

Mesure de la biodiversité et évaluation des services écosystémiques des milieux restaurés

Méthodes et retours d'expériences



**MESURE DE LA BIODIVERSITÉ ET ÉVALUATION DES SERVICES
ÉCOSYSTÉMIQUES DES MILIEUX RESTAURÉS**

MÉTHODES ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

RAPPORT FINAL

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

Comité de suivi de l'étude :

Sandra BERMAN - SUEZ, Julie CHARTON-BISSETTA - EDF, Valentin CONDAL - SUEZ, Bénédicte COUFFIGNAL – RECORD, Sophie GALICHON - SNCF, Maxime GOMBART - SNCF, Cécile GRAND - ADEME, Jean-Philippe JAEG - Ecole vétérinaire de Toulouse/ RECORD, Philippe MARCHAL - SOLVAY, Audrey MEJDOUBI - SECHE ENVIRONNEMENT, Aurélien PUISEUX - TOTAL, Lorraine ROY - EDF/EIFER.

Résumé

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 votée 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 réglementaires français et européens relatives 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 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 clés

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:

Restoration, rehabilitation, contaminated land, biodiversity, indicators, ecosystem services, land legislation.

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS	8
1- CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	9
1.1. Contexte.....	9
1.2. Objectifs de l'étude	11
1.3. Champs d'application de l'étude	12
2- CONTEXTE REGLEMENTAIRE	13
2.1 La politique de protection des sols et de protection/restauration de la biodiversité à l'international	13
2.2 La politique et la réglementation sur la protection des sols et de protection/restauration de la biodiversité en Europe	14
2.2.1 La politique et la réglementation sur la protection des sols en Europe.....	14
2.2.2 La politique et la réglementation sur la protection / restauration de la biodiversité en Europe	16
2.2.3 Zoom sur quelques pays européens et non Européens : Pays-Bas, Allemagne, Angleterre et les Etats-Unis	18
2.3. Exigences réglementaires concernant la « restauration » de la biodiversité et la réhabilitation des sites et sols pollués ou dégradés en France	24
2.3.1 Exigences réglementaires concernant la « restauration » de la biodiversité en France.....	24
2.3.2 Politique nationale et exigences réglementaires sur la réhabilitation des sites et sols pollués ou dégradés en France	26
2.3.3 Exigences réglementaires concernant la biodiversité lors de projet de réaménagement en France	30
2.4 conclusions sur le contexte réglementaire.....	32
3- METHODES D'EVALUATION DE L'EFFICACITE DE LA RESTAURATION DES SITES DEGRADEES OU POLLUES	34
3.1. Introduction	34
3.2. Cadre conceptuel et méthodologique.....	35
3.2.1. Quelques concepts clés.....	35
3.1.2. Quelles approches pour évaluer le succès de la restauration ?	35
3.2.3 Les indicateurs de suivi de l'efficacité de la restauration.....	39
3.2.4 Spécificité des milieux prairiaux et zones humides	42
3.3 Présentation de la grille de lecture	43
3.4 Inventaire des indicateurs associés aux fonctions	49

3.4.1 indicateurs associés compartiment souterrain	49
3.4.2 Indicateurs associés au compartiment aérien.....	51
3.4.3 Liste des indicateurs associées aux fonctions	52
3.5. Inventaire des Indicateurs socio-économiques.....	67
3.5.1. Services écosystémiques : Rappel théorique	67
3.5.2. Revue des indicateurs de SE.....	70
3.5.3. Construction des indicateurs socio-économiques	73
3.5.4. Liste des indicateurs socio-économiques.....	74
4- ANALYSE DE TROIS CAS D'ETUDE ET TEST DE LA GRILLE DE LECTURE	83
4.1 Site de Villeneuve sur Verberie.....	83
Présentation générale du site	83
Données disponibles	84
Choix des indicateurs à suivre au regard des objectifs de restauration	86
Tests des indicateurs sélectionnés	92
Conclusion et limites	95
4.2 Site « KMO TGV Est » de Vaires-sur-Marne	95
Présentation générale du site	95
Données disponibles	96
Choix des indicateurs à suivre au regard des objectifs de restauration	97
Tests des indicateurs sélectionnés	102
Conclusion et limites	103
4.3 Site de ArcelorMittal	104
Présentation générale du site	104
Données disponibles	105
Choix des indicateurs à suivre au regard des objectifs de restauration	105
Tests des indicateurs floristiques sélectionnés	110
Tests des indicateurs de la qualité des sols sélectionnés	113
Conclusion et limites	114
5- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	115
6- BIBLIOGRAPHIE.....	118
7- ANNEXES.....	124

Annexe 1. Présentation des protocoles pour l'analyse des communautés végétales et animales (compartiment aérien).	125
Structure de la végétation et recouvrement (35)	125
Qualité de la végétation (36)	127
Fermeture du milieu (37).....	129
Indicateur Odonates (40).....	130
Indicateur Lépidoptères (Rhopalocères) (41)	132
Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie (42)	133
Indicateur – graminées (43).....	134
Présence d'espèces végétales exotiques envahissantes (44)	136
Indicateur Humidité du milieu - Orthoptères (46)	136
Annexe 2 : Liste des SE des milieux prairiaux et bénéficiaires associés	138
Annexe 3. Liste des SE des milieux humides et bénéficiaires associés	140

Liste des abréviations

CBD : Convention pour la Diversité Biologique

CERCLA : Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act

EPA : Environmental Protection Agency

ERA : Ecological Risk Assessment

ESA: Endangered Species Act

HFF : Habitats-Faune-Flore

ICPE : Installations Classée pour la Protection de l'Environnement

ISD : Installation de Stockage de Déchets

IQE : Indice de Qualité Ecologique

MEA : Millenium Ecosystem Assessment

MIATE : Matériaux d'Intérêt Agronomique issus du Traitement des Eaux

NEPA : National Environmental Policy Act

ODD : Objectifs de Développement Durable

PAE : Programme d'Action pour l'Environnement

SE : Service Ecosystémique

SIC : Sites d'Importance Communautaire

SNB : Stratégie Nationale pour la Biodiversité

SSP : Sites et Sols Pollués

TFUE : Traité Fondateur de l'Union Européenne

UE : Union Européenne

ZCS : Zone Spéciale de Conservation

1- Contexte et objectifs

1.1. Contexte

Répondant à des enjeux environnementaux mais aussi socio-économiques, les dépenses liées à la restauration de sites (ou sols) dégradés ou pollués¹ sont en très forte augmentation depuis 15 ans (Bouagal 2012). Outre des enjeux évidents de santé publique (réduction des risques de propagation des polluants), la mise en œuvre d'actions de restauration permet de rétablir la fonctionnalité des milieux et les services écosystémiques² (SE) rendus par ces écosystèmes. Elles 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'Homme³.

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. Il s'agit donc d'accélérer le rétablissement d'un écosystème tout en respectant, le mieux possible, la composition spécifique, la structure communautaire, les fonctions écologiques, la capacité de l'environnement physique à supporter son biote et la connectivité avec le paysage alentour (Laugier 2012). Les retours d'expérience de nombreux pays montrent néanmoins que restaurer – *stricto sensu* – un écosystème historique reste utopique. En effet, les écosystèmes restaurés ne peuvent jamais être des répliques statiques 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 remédiation⁴ (dans le cas de pollution chimique) qui sont généralement mis en œuvre (Figure 1). Tout comme la restauration, la réhabilitation écologique se sert des écosystèmes historiques ou préexistants comme références, mais les buts et stratégies des deux activités diffèrent (Aronson 2010). En revanche, la réhabilitation insiste sur la réparation et la récupération des processus, et donc sur la productivité et les services de l'écosystème, tandis que la restauration vise également à rétablir l'intégrité biotique préexistante, en termes de composition spécifique et de structure des communautés.

