions. Nevertheless, because of their interactions with water bodies (shallow, underground), they clearly contribute to slowing down runoff, groundwater recharge and sediment retention. Also because of very specific conditions (poorly oxygenated conditions limiting the degradation of organic matter), soils can accumulate relatively large amounts of carbon. Finally, these environments are able to retain, transform or even

phytosanitaires, l'azote⁵ ou le phosphore en excès provenant du bassin versant amont ou d'autres polluants liés aux activités industrielles passées.

Enfin, l'ensemble de ces milieux accueillent un grand nombre d'espèces et peuvent potentiellement jouer un rôle de corridors écologiques.

Dans le tableau ci-dessous sont détaillées les fonctions principales portées par ces milieux (Tableau 3) et qui ont été prises en compte dans le cadre de cette étude.

eliminate certain emergent pollutants or nitrogen⁶ or phosphorus in excess from the upstream catchment or other pollutants related to past industrial activities. Finally, all these environments host a large number of species and can potentially play a role as ecological corridors. In the table below are detailed the main functions carried by these environments (Table 3) and which were taken into account in the context of this study.

Tableau 3 : Fonctions principales portées par les milieux prairiaux et zones humides.

Grands types de fonctions	Prairies non humides	Prairies humides
Fonctions hydrogéomorphologiques	Ralentissement des eaux de ruissellement Stabilisation des sols (protection contre l'érosion)	Ralentissement des eaux de ruissellement, stabilisation des sols (protection contre l'érosion), rétention des écoulements, rétention des sédiments, recharge des nappes, soutien d'étiage
Fonctions biogéochimiques	Séquestration du carbone, restauration ou maintien de la qualité des sols (recyclage de la matière organique, fertilité), rétention, transformation, élimination des polluants (complexation, phytoaccumulation, etc.)	Séquestration du carbone, restauration ou maintien de la qualité des sols (recyclage de la matière organique, fertilité), rétention, transformation, élimination des polluants (complexation, phytoaccumulation, dénitrification etc.)
Fonctions biologiques	Habitats d'espèces Connectivité	Habitats d'espèces Connectivité

Tableau 3: Main functions carried out by dry grasslands and wetlands.

Main function types	Dry grasslands	Wetlands
Hydro-geomorphological Functions	Slow down water runoff Soil stability (protection against erosion)	Slow down water runoff Soil stability (protection against erosion) Water retention, sediment retention, aquifer recharge
biogeochemical Functions	Carbon sequestration, restauration or maintenance or soil quality (organic matter recycling, fertility) retention, transformation and elimination of pollutants (complexation, phyto-accumulation, etc.)	Carbon sequestration, restauration or maintenance or soil quality (organic matter recycling, fertility) retention, transformation and elimination of pollutants (complexation, phyto-accumulation, denitrification, etc.)
Biological Functions	Habitats for biodiversity Ecological connectivity	Habitats for biodiversity Ecological connectivity

Sur la base de la connaissance de ces milieux, un premier travail a abouti à la proposition d'une grille de lecture permettant de sélectionner les indicateurs pertinents à suivre pour évaluer le succès de la restauration. Cette grille est construite sur la base de trois questions principales (Figure 5) :

- Quel est le type de dégradation observé sur le site – physique ou chimique ? Ce premier critère permet *a priori* de cibler certaines fonctions à enjeux ;
- **Quel est le type d'écosystème visé par la restauration ?** En fonction du type de milieux, les fonctions à restaurer en priorité et les indicateurs utilisés peuvent différer de manière importante ;

Based on our knowledge of these environments, a first approach resulted in the proposal of a Indicator Selection Tool (IST) to select the relevant indicators to follow and assess the success of the restoration. This IST was constructed on the basis of three main questions (Figure 5):

- ***What type of degradation is observed on the site - physical or chemical?*** This first criterion allows *a priori* to target relevant functions;
- ***What is the type of ecosystem targeted by the restoration?*** Depending on the type of environment, the functions to be restored in priority and the indicators used may differ significantly;

⁵ La dénitrification est une fonction spécifique des milieux humides. En effet, ce processus, à l'origine de la transformation des nitrates en azote gazeux (N₂), a lieu en conditions anaérobies, c'est-à-dire sans oxygène. Seules des conditions d'engorgement importantes permettent un fonctionnement de ce type, ce qui n'est pas le cas des milieux non engorgés.