Enfin, lorsqu'il s'agit de restaurer un écosystème pour un tout autre usage, on parle de réaffectation (Figure 1). 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).

A noter : Pour une question de lisibilité, le terme générique « restauration » sera utilisé dans l'ensemble du rapport. Il couvre l'ensemble des notions présentées ci-dessus (restauration, réhabilitation, réaffectation).

¹ Il n'y a pas définition réglementaire de la « pollution » en France, Cependant, la définition suivante est couramment utilisée hors cadre juridique : 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 Ensemble des bénéfices que l'humanité retire de l'utilisation des écosystèmes (TEEB, 2010). Différents usages peuvent être tirés des services écosystémiques.

³ FAO: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/en/>

⁴ Le terme remédiation se réfère à un ensemble de techniques utilisées pour dépolluer un site naturel (sol, sédiments, eaux de surface ou souterraines).

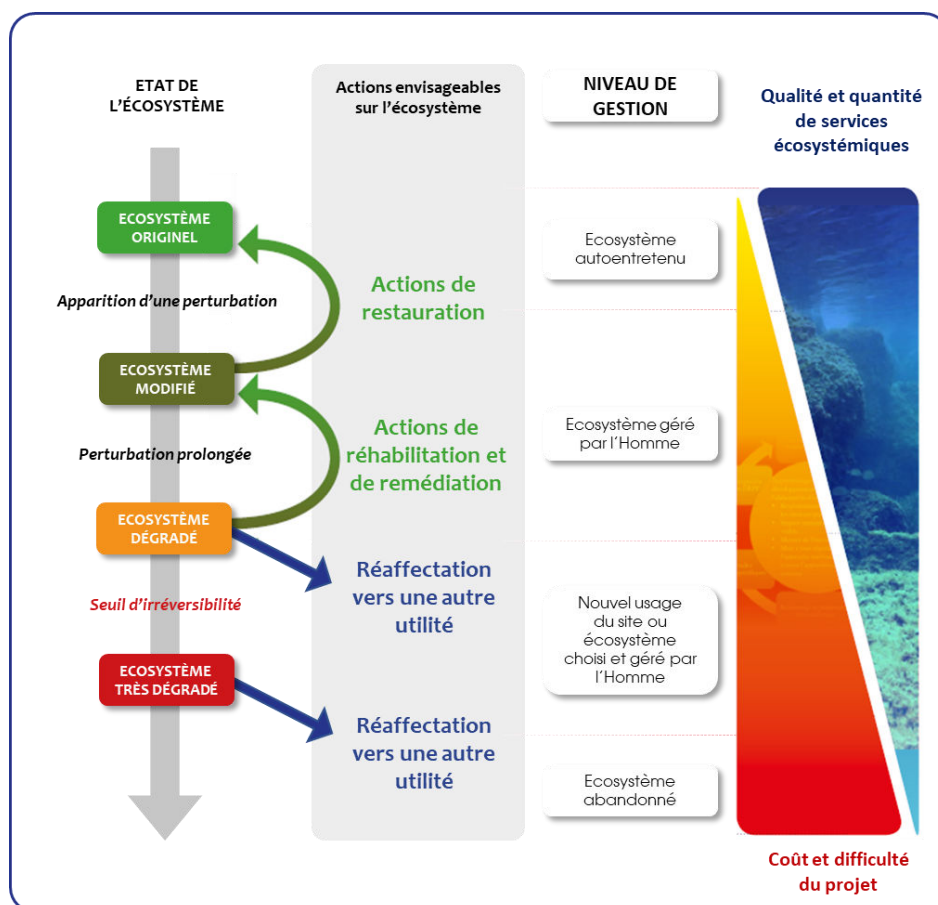


Figure 1 : Les différentes actions possibles de l'Homme, en fonction de l'état de dégradation de l'écosystème (adapté de Lenfant et al. 2015).

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). Bien que ces actions de restauration se multiplient ces dernières années, un grand nombre d'études soulignent le manque de retours d'expérience qui permettraient d'identifier les facteurs conduisant au succès ou à l'échec (voir par exemple Benyamas et al. 2009, Bazin et Barnaud 2002).

L'étape de conception des méthodes de suivi et d'évaluation, capitale pour rendre crédible, valider et valoriser les options mises en œuvre, mérite par ailleurs d'être prise en compte très tôt, lors des réflexions préliminaires à la définition des objectifs. Comparer les systèmes de remplacement aux systèmes de référence pour savoir si les objectifs ont été atteints permet de réajuster, optimiser et pérenniser les résultats. Pour y parvenir, des indicateurs fiables (abiotiques, biotiques, sociologiques, économiques) doivent être mis en œuvre.

Néanmoins, à l'heure actuelle, les indicateurs permettant de vérifier l'atteinte de ces objectifs, 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 abordée⁵. De plus, l'état des sols, au-delà du risque sanitaire d'une contamination, est généralement peu pris en compte alors que le sol, résultante de l'altération d'une roche mère sous-jacente et de la décomposition de la matière organique exogène, est un véritable socle de la biodiversité floristique et des réseaux trophiques supérieurs. De nombreuses études de paramètres physico-chimiques et biologiques se sont intéressées à qualifier les sols et leur potentiel d'application dans le cadre de l'évaluation d'une restauration sera discuté.

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 favorisant par ailleurs une meilleure prise en compte de la biodiversité et le rétablissement du lien entre l'écosystème et l'Homme.

Le cadre conceptuel offert par l'analyse des fonctions et services écosystémiques semble particulièrement adapté pour atteindre ces objectifs. Ce dernier est expliqué dans le détail en section 3.

1.2. Objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude est d'établir un état des lieux des méthodes de mesure permettant de suivre l'incidence des actions de restauration sur les différentes composantes de l'écosystème (biodiversité, fonctions, et SE) et ce, dans le contexte des sites pollués et dégradés.

Les méthodes proposées doivent permettre *in fine* de suivre la restauration des milieux, fonctions et SE au regard des objectifs visés au préalable.

Afin de vérifier la pertinence des méthodes proposées, trois sites d'étude ont été sélectionnés sur lesquels ont été testés les outils identifiés.

Ainsi, ce rapport se structure en quatre sections :

La **première section** vise à clarifier les exigences réglementaires françaises et européennes quant au maintien de la biodiversité lors de la restauration des sites pollués ou dégradés. Cette synthèse est proposée notamment à travers le point de vue du sol (apparentés à la notion de site). Le contexte réglementaire présenté dans cette étude de manière synthétique et opérationnelle permet d'en faciliter son appropriation et son utilisation par les membres de l'association RECORD.

La **deuxième section** constitue la pierre angulaire de cette étude. Après un cadrage méthodologique et conceptuel, un travail de synthèse est proposé afin de faire le lien entre le milieu à restaurer/réhabiliter, les techniques de restauration écologique et les solutions de dépollution et leur incidence potentielle sur les différentes composantes de la biodiversité (espèces, milieux, fonctions et services écosystémiques). Pour chaque type d'actions mises en œuvre, des indicateurs sont proposés afin de suivre leur efficacité dans le temps sur les différentes composantes du système (biodiversité, fonctions, SE).

Ce cadre d'analyse est testé dans la **troisième section** au travers de trois cas d'étude, le site de Villeneuve-sur-Verberie, de Vaires sur Marne et d'Arcelor Mital.

Enfin, la **quatrième section** synthétise les résultats obtenus dans cette étude et propose par ailleurs différentes pistes de recherche ayant pour but de pallier les lacunes identifiées.

⁵ 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).

1.3. Champs d'application de l'étude

Cette étude s'intéresse à tout type de dégradation physique ou chimique d'un écosystème sans tenir compte de l'historique du site en tant que tel (autorisé ou non).

Pour rappel, les dégradations du sol peuvent être de différentes natures (physique, chimique) et comprendre l'érosion, le tassement du sol, l'ajout de contaminants, l'imperméabilisation du sol, etc. On peut parler alors de **sols dégradés** à partir du moment où une ou plusieurs fonctions du sol sont modifiées (en général par l'action de l'homme) et qu'il ne peut plus fonctionner normalement vis à vis par exemples des plantes (en tant que support de biodiversité et de biomasse), des animaux, du cycle de l'eau (transferts, épuration, etc.). Les **pollutions ponctuelles ou diffuses du sol** (Figure 2) sont également des types de dégradation du sol (un sol dégradé n'est pas forcément un sol pollué). Les sols peuvent être pollués par des produits épandus par l'activité agricole, des retombées atmosphériques, et des pollutions ponctuelles souvent d'origine industrielle. Les pollutions reçues par les sols peuvent également se transmettre dans l'ensemble des écosystèmes et la chaîne alimentaire.

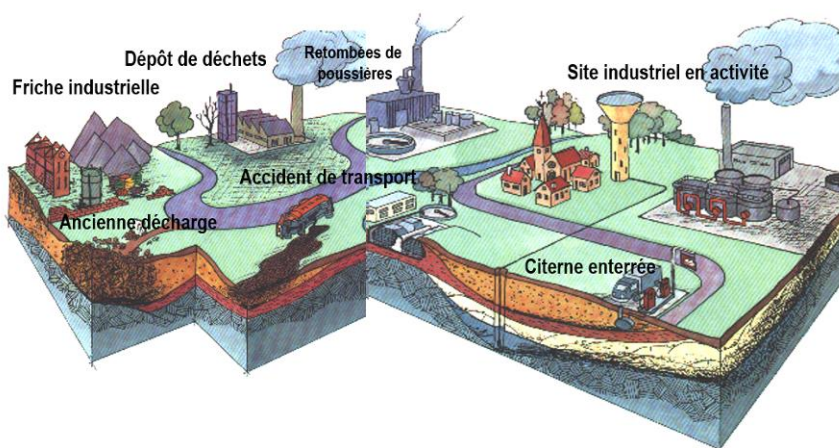


Figure 2 : Différentes sources de pollution des sols et des eaux souterraines (Ministère de l'environnement. 2000).

Les résultats présentés dans ce rapport portent, par ailleurs, spécifiquement sur des actions de restauration de milieux prairiaux humides et non humides.

2- Contexte réglementaire

Cette section fait état des politiques de protection des sols et de protection/restauration de la biodiversité à l'international et en Europe, illustrées par la mise en application réglementaires dans certains pays européens et hors Union Européenne (UE). La section se termine par une revue détaillée des exigences réglementaires françaises sur le maintien de la biodiversité lors de la restauration des sites pollués ou dégradés en France.

2.1 La politique de protection des sols et de protection/restauration de la biodiversité à l'international

Les éléments présentés ci-dessous sont en grande partie issus du site des Nations-Unies (un.org) et du rapport intitulé « Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols », MEEDE (CGDD) et MAAF (CGAAER) publié en 2015.

La politique mondiale des sols est aujourd'hui partielle et insuffisamment affirmée.

Historiquement, la **Charte mondiale des sols** sous l'égide de la FAO (1981) affirme que le sol est une ressource limitée, finie, appelant à une protection spécifique, cependant sans effet contraignant mis en place. De même, l'**Agenda 21 de la Conférence de Rio (1992)**, qui promeut l'utilisation durable des sols et la **Convention des Nations Unis sur la lutte contre la désertification** (1994) qui considère l'érosion des sols causée par le vent et/ou l'eau comme une source de dégradation des terres, n'ont pas produit les effets souhaités. Il a fallu attendre la **Convention sur le Développement Durable de Rio+20 en 2012** pour voir réaffirmée au niveau mondial la volonté de lutter contre la dégradation des sols.

Le **Sommet de Rio 2012** a conduit à l'adoption de 17 objectifs de développement durable (ODD) en 2015 pour les 15 prochaines années (Figure 3). Il n'existe pas d'objectif propre couvrant l'ensemble des fonctions et services des sols, ni l'ensemble de la biodiversité. Cependant, l'**Objectif n°15** (« vie terrestre »), appelle à « protéger, restaurer et promouvoir l'usage durable des écosystèmes terrestres, la gestion durable des forêts, combattre la désertification, faire cesser la dégradation des terres et la perte de biodiversité ». Parmi les neuf cibles de cet objectif 15, cinq portent sur la biodiversité et trois sur les écosystèmes forestiers, aquatiques et montagnard. La cible 15-3 vise plus précisément à combattre la désertification et à restaurer les terres et sols dégradés, notamment ceux affectés par la désertification, les sécheresses et les inondations.



Figure 3 : Les 17 objectifs de développement durable issus du Sommet de RIO 2012 pour éradiquer la pauvreté, protéger la planète et garantir la prospérité pour tous dans le cadre d'un nouvel agenda de développement durable (un.org).

A noter : En 2013, la FAO a lancé le « **Partenariat mondial pour les sols pour la sécurité alimentaire et l'adaptation au changement climatique et l'atténuation de ses effets** ». Ce partenariat consiste à rassembler sur la base du volontariat des états, des synergies entre les diverses initiatives sur les sols et à en développer de nouvelles. Parmi les **domaines d'études** figurent les **services écosystémiques découlant spécifiquement de la santé du sol et des systèmes de production durable**. Cependant ce dispositif reste fragile, faute de financement et les enjeux sont essentiellement sur la santé et l'agriculture (MEEDE, MAAF 2015).

Lors du sommet de Rio en 1992, la **Convention des Nations Unies sur la Diversité Biologique** a également été ratifiée. Elle a trois objectifs : la conservation de la biodiversité, l'utilisation durable des éléments constitutifs de la biodiversité et le partage juste et équitable des avantages découlant de l'exploitation des ressources génétiques. Longtemps, la convention n'a eu qu'une portée contraignante limitée, mais elle commence, depuis la fin des années 1990, à être appliquée concrètement au sein de l'Union Européenne notamment.

2.2 La politique et la réglementation sur la protection des sols et de protection/restauration de la biodiversité en Europe

Les éléments présentés ci-dessous sont principalement issus du rapport intitulé « Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols », MEEDE (CGDD) et MAAF (CGAAER) publié en 2015, du site internet de la commission Européenne (Europa.eu), et des sites internet respectifs de ministères ou institutions compétentes en matière d'environnement pour les pays présentés.