⁶ Denitrification is a specific function of wetlands. Indeed, this process, at the origin of the transformation of nitrates into nitrogen gas (N₂), takes place under anoxic conditions. Only large engorgement conditions allow this type of activity, which is not the case for non-flooded environments.

- Quelles sont les fonctions et futurs usages ciblés spécifiquement par la restauration ?

- *What are the functions and future uses specifically targeted by the restoration? Beyond these issues, cost and complexity criteria in terms of data collection or interpretation may apply. The figure below illustrates the criteria taken into account in the IST.*

Au-delà de ces questions, des critères de coûts et de complexité en termes de récolte des données ou d'interprétation peuvent s'appliquer. La figure ci-dessous illustre les critères pris en compte dans la grille de lecture.

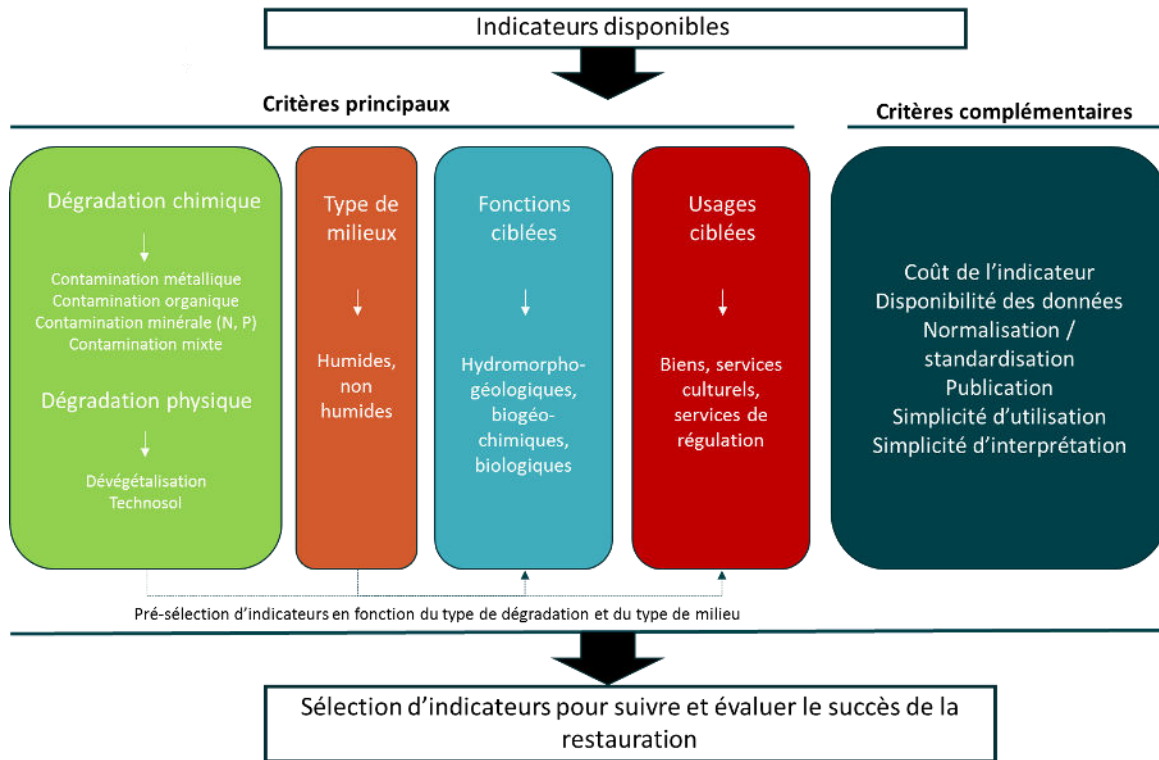


Figure 5 : Présentation schématique de la grille de sélection des indicateurs

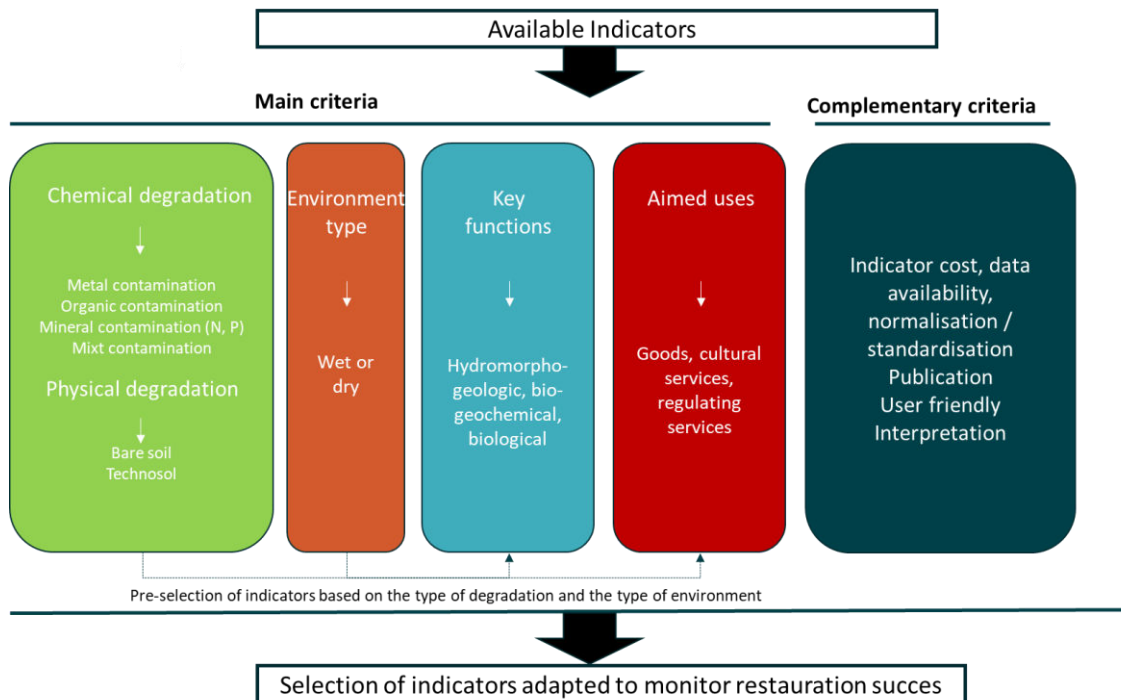


Figure 5: Presentation of the Indicator Selection Tool.

Selon les réponses données à ces différentes questions, l'utilisateur de la grille de lecture est alors orienté vers différents indicateurs liés au compartiment aérien ou souterrain de l'écosystème ou encore aux services écosystémiques. **Au total, ce sont 46 indicateurs de fonction qualifiant le compartiment souterrain et aérien et 21 indicateurs liés aux services écosystémiques qui ont été proposés.**

According to the answers given to these different questions, the IST user is then oriented towards different indicators related to the above or belowground ecosystem compartment or to ecosystem services. **Overall, 46 function-indicators describing above and belowground compartments and 21 indicators related to ecosystem services are proposed.**

Un exemple est présenté ci-dessous (Figure 6) :

Tableau 4 : Liste des indicateurs associés aux fonctions des zones humides et milieux prairiaux (compartiment souterrain et aérien). Le détail des sous-fonctions et de leur lien avec chaque indicateur est présenté dans le tableau (grille de lecture associée à ce rapport). L'ensemble de ces sous-fonctions sont listées dans le tableau 2. L'annexe 1 précise les protocoles à mettre en place pour certains des indicateurs.