2.2.1 LA POLITIQUE ET LA REGLEMENTATION SUR LA PROTECTION DES SOLS EN EUROPE

Les sols constituent une préoccupation ancienne de l'Union Européenne, mais ils ne sont explicitement considérés en tant que tels que depuis les années 2000. A défaut d'une directive sol qui n'a pu être mise en place ou d'une politique dédiée à l'échelle communautaire, les sols font l'objet d'orientations non contraignantes avec notamment, **l'adoption en 2003 de la charte européenne sur la protection et la gestion durable des sols**, décrivant les dégradations du sol et leurs effets. Cette charte affirme les principes fondamentaux de protection et de gestion durable et recommande qu'une politique de protection des sols soit mise en place par les Etats (MEEDE, MAAF 2015).

A noter : A l'échelle de la communauté européenne, les questions liées au sol ont eu du mal à émerger, en partie en raison de l'absence de compétence claire de l'UE en ce domaine. En effet, l'article 345 du traité fondateur de l'Union Européenne (TFUE) exclut de la compétence de l'UE, le « régime de la propriété » dans les Etats membres, c'est-à-dire l'ensemble des règles concernant le sol en tant que support foncier. En revanche, la pollution des sols, sa prévention et son traitement entrent dans les compétences de l'UE sur le fondement des articles 191 à 193 du TFUE, qui prévoit un « niveau de protection élevé » de l'environnement (art. 191-2), et ces dispositions se sont traduites par des textes de droit dérivé, qui sont toutes des directives (MEEDE, MAAF 2015).

En parallèle, la communication de l'UE « **Vers une stratégie thématique pour la protection des sols** » (COM 2002, 179⁶) propose des mesures destinées à protéger les sols, préserver leur capacité à remplir leurs fonctions écologiques, économiques et sociales. Il s'agissait de « placer la protection des sols au même niveau que l'eau et l'air », deux compartiments ayant fait l'objet

⁶ <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52002AE1015&from=EN>

de directives assez précoces (en 1975 pour l'eau, en 1980 pour l'air). Cette communication a permis la reconnaissance politique de l'enjeu des sols.

Cette stratégie a été le point de départ d'une large consultation des parties intéressées et du public en 2005. Il en est ressorti notamment que la contamination et l'érosion étaient les menaces principales perçues au niveau européen. A l'issue de cette consultation, une communication de la commission a été publiée, intitulée « **Stratégie thématique en faveur de la protection des sols** » (COM 2006, 231⁷). Dans ce document, la commission européenne a déploré que les « connaissances concernant le statut et la qualité des sols restaient fragmentées et que la protection des sols n'était pas assurée de manière efficace et cohérente dans tous les états membres »⁸. A l'issue de cette consultation, un certain nombre d'étapes visant à améliorer la prise en compte des sols à l'échelle Européenne ont été présentées avec notamment la proposition d'une **Directive cadre sur les sols (COM 2006, 232⁹) en 2006**, qui prévoyait des mesures visant à identifier les problèmes, prévenir la dégradation des sols, et remettre en état les sols pollués ou dégradés. Ce projet a été rejeté une première fois en 2007, puis de nouveau en 2010.

A noter :** Le projet de **Directive cadre sur les sols de 2006** liste huit principales menaces qui pèsent sur les sols dans l'Union européenne. Il s'agit de l'érosion, de la diminution des teneurs en matières organiques, de la contamination, de la salinisation, du phénomène de tassement du sol, de l'appauvrissement de la biodiversité des sols, de l'imperméabilisation des sols, des inondations et des glissements de terrain. La réhabilitation des friches industrielles, y est présentée comme un moyen de lutte contre l'imperméabilisation. Pour la partie contamination, une approche systématique d'inventaire des sites est proposée avec caractérisation des sites potentiellement pollués, classification selon les risques et définition des priorités de réhabilitation. **C'est sur ce point en particulier, que les états n'ont pu se mettre d'accord.

Face au blocage de la commission du projet de directive, la Commission a essayé d'insérer des mentions issues de ce projet dans des textes connexes. Les Etats membres constituant la minorité de blocage (Allemagne, Autriche, Grande Bretagne, Pays Bas) ont demandé et obtenu systématiquement le retrait des éléments relatifs aux sols.

Ainsi, s'en est suivie, **la feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources (adoptée en 2009)** qui affiche plusieurs objectifs concernant les sols. D'ici 2020, les politiques de l'UE doivent tenir compte de leur incidence directe ou indirecte sur l'utilisation des sols. Le **7e programme d'Action pour l'Environnement (PAE) 2013-2020** reconnaît que la dégradation des sols est un challenge complexe. Il prévoit ainsi de réfléchir de façon large aux outils pour protéger les sols, en particulier contraignants, sans pour autant qu'ils soient nouveaux. Il a notamment pour objectif de mettre à terme d'ici à 2050 à l'augmentation, nette de la surface de terres occupées conformément à l'objectif « zéro dégradation nette des terres » adopté en 2012 à Rio.

La commission a ainsi lancé le **thème « Land as ressource »** permettant d'ouvrir un agenda politique collectif non contraignant, lors d'une **conférence à Bruxelles en 2014**. Pour nourrir la réflexion, la direction générale Environnement a lancé un exercice de recensement des législations et des initiatives nationales pour mieux utiliser l'existant et identifier les besoins communautaires complémentaires sur la question des sols. L'enquête a surtout porté sur les changements d'usage des sols, la réhabilitation des sites dégradés et la dégradation des sols (MEEDE, MAAF 2015).

⁷ <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0231&from=FR>

⁸ Ce document souligne également les connaissances trop lacunaires en ce qui concerne la diversité biologique des sols.

⁹ <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0231&from=FR>

Si le sol ne fait pas l'objet d'une politique dédiée à l'échelon communautaire, ni même de mesures directes de protection à l'exception de cas très spécifiques, comme la directive Habitat de 1992 qui prévoit la protection d'habitats remarquables liés aux sols (ex : tourbières, pelouses calcaires), de nombreuses dispositions communautaires traitent de la protection, de l'occupation ou de l'affectation des sols, de manière souvent indirecte au travers de textes dont la vocation principale est tout autre (MEEDE, MAAF 2015). En effet, on observe une législation et une réglementation de plus en plus importante de manière indirecte sur les sols, du fait de la stratégie européenne sur leur protection et de l'introduction de préoccupations relatives aux sols dans d'autres textes législatifs et réglementaires européens comme les directives sur la responsabilité environnementale ou les énergies renouvelables, la révision des directives déchets et eau ou la réglementation sur la biodiversité.

Il est important également de souligner de nombreuses initiatives à l'échelle des pays communautaires concernant la protection des sols. La plupart des pays européens ont mis en place différents instruments politiques visant la protection des sols. Cependant seuls certains états sont dotés d'une législation spécifique pour la protection des sols, qui ne couvre le plus souvent qu'une partie des enjeux liés à la gestion des sols (cas des Pays Bas, de l'Allemagne). Par exemple ces lois ne couvrent souvent qu'une seule menace, comme la contamination des sols, et n'offrent pas toujours un cadre cohérent de protection. Aucun pays ne semble avoir développé jusqu'ici des objectifs comprenant la multifonctionnalité des sols, et les actions menées restent sectorielles.

De manière analogue, plusieurs pays hors UE, dont les États-Unis, le Japon, le Canada, l'Australie, le Brésil et certains pays en développement, ont établi des politiques de protection des sols qui comprennent des mesures législatives, des documents d'orientation, des systèmes de surveillance, des mesures d'identification des zones à risque, des inventaires, des programmes d'assainissement et des mécanismes de financement pour les sites contaminés dont il est impossible d'identifier les responsables (sites «orphelins»). Ces politiques assurent un niveau de protection des sols comparable à celui de l'approche préconisée par l'UE dans le cadre de la directive sol proposée en 2006 (voir les exemples présentés en section 2.2.3).

2.2.2 LA POLITIQUE ET LA REGLEMENTATION SUR LA PROTECTION / RESTAURATION DE LA BIODIVERSITE EN EUROPE

En 1979, la **convention internationale relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe (convention de Berne)** vise à promouvoir la coopération entre les États signataires, afin d'assurer la conservation de la flore et de la faune sauvages et de leurs habitats naturels, et protéger les espèces migratrices menacées d'extinction. En effet, au-delà des programmes nationaux de protection, les parties à la convention ont estimé qu'une coopération au niveau européen doit être mise en œuvre. Les parties se sont engagées notamment à mettre en œuvre des politiques nationales de conservation de la flore et de la faune sauvages, et des habitats naturels.

La **directive n°92-43** concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages, dite « **directive Habitats-Faune-Flore** » (directive HFF), a été adoptée en **1992**. Elle marque une étape très importante dans l'histoire de la préservation de la nature, grâce à des dispositifs novateurs et complets pour assurer la préservation de la biodiversité au sein de l'Union Européenne. Afin de pouvoir mesurer les effets des politiques menées par les différents États membres, la directive programme notamment une évaluation périodique de l'état de conservation des habitats naturels et espèces d'intérêt communautaire concernés. Elle prévoit par ailleurs la mise en place, par chaque État membre, d'un dispositif de protection strict pour plus de 400 espèces d'intérêt communautaire (espèces sauvages menacées ou caractéristiques) ainsi que leurs milieux de vie (leurs habitats : alimentation, repos, hibernation). La directive HFF prévoit aussi la création d'un réseau de « zones spéciales de conservation » (ZSC ou Sites d'Importance Communautaire (SIC)), appelé Natura 2000. Outre les espèces, la directive

HFF intègre ainsi, dans les politiques de préservation de la nature, la notion d'habitats naturels en tant que tels c'est-à-dire différents écosystèmes : prairies, tourbières, forêts, dunes littorales, etc.

En plus des « zones spéciales de conservation » (ZSC), le réseau Natura 2000 intègre aussi les « zones de protection spéciale » (ZPS) pour les oiseaux, telles que définies par la directive « Oiseaux » (directive n°79/409 concernant la conservation des oiseaux sauvages), adoptée le 2 avril 1979. Celle-ci prévoit que les États membres mettent en place un régime général de protection de toutes les espèces d'oiseaux et désignent des ZPS pour préserver 194 espèces et leurs habitats, ainsi que les espèces migratrices à venue régulière. Elle fixe une liste de 82 espèces pour lesquelles la chasse est permise sous conditions et une liste de 26 espèces dont la vente, le transport et la détention sont possibles sous conditions. (France Nature Environnement 2017).

La Décision 93/626/CEE de 1993 a confirmé l'engagement des pays de l'UE à mettre en œuvre les dispositions de la Convention sur la Diversité Biologique adoptée à Rio en 1992.

En 2001, la Commission européenne s'est ensuite fixée comme objectif d'enrayer la diminution de la biodiversité dans l'UE à l'horizon 2010. Objectif qu'elle s'est engagée à poursuivre à l'échelle globale en 2002, et dont elle a renforcé la mise en œuvre en 2006 par la création d'un "Plan d'action en faveur de la diversité biologique".

En 2010, la Commission a présenté une nouvelle communication proposant une stratégie à long terme, jusqu'en 2050, mais prévoyant des objectifs à l'horizon 2020. En 2011, la stratégie biodiversité de l'UE à l'horizon 2020 est mise en place pour atteindre ces objectifs, en particulier protéger et améliorer l'état de la biodiversité en Europe durant la prochaine décennie. Cette stratégie fait partie intégrante de la stratégie Europe 2020, et notamment de l'initiative phare intitulée « Une Europe efficace dans l'utilisation des ressources ». La stratégie répond à deux engagements majeurs pris par les responsables de l'UE en mars 2010, à savoir enrayer la perte de biodiversité dans l'UE d'ici à 2020 et protéger, évaluer et rétablir la biodiversité et les services écosystémiques dans l'UE d'ici à 2050.

Cette stratégie définit six objectifs qui couvrent les principaux facteurs de perte de biodiversité et qui permettront de diminuer les pressions les plus fortes qui s'exercent sur la nature :

- **Objectif 1** : conserver et régénérer la nature ;
- **Objectif 2** : préserver et améliorer les écosystèmes et leurs services ;
- **Objectif 3** : assurer la durabilité de l'agriculture et de la foresterie ;
- **Objectif 4** : garantir une utilisation durable des ressources de pêche ;
- **Objectif 5** : lutter contre les espèces allogènes envahissantes ;
- **Objectif 6** : **gérer la crise de la biodiversité au niveau mondial.**

*A noter : Le parlement européen a adopté en 2016, la **résolution sur l'examen à mi-parcours de la stratégie de l'Union européenne en faveur de la biodiversité**. Le rapport d'examen souligne la nécessité de redoubler d'efforts pour enrayer la perte de biodiversité à l'horizon 2020. Il souligne également que le respect de l'objectif principal - la perte de biodiversité à l'horizon 2020 par rapport à un niveau de référence de 2010 — demandera une mise en œuvre et des efforts d'application largement plus audacieux, en particulier concernant la législation en matière de préservation de la nature. Il nécessitera en outre une intégration efficace de la biodiversité dans toute une série d'autres politiques ainsi que des priorités cohérentes, étayées par un financement adéquat, dans des domaines tels que les zones marines, la pêche, le développement régional, le commerce régional et, avant tout, dans l'ensemble des secteurs de l'agriculture et de la sylviculture, qui représentent 80 % de l'affectation des sols dans l'UE (<http://ec.europa.eu/>).*

2.2.3 ZOOM SUR QUELQUES PAYS EUROPEENS ET NON EUROPEENS : PAYS-BAS, ALLEMAGNE, ANGLETERRE ET LES ETATS-UNIS

Le contexte réglementaire présenté ci-dessous repose uniquement sur des recherches bibliographiques. Seules des informations sur la réglementation en cours ou des revues de ces réglementations ont pu être facilement obtenues pour l'Angleterre, les Pays-Bas et l'Allemagne.

Dans le cadre de cette revue, aucune information explicite faisant référence à la prise en compte des services écosystémiques dans les textes de loi, les réglementations ou les méthodologies nationales « sites et sols pollués » (SSP) n'a pu être trouvée pour ces trois pays. Cependant, il est clair que leurs instituts de recherche sont très impliqués sur la prise en compte des services écosystémiques (évaluation, cartographie, etc). Au Pays-Bas, par exemple, les priorités de recherche sont clairement affichées aujourd'hui sur le sol et les services écosystémiques.

Des recherches ont également été réalisées sur le contexte réglementaire des Etats Unis. Ainsi, à l'inverse, les Etats-Unis ont clairement identifié le rôle des services écosystémiques dans le cadre de la gestion de leurs sites pollués, et ceci est bien mis en évidence dans leur méthodologie nationale.