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides				Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (recette et analyse)	Acquisition des données	Analyse des données et niveau d'expertise requis	Référence et lien vers site web <i>Indicateur standardisé / existence d'une norme</i>
		Prairies non humides	Fonctions hydromorphogéologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques							
1	Densité et biodiversité des vers de terre	X	X	X	X	Bio-indicateur d'effet, ils rendent compte de l'état des usages de l'écosystème sol. Notamment la présence de vers épigés et anéciques qui participent au fractionnement de la matière organique morte et à son enfouissement et les endogés qui créent une structure du sol grumelleuse participant ainsi à la rétention et l'infiltration de l'eau dans le sol.	Sensibles au changement d'usage (labour du sol, teneur en matière organique) et à la pollution	+++	€	+	++	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php ADEME (2017) La méthode d'étude des vers de terre est issue de la norme NF EN ISO 23611-1.
2	Indice SET escargots	X	X	X		Cet indicateur apporte des informations relatives à l'exposition aux métaux du sol à des consommateurs de niveau supérieurs. Plus la concentration en métaux est importante, plus la contamination est forte (et inversement). Les valeurs mesurées sont comparées à des concentrations internes de référence.	Contamination métallique. Indicateurs d'un risque de transfert d'une pollution du sol vers les organismes supérieurs	NA	€	++	+	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php ADEME (2017)
3	Nématofaune : Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI), de maturité (IM), des nématodes phytophages (PPI) et indice des voies de décomposition (IVD)	X	X	X	X	A partir d'un référentiel (EUSOL®), les différents indices renseignent sur l'état biologique des sols et leur biodiversité. Notamment différentes fonctions du sol : le niveau d'activité biologique globale, la disponibilité des nutriments, la stabilité /niveau de perturbation du sol, le risque lié aux nématodes parasites des cultures et la taille du compartiment microbien.	Bio-indicateurs d'effet et d'impact très sensible au changement d'usage. En effet plus l'indice de structure est élevé et plus il est stable et plus les abondances des différents groupes fonctionnels sont élevées et plus l'activité biologique du sol est importante et satisfaisante. Cet indicateur est sensible aux perturbations chimiques (métalliques, organiques ou minérales) ainsi qu'aux modes d'exploitation agricole.	+++	€	+++	+++	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php ADEME (2017) La méthode d'étude de la nématofaune est normalisée (NF EN ISO 23611-4) ainsi que le test écotoxicologique <i>in vitro</i> (NF ISO 10872)
...
23	Propriétés physico-chimiques du sol	X	X	X	X	Ces 6 indices ont été définis puis les variables de chaque indice validé par une approche statistique sur un jeu de données particulier pour évaluer les effets d'apports répétés d'amendements de matière organique sur la qualité des sols et la production végétale. C'est donc l'approche méthodologique qui est intéressante à appliquer dans d'autres contextes, l'interprétation se fait alors par comparaison avec des parcelles de référence.	Pertinent dans le cadre d'une dégradation physique des sols afin de s'assurer d'une meilleure structure suite à la mise en œuvre de mesures de restauration.	++	€	+	+++	Obriot et al., 2016
24	Contaminants totaux	X	X	X			Pertinent dans le cadre d'une contamination chimique pour vérifier les teneurs totales résiduelles	++	€	+	+++	Obriot et al., 2016

Figure 6 : Extrait du rapport final listant et décrivant les indicateurs biologiques et physico-chimiques proposés dans le cadre de cette étude

Pour chacun des indicateurs listés, il est précisé systématiquement les milieux pour lesquels ils se révèlent pertinent (milieux humides ou non humides), les fonctions exprimées (fonctions hydromorphogéologiques, biogéochimiques ou biologiques), l'interprétation qui peut en être faite, leur pertinence dans le cadre d'actions spécifiques, le niveau de sensibilité aux actions de restauration, le coût, la complexité d'acquisition et d'interprétation des données, l'existence d'une norme et enfin les références bibliographiques associés.

For each of the listed indicators complementary information are provided such as; the environment for which they are relevant (wet or dry environment); the functions expressed (hydrogeological, biogeochemical or biological functions); the interpretation that can be made of them; their relevance in the framework of specific actions; the level of sensitivity to restoration actions; the cost; the complexity of data acquisition and interpretation; the existence of a standard and finally the associated bibliographic references.

Analyse de trois cas d'étude et test de la grille de lecture

Un essai d'application de cette grille de lecture a ensuite été mené sur trois cas de restauration de sites identifiés par le comité de pilotage du projet : un crassier métallurgique phytostabilisé, une installation de stockage de déchet et une ancienne carrière restaurée en milieu humide (bassin d'écrêtage des crues). Le test réalisé sur l'installation de stockage de déchet souligne la pertinence des indicateurs pour capturer des changements mêmes sensibles des communautés végétales. Les relevés réalisés entre 2014 et 2017 soulignent une dégradation sensible de la qualité des milieux (fonctions biologiques) avec probablement une réduction de l'entretien (apparition d'espèces envahissantes, tendance à la fermeture du milieu etc.) liée à la rétrocession du site à la commune. Des actions ont été préconisées et seront mises en place dès 2018. Les fonctions hydrogéomorphologiques (notamment fonction de stabilisation des sols) sont en revanche clairement favorisées par les actions qui ont été mises en œuvre sur le site.