Les Pays-Bas

Les Pays-Bas disposent de nombreuses lois et réglementations environnementale, et ce dans différents ministères. Les deux plus importantes sur les sols sont le « **Soil Protection Act** » (2013) et le « **Environmental Protection Act** ». Le premier concerne la prévention de la contamination des sols. Le deuxième concerne les permis environnementaux, statuant sur les mesures de prévention à prendre en compte par des exploitants. Ces deux lois imposent un « duty of care¹⁰ » rendant obligatoire, en cas de dégradation, la restauration de la qualité du sol par rapport à un état initial.

La législation qui concerne la gestion des sols pollués et qui garantit une gestion du sol durable s'appuie sur le « [Soil Quality Decree](#) » 2007, et le « Soil Quality Regulation ». Le « [Soil Remediation Circular 2013](#) » vient en complément. Cette circulaire¹¹ propose des recommandations sur l'utilisation de critères de remédiation et la détermination d'objectifs de remédiation dans le cas de pollution des sols.

Il existe par ailleurs de nombreux guides méthodologiques émanant du gouvernement et visant la protection des sols en milieu industriel, notamment pour l'évaluation du risque vis-à-vis du sol et la sélection de mesures de gestion (dépollution) les plus appropriées (Netherlands Soil Protection guideline for industrial activities¹²). Il semble que les Pays-Bas optent pour une approche d'évaluation de la vulnérabilité des sols vis à vis d'une activité industrielle. Leur approche de gestion des sites pollués a recours à des standards de qualité du sol, en opposition à une approche risque comme aux Etats-Unis, ou en France. Une approche des risques selon un usage actuel ou futur, et différenciant le risque sanitaire du risque environnemental, n'est pas évoqué dans les documents consultés.

Le gouvernement central dit aujourd'hui avoir évolué dans sa politique des sols, favorisant maintenant une approche globale en politique environnementale et d'aménagement, donnant plus de pouvoir aux unités décentralisées. En plus, de la prévention de la pollution des sols et sa gestion, la politique du sol est maintenant tournée sur d'autres formes de dégradation telles que

¹⁰ Devoir de protection / de diligence.

¹¹ Source : Rijkswaterstaat Environment. <https://rwsenvironment.eu/subjects/soil/legislation-and/>

¹² <https://rwsenvironment.eu/subjects/soil/legislation-and/soil-protection/>

l'érosion, la sécheresse et le déclin de la biodiversité. Notamment, le sol est considéré comme un écosystème dynamique incluant donc ses composantes chimiques, physiques et biologiques¹³.

A noter : En plus d'une législation globale sur les sols (incluant la gestion des pollutions), ce pays a mis en place une structure intégrative **dédiée à la thématique des sites pollués**, comprenant des sites de démonstration coordonnés, un programme de recherche unique, une diffusion des résultats aux opérateurs, avec des formations et l'organisation d'événements internationaux. L'administration nationale tient un **registre des sites pollués**, alimenté par les déclarations obligatoires venant des propriétaires, ce qui permet notamment d'avoir une connaissance exacte du marché intérieur.

L'Allemagne

Il n'existe pas de stratégie fédérale allemande pour les sols, dans la mesure où cette compétence relève des Landers. Mais, dès **2002, une stratégie nationale relative au développement durable** a tenté de réduire à 30 hectares la surface des sols agricoles utilisée chaque jour pour l'urbanisation, au lieu des 130 ha observés sur la période 1997 - 2000. Cet objectif chiffré a constitué un signal politique qui est venu confirmer la **loi sur la protection des sols adoptée en 1999**. De plus, la législation sur la construction a imposé un développement de l'urbanisation dans les zones déjà construites et les friches. L'Allemagne s'est également dotée **d'instruments économiques** sous la forme de subventions accordées pour favoriser la mise en place de mesures destinées à prévenir la dégradation des sols. Elle dispose enfin **d'instruments incitatifs** visant à protéger les sols, en proposant des lignes directrices non contraignantes juridiquement. Celles-ci encouragent, par exemple, la caractérisation des sols sur la base de cinq fonctions afin d'identifier les sols de haute qualité et ainsi en tenir compte dans les documents de planification (MEEDE, MAAF 2015).

En Allemagne, la gestion des sites pollués est légalement requise par le « **Federal Soil Conservation Act (1998)** » et le « **Federal Soil Conservation and Contaminated Site Ordinance (1999)** ». La notion associée aux fonctions des sols est mentionnée dès le 1^{er} article de l'acte de 1998 dont « *l'objectif est de protéger et restaurer les fonctions du sol sur une base durable* » (Figure 4).

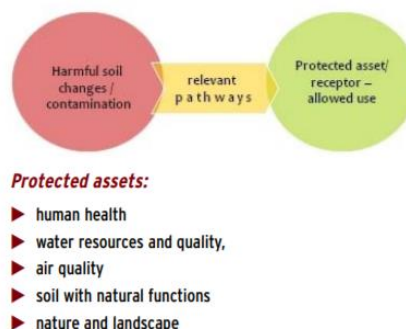


Figure 4 : Objectifs de restauration des sols dégradés et biens et services protégés par ce biais (Frauenstein 2009).

En termes de méthodologie nationale de gestion des sites pollués, une approche basée sur le risque est proposée prenant en compte les enjeux sanitaires et environnementaux séparément. L'approche paraît similaire à celle des Etats-Unis, de l'Angleterre ou de la France (processus par étape avec réduction progressive des incertitudes). Cependant, le recours à des seuils de

¹³ <https://rwsenvironment.eu/subjects/soil/policies-and/>.

déclenchement, déterminant le besoin d'aller vers des investigations supplémentaires ou non, est proposé pour aider dans l'évaluation de suspicion concrète ou pas de pollution sur un site. Cette approche permet aux autorités compétentes de gérer notamment le nombre très important de sites suspectés de contamination (EUGRIS¹⁴).

***A noter :** Concernant la gestion des sites pollués, ce pays a lui aussi mis en place un système intégré pour prévenir et gérer les pollutions. De grands programmes stratégiques ou des initiatives thématiques, portant sur le traitement des sites contaminés, ont été initiés et subventionnés par le ministère fédéral de l'éducation et de la recherche (BMBF).*

L'Angleterre

En Angleterre, il n'existe pas de législation spécifique pour la protection des sols. Ils ont en revanche mis en place un certain nombre de législations permettant de protéger indirectement le sol et des instruments incitatifs pour encourager la prise en compte des enjeux liés aux sols.

Cependant, une **stratégie pour la sauvegarde des sols a été adoptée en 2009**, largement inspirée de la **COM 2006, 231**, dont la mise en œuvre a été confiée au ministère de l'environnement. Elle fixe comme objectif que, d'ici 2030, tous les sols soient gérés de manière durable en mettant fin aux menaces de dégradation (DEFRA 2009). Elle inclut un focus sur la protection des fonctions du sol face à l'urbanisation, des actions permettant le renforcement de leur inventaire sur les sols et un code d'utilisation des sols et de leurs fonctions pour une meilleure prise en compte dans les documents de planification

Concernant la législation en vigueur sur la gestion des sites pollués, une série de législations domestiques, en grande partie issue des transpositions de directives européennes, sont appliquées. Elles incluent notamment les législations suivantes : « **Planning and development control** », « **Environmental permitting** », « **Environmental damage** », « **Part 2A** », et « **Anti-pollution works notices** ». Concernant la méthodologie nationale de gestion des sites pollués, l'approche de gestion de la contamination est basée sur l'évaluation du risque. Elle propose donc la prise en compte des enjeux sanitaires et environnementaux séparément.