L'analyse des données du crassier a révélé la pertinence de certains indicateurs spécifiques pour s'assurer de la résorption de la matière polluante et de la mise en place de groupements spontanés de type « pelouse » méso-eutrophe particulièrement adapté à ce type de contexte (Figure 7). Les résultats obtenus convergent avec ceux obtenus par l'équipe scientifique en charge du projet, à savoir la pertinence d'un traitement associant MIATE⁷ et ensemencement naturel pour favoriser la phytostabilisation des sols.

Case study analysis and trial application of the IST

An application trial of this IST was conducted on three site restoration cases identified by the project's steering committee: a phyto-stabilised metallurgical slag, a waste storage facility and an old restored wetland quarry (flood basin). The test carried out on the waste storage facility underlines the relevance of the indicators to capture even sensitive changes in plant communities. Surveys carried out between 2014 and 2017 highlight a significant deterioration in the quality of the environment (biological functions) with probably a reduction in maintenance (appearance of invasive species, tendency to close the environment, etc.) linked to the retrocession of the site to the commune. Actions have been recommended and will be implemented as early as 2018. The hydro-geomorphological functions (notably the soil stabilisation function) are, on the other hand clearly favoured by the actions that have been implemented on the site.

The analysis of the data from the metallurgical slag revealed the relevance of certain specific indicators to ensure the stabilisation of the pollutants and the setting up of meso-eutrophic lawn-type spontaneous groups particularly adapted to this type of context (Figure 7). The results obtained converge with those obtained by the scientific team in charge of the project, namely the relevance of a treatment combining MIATE (Water treatment residues) and natural seeding to promote soil phytostabilisation.

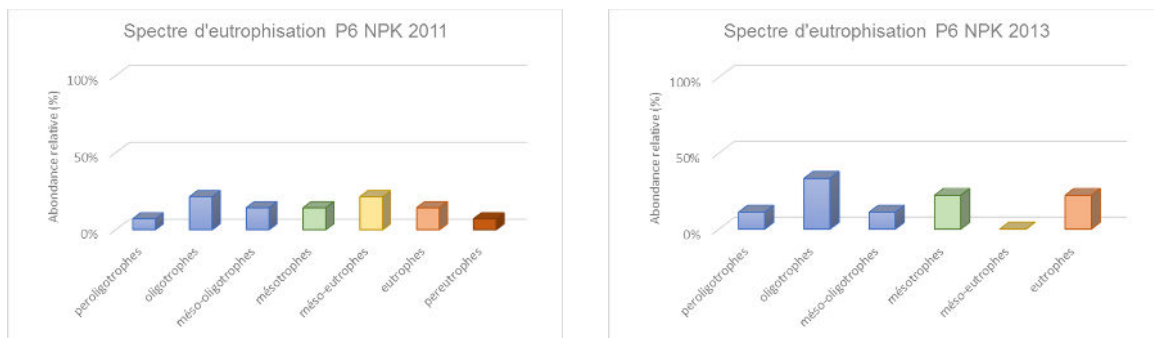


Figure 7 : Graphiques en histogrammes montrant les pourcentages d'espèces par catégories d'eutrophisation, résultats issus des relevés 2011 et 2013 sur la parcelle P6 du programme Physafimm. Sur la parcelle P6, on constate en 2011, sur la parcelle P6, une richesse spécifique de 15 espèces dont 21% sont considérées comme eutrophes et 21,4% méso-eutrophes. Selon la grille d'évaluation proposée (voir rapport général), on est d'ores et déjà dans un état relativement correct sur cette parcelle qui n'a pas reçu d'amendement.

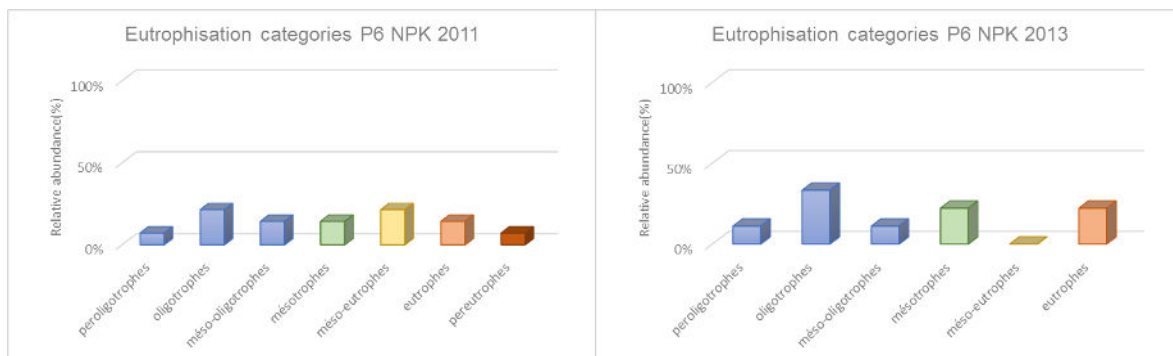


Figure 7: Graphs in histograms showing the percentage of species by eutrophication categories, results from the 2011 and 2013 surveys on the P6 plot of the Physafimm program. On parcel P6, in 2011, on parcel P6, we find a species richness of 15 species of which 21% are considered eutrophic and 21.4% meso-eutrophic.

⁷ Matériaux d'Intérêt Agronomique issus du Traitement des Eaux.

Enfin, concernant l'ancienne carrière restaurée, et malgré l'intérêt des actions de restauration entreprises, les données disponibles (liste d'espèces) n'étaient pas suffisantes pour s'assurer d'une trajectoire optimale des milieux. Ce dernier exemple souligne l'importance de définir un protocole de relevé robuste au préalable (liste d'espèce sur une placette / transect avec si possible évaluation de l'abondance) et répété dans le temps.

De manière générale, cet essai d'application a montré que la grille de lecture permet effectivement d'évaluer l'atteinte des objectifs de restauration mais également d'identifier les points d'amélioration au cours du processus de restauration en lui-même. Néanmoins, il a également permis de souligner la difficulté d'utiliser des données qui n'ont pas été relevées dans l'objectif de réaliser un bilan *a priori* de la réussite de la restauration du point de vue de la fonctionnalité et des services rendus par le milieu restauré. Également, il est apparu difficile de pouvoir tenir compte, au travers d'un outil se voulant générique, de la spécificité et de la complexité de chaque site. Enfin, un manque de recul apparaît clairement quant à l'interprétation des bio-indicateurs de la composante sol (par ex., selon quelle référence ?) alors qu'il est implicite que dans un sol de « qualité » un cortège végétal durable ne pourra s'installer.

Conclusions et perspectives

La grille de lecture proposée dans le cadre de cette étude constitue une première piste pour définir la nature et la fréquence des relevés écologiques et socio-économiques en amont de la restauration et ce afin d'assurer le suivi efficace des mesures de restauration. Par ailleurs, malgré des difficultés et la nécessité d'affiner le choix des indicateurs à utiliser pour l'évaluation de la restauration des milieux dégradés ciblés, cette étude pose des bases qui pourraient être déclinées dans d'autres contextes et pour d'autres usages (friches urbaines, jardins ouvriers etc.) et à terme définir les indicateurs incontournables pour valider la restauration d'un milieu.

En termes de développement à venir, différentes pistes ont été identifiées.

Le besoin se fait cruellement sentir quant à la définition d'une liste d'indicateurs communs, pertinents à l'échelle nationale voire européenne pour suivre et valider la restauration d'un site (référentiels). Des avancées majeures ont récemment eu lieu dans le cadre des dossiers « Loi sur l'Eau » (rubrique 3.3.1.0. - Zones humides ou marais) avec la publication par l'AFB de la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides (Gayet et al. 2016). Outre la vérification des principes liés à l'application de la doctrine Eviter, Réduire et Compenser, les outils mis à disposition peuvent être utilisés comme tableau de bord pour vérifier l'atteinte des objectifs fixés (outil de pilotage pour adapter les mesures compensatoires mises en œuvre). Des initiatives similaires pourraient potentiellement être mises en œuvre dans le contexte spécifique de la restauration des sites et sols pollués / dégradés. Au-delà de la proposition d'indicateurs ou d'un tableau de bord dédié, une première étape pourrait être de concevoir un guide à l'usage des gestionnaires de site sur les types de relevés et protocoles à mettre en œuvre pour réaliser un suivi pertinent de la restauration dans le temps. Un guide à l'usage des industriels pour la remise en état des sites après exploitation répondrait également à une attente forte.