Des guides méthodologiques spécifiques sont proposés pour l'évaluation des risques vis à vis de la santé humaine (human health risk assessment guidance) et vis-à-vis des récepteurs/cibles écologiques (ecological risk assessment guidance¹⁵). Les guides nationaux principaux incluent, par ailleurs, les ouvrages suivants : Model Procedures for the Management of Land Contamination (CLR11), 2011, Land Contamination : A Guide for Developers, 2006, et Guidance for the Safe Development of Housing on Land Affected by Contamination (révisé en 2008).

Pour les sites contaminés qui ne peuvent être gérés par la réglementation en place dans le cadre du réaménagement du territoire, le régime dit « Part 2A » propose un mécanisme parallèle¹⁶. Ce régime, contrairement aux sites plus classiques à gérer, est soutenu par des méthodologies de gestion contraignante (statutory guidance) concernant les investigations, la remédiation et l'évaluation de la responsabilité.

***A noter :** Le marché britannique de la dépollution était un marché particulièrement florissant, dopé par les mesures législatives transposant les directives européennes sur les déchets, par les*

14

http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?Ca=1&Cy=10&DocID=E&DocTitle=Management_administration&T=Germany&e=274

15 GPLC2 – FAQs, technical information, detailed advice and references. 2010. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/297454/geho1109brgz-e-e.pdf

16 Part 2A of the Environmental Protection Act 1990 : C'est d'une certaine manière équivalent aux sites dits orphelins gérés par l'ADEME en France.

taxes incitatives (taxes sur les décharges) et par l'objectif du Gouvernement de construire 60 % de l'habitat neuf sur d'anciens sites pollués. Ce marché du redéveloppement sur des friches industrielles polluées s'est effondré du fait de la crise économique : tout reposait sur le marché foncier, la propriété des sites reposant sur un bail emphytéotique avec l'Etat avec obligation de remettre en état avant de rendre le site à l'Etat (sur les sites urbains, les questions d'environnement étaient prises en charge par le public et la valorisation du foncier par le privé, ADEME, 2011).

Les Etats-Unis

Jusqu'aux années 1920, l'abondance des ressources naturelles et l'immensité de leur pays ont encouragé les Américains à une gestion d'autant plus laxiste de leurs ressources renouvelables et non renouvelables que la main-d'œuvre était la véritable ressource rare. Les années 1960 et 1970 ont vu une prise de conscience des problèmes écologiques, avec la création notamment de l'**United States Environmental Protection Agency (EPA ou U.S. EPA)** en 1970, agence du gouvernement fédéral des Etats Unis pour la protection de la santé humaine et de l'environnement. Avec le **Wilderness Act de 1964**, des zones naturelles du territoire sont classées en aires protégées, notamment des forêts fédérales qui n'étaient auparavant protégées que par décret. Puis différents textes suivent pour améliorer la gestion des terres fédérales : le **Forest and Rangeland Renewable Resource Planning Act de 1974** et le **Federal Land Policy and Management Act de 1976**).

Mais l'action fédérale en matière de protection de l'environnement ne se limite pas à la gestion du domaine public. Après **la première loi sur la qualité de l'air (1963)**, les États-Unis adoptent une série de **lois pour la protection de l'environnement**, qui se préoccupent de santé publique (lois sur l'air, l'eau, les pesticides), de définir des aires protégées ou de préserver le patrimoine naturel, la flore ou la faune sauvage. Par exemple, le « **National Environmental Policy Act ou NEPA** » de 1969 contraint les organismes fédéraux à préserver les écosystèmes lors de la construction de bâtiments ou d'infrastructures nationales. La **loi sur les espèces en danger (Endangered Species Act ou ESA)** adoptée en 1973, est considérée comme un des outils législatifs les plus puissants afin de protéger les animaux menacés d'extinction, mais aussi les écosystèmes fragilisés par les activités humaines. En **1972, est également adoptée une loi sur la protection des zones côtières** puis, en 1977, **une loi sur l'exploitation minière** allant dans le sens d'une prise en compte des besoins de restauration de l'environnement. Au fil des années, certaines lois sont révisées (**Clean Air Act, 1990**). Malgré ces nombreux textes, **aucune avancée majeure n'a été enregistrée depuis 1980**, et les compagnies forestières et minières ou encore les industries polluantes semblent avoir souvent bénéficié d'une certaine compréhension de la part des autorités fédérales. L'absence d'engagement de l'autorité fédérale s'est trouvée plus ou moins compensée localement par l'action des États en faveur de l'environnement. La protection de l'environnement est aujourd'hui très décentralisée aux États-Unis, ce qui signifie que les situations locales sont de plus en plus contrastées (Zanietti 2008).

A noter : *Depuis 1993, les organismes fédéraux participant au groupe d'étude interinstitutionnel sur la gestion des écosystèmes sont convenus d'adopter une approche écosystémique qu'ils ont définie comme visant à restaurer et préserver la santé, la durabilité et la diversité des écosystèmes, tout en soutenant les collectivités et leur tissu économique. Par exemple, dans le cas des zones humides, les organismes fédéraux ont entrepris de gérer leurs programmes de façon à inverser la tendance nationale à la disparition des zones humides*

Concernant, le domaine de la reconversion des sites pollués, les Etats Unis font figure de précurseurs, au début des années 80, en matière de gestion de la pollution (approche par le risque). **La législation impose en effet qu'un projet de réhabilitation optimal soit mis au point, par comparaison à des alternatives, selon un ensemble de critères environnementaux, techniques et économique.**

Aux Etats-Unis, le programme de financement « Superfund » lancé dès 1980 est un important programme de réhabilitation des sites orphelins pollués par des déchets industriels dangereux. Superfund est le nom d'usage du « Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA) ». **La loi a autorisé l'U.S EPA à identifier les parties responsables de la contamination des sites et à les contraindre à nettoyer les sites. Lorsque les parties responsables ne peuvent être trouvées, l'agence est autorisée à nettoyer les sites elle-même en utilisant un fond spécial.**

Les budgets conséquents du programme de financement Superfund ont permis des démonstrations sur des sites réels en régime dérogatoire (sites militaires etc.) et le test de techniques innovantes de dépollution *in situ* et de métrologie. Les résultats de ces expérimentations sont largement diffusés. **Toutefois, au fil des ans, du fait de l'impact de la crise financière et d'une loi postérieure à la création du Superfund (mettant fin à la taxe sur les entreprises polluantes qui abondait principalement le fond) s'ajoutant aux lourdeurs administratives et à la complexité du système judiciaire américain, l'efficacité du dispositif a été profondément mise à mal (ADEME 2011).**

Depuis de nombreuses années, le US EPA, s'est intéressé à travers des programmes de recherche à la prise en compte des services écosystémiques lors de la réhabilitation de pollutions. En plus de la gestion des risques pour la santé humaine ou l'environnement, la prise en compte de l'intérêt du public et des acteurs vis-à-vis de la réhabilitation, concernant par exemple la protection d'habitats existants, ou la création d'habitat, est forte à l'US EPA. Cependant, ils constatent que les considérations d'ordre écologique lors de la réhabilitation de sites pollués varient en fonction de la réglementation, des acteurs et de l'intérêt porté par les communautés locales. Ils encouragent donc, les « Greener clean ups », c'est-à-dire le fait que la gestion de sites pollués prenne également en compte les effets des opérations en elles-mêmes sur les services écosystémiques (effets tels que la perte d'habitat, la compaction du sol, le changement de la topographie, etc.) (Figure 5). Il est à noter que de nombreux guides sont proposés pour des remédiations plus écologiques. Un standard a même été publié en 2016 : ASTM standard guide for greener clean up (ASTM E2893).

	Example Greener Cleanup BMPs	Example Ecosystem Services		
		Habitat	Erosion Control	Recreation
Site Assessment Phase	Consider and document property characteristics such as habitat connectivity, topography and site access.	✓	✓	✓
	Design works zones, traffic plans and construction phases to avoid habitat disruption.	✓	✓	✓
	Retain existing habitat and vegetation, especially habitats with high ES value and large trees.	✓	✓	✓
Remedial Phase	Eradicate invasive plant species on site and use control measures to prevent invasion of non-native plants.	✓		
	Place mulch and metal grates over traffic corridor surfaces.		✓	
	Construct long-term ecological structural controls such as bio-swales and vegetated riprap.	✓	✓	
	Plant regionally native vegetation and pollinator habitats on bare soil and caps.	✓	✓	✓

Figure 5 : Exemples de remédiation dites « Greener Cleanup » et liens avec des services selon l'US EPA (EPA, 2017).

D'après EPA (2017), l'évaluation des services écosystémiques peut être, par exemple, incorporée dans les évaluations du risque écologique (Ecosystem Services Ecological Risk Assessment Endpoints Guidelines - EPA/100/F15/005 2006) pour informer sur les décisions en termes de remédiation. De même, ils citent le recours à l'évaluation de l'empreinte environnementale. La figure 6 illustre leur conception des connexions entre les services écosystémiques dans l'ERA et les approches pour restaurer le fonctionnement d'un écosystème

(concept de « ecological reuse ») On peut trouver en annexe du document EPA (2017), une liste d'outil d'évaluations des services écosystémiques, applicable potentiellement en sites pollués.

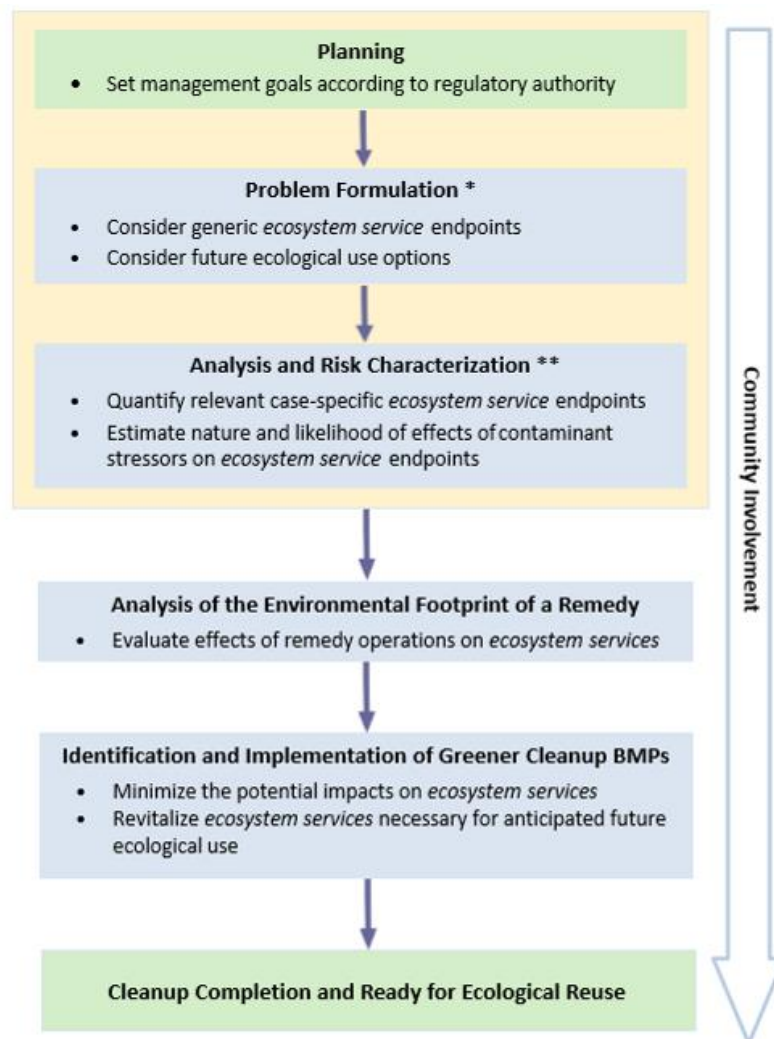


Figure 6 : Schéma conceptuel pour prendre en compte le services écosystémiques lors de la réhabilitation de sites pollués selon l'US EPA (EPA, 2017) (* : see valuing protection of Ecological Systems Services – US EPA 2009, ** : Generic ecological assessment Endpoints (GEASs) for Ecological Risk Assessment : Second edition with generic Ecosystem services Endpoints how to consider ES in an ERA and demonstrates the utility of incorporating service endpoints (EPA/100/F15/005. 2016 2016).

2.3. Exigences réglementaires concernant la « restauration » de la biodiversité et la réhabilitation des sites et sols pollués ou dégradés en France

2.3.1 EXIGENCES REGLEMENTAIRES CONCERNANT LA « RESTAURATION » DE LA BIODIVERSITE EN FRANCE

La richesse du patrimoine naturel français et les menaces qui pèsent sur son devenir confèrent à la France une responsabilité particulière en matière de biodiversité. Au début des années 1960, l'intérêt écologique de la protection des espèces sauvages et de leurs milieux de vie, ou habitats, a été reconnu explicitement dans les textes législatifs, avec la **loi sur les parcs nationaux et la création de la première réserve naturelle en 1961**. La création du **ministère de l'environnement en 1971** et le vote de la **loi sur la protection de la nature de 1976** permettent à la France de se doter progressivement d'une politique cohérente de sauvegarde de ce qui est maintenant nommé la biodiversité. Depuis, plusieurs lois ont permis de renforcer la préservation de la biodiversité en France (**loi paysage de 1993, loi relative aux parcs nationaux, aux parcs naturels marins et aux parcs naturels régionaux de 2006, loi Grenelle I de 2007 relatives aux trames verte et bleues**).

La **loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, promulguée en août 2016** inscrit dans le droit français une vision dynamique et renouvelée de la biodiversité. Elle dote ainsi la France de principes renforcés, d'outils nouveaux et de nouvelles mesures pour répondre aux enjeux d'érosion de la biodiversité et de dérèglement climatique. Celle-ci concerne tous les milieux, terrestres, aquatiques et marins et aboutit à la création de l'[Agence française pour la biodiversité](#), un interlocuteur privilégié pour accompagner les acteurs de la biodiversité et de l'aménagement du territoire.

En France, on entend par **biodiversité**, ou diversité biologique, la variabilité des organismes vivants de toute origine, y compris les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques, ainsi que les complexes écologiques dont ils font partie. Elle comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces, la diversité des écosystèmes ainsi que les interactions entre les organismes vivants. (Article L. 110-1 du Code de l'environnement).

Cette loi résulte également en **une définition réglementaire du terme « biodiversité »** dans le Code de l'environnement.

Ainsi, depuis 2016, le code de l'environnement précise que la **biodiversité** fait partie du patrimoine commun de la nation, dont la **protection, la mise en valeur, la restauration, la remise en état et la gestion** sont **d'intérêt général** et