L'amélioration de la connaissance sur la diversité des sols et sur la construction d'indicateurs dédiés (en lien avec les fonctions ou les usages) est également une priorité. En effet, si les indicateurs sont nombreux, la récolte des données, leur analyse et interprétation demeurent souvent complexes et dans certains

Finally, concerning the old restored quarry, and despite the interest of the restoration actions undertaken, the available data (species list) were not sufficient to ensure an optimal trajectory of the ecosystem. This last example emphasizes the importance of defining a robust survey protocol beforehand (species list on a plot / transect with possible assessment of abundance) and repeated over time.

In general, this application test has shown that the IST can be used to evaluate the achievement of the restoration objectives but also to identify the points of improvement during the restoration process itself. Nevertheless, it also highlighted the difficulty of using data that were not acquired to make an a priori assessment of the success of the restoration from the point of view of the functionality and services provided by the restored environment. Also, it seemed difficult through a generic tool such as the one developed in this study to capture the specificity and the complexity of each site. Finally, a lack of hindsight appears clearly in terms of the interpretation of the soil bioindicators (e.g. according to what reference?), whereas it is implicit, that soil quality is one of the foundations for a sustainable environment.

Conclusions and perspectives

The IST proposed in this study is a first step towards defining the nature and frequency of ecological and socio-economic surveys before restoration in order to effectively monitor restoration measures. In addition, despite difficulties and the need to refine the choice of indicators to be used for assessing the restoration of targeted degraded environments, this study lays foundations that could be applied in other contexts and for other uses (urban wasteland, industrial gardens, etc.), and eventually define a set of essential indicators to validate an environmental restoration.

In terms of future development, several orientations are proposed.

There is a general demand to define a list of common indicators, relevant at national or even European level to monitor and validate the restoration of a site (reference frames). Major progress has recently been made in the context of the "Water Act" files (section 3.3.1.0 - Wetlands or marshes) with the publication by the AFB of the national method for evaluating wetland functions (Gayet et al., 2016). Beyond the application of the mitigation hierarchy, the available methods can be used as a toolbox to check goal achievement (pilot tool to adapt the implementation of compensatory measures). Similar initiatives could potentially be implemented in the specific context of remediation of contaminated or degraded land. Beyond the proposal of indicators or a dedicated toolbox, a first step could be to design a guide for site managers (experimental protocols and statistical analysis) to be implemented in order to carry out relevant monitoring of the restoration over time. A guide for industrial use for the rehabilitation of sites after exploitation would also meet a strong expectation.

Improving knowledge of soil diversity and the construction of dedicated indicators (related to functions or uses) is also a priority. Indeed, while there are many indicators, data collection, analysis and interpretation often remain complex and in some cases are reserved for the research community. This has, moreover, recently been confirmed by an article published by Bünemann et al. (2018), which highlights the lack of explicit protocols for interpreting indicators, making it difficult for managers to appropriate them. Beyond targeted R & D actions to improve the characterisation of the diversity and functioning of the soil, it

cas réservés au monde de la recherche. Ceci a, d'ailleurs, été confirmé récemment par un article publié par Bünemann et al. (2018) qui souligne le manque de protocoles explicites pour interpréter les indicateurs, rendant donc leur appropriation difficile par les gestionnaires.

Au-delà d'actions de R&D ciblées pour améliorer la caractérisation de la diversité et du fonctionnement du sol, il faudrait pouvoir mettre en œuvre des actions de développement expérimental (tests opérationnels de techniques scientifiques en vue d'améliorer la prise en compte des sols dans les études commanditées par les gestionnaires de site) puis de transfert des laboratoires vers les bureaux d'étude.

Idéalement, il s'agirait de :

- Construire une étude complète, en amont de la restauration, avec des informations sur l'état initial (avant dégradation et/ou avant restauration) et faire les calculs à différentes étapes du projet ;
- Tester la démarche et les indicateurs dans le cas où on aurait à choisir entre plusieurs options de restauration : laquelle est la plus susceptible de remplir les objectifs de restauration ?
- Comparer les résultats de la démarche et du calcul des indicateurs, au dire d'expert classique souvent limité aux seuls aspects « biodiversité descriptive » et espèces/habitats patrimoniaux pour mettre en évidence les concordances/différences, les plus-values de la démarche (informations, conclusions, robustesse, éléments quantifiés etc.).

Ce travail devrait également conduire à définir la fréquence des mesures et du calcul des indicateurs (tous les 2 ans, 5 ans, 10 ans ?) et ceci en fonction des sites, des spécificités locales, des enjeux et des objectifs de restaurations ainsi que la durée même du suivi (5, 10, 25 ans ?). Ce dernier point questionne ce qu'est un écosystème à l'équilibre, autonome, tenant compte du caractère dynamique des écosystèmes notamment dans le contexte du changement climatique.

Enfin, la prise en compte des services écosystémiques dans le contexte de la restauration écologique devrait être renforcée, ou plutôt engagée. Avant la présente étude, aucun indicateur ne semblait en effet avoir été construit pour permettre la quantification de ces services dans le cadre précis de la restauration. Pourtant, généraliser cette prise en compte dans le suivi des mesures de restauration permettrait de rétablir plus facilement le lien entre la biodiversité et l'Homme et de faciliter la compréhension des processus existants entre écosystèmes naturels et humains. L'approche par les services écosystémiques pourrait par ailleurs être utilisée comme un outil d'aide à la décision. Elle constitue, en effet, un moyen de guider la restauration écologique d'un site vers un usage spécifique afin de maximiser la contribution des actions de restauration à l'augmentation du capital naturel et des services écosystémiques. Aussi, identifier puis renseigner des indicateurs de services écosystémiques dès le lancement des opérations de restauration permettrait de réaliser par la suite des évaluations économiques de services écosystémiques et ainsi évaluer les bénéfices socio-économiques issus des mesures de restauration écologique. L'approche économique peut permettre de convaincre du bien-fondé des projets de restauration, ce qui peut s'avérer utile pour justifier les coûts financiers de ces projets et favoriser leur acceptabilité.

would be necessary to be able to implement experimental development actions (operational tests of scientific techniques to take more account of soils in studies commissioned by site managers) and then transfer from laboratories to design offices

Ideally, it would consist of:

- *Building a complete study, before restoration, with information on the initial state (before degradation and / or before restoration) and make assessments at different stages of the project;*
- *Testing the approach and the indicators in cases where we have to choose between several restoration options: which one is most likely to fulfil the restoration objectives?*
- *Comparing the results of the approach and the calculation of the indicators to the classic expert approach which is often limited to "descriptive biodiversity" and species / habitats to highlight the concordances / differences, the benefit of the approach (information, conclusions, robustness, quantified elements, etc.).*

This work should also lead to the definition of the frequency of indicator monitoring (every 2 years, 5 years, 10 years?) according to the sites, the local specificities, the stakes and the restoration objectives as well as the duration (5, 10, 25 years?). This last point questions the definition of balanced and autonomous ecosystem, particularly in the context of climate change. Finally, the consideration of ecosystem services in the context of ecological restoration should be strengthened, or rather initiated. Before the present study, no indicator seemed to have been constructed to allow the quantification of these services in the specific context of restoration. However, generalising this consideration in monitoring restoration measures would make it easier to restore the relationship between biodiversity and humans and to facilitate the understanding of the existing processes between natural and human ecosystems. The ecosystem services approach could also be used as a decision support tool. It is indeed a way to guide the ecological restoration of a site towards a specific use to maximize the contribution of restoration actions and increase natural capital and ecosystem services. Also, identifying ecosystem services indicators from the beginning of restoration operations would allow economic valuations to be carried out, thus assessing the socio-economic benefits of ecological restoration measures. The economic approach can make it possible to convince of the benefits of restoration projects, which can be useful to justify the financial costs of these projects and to promote their acceptability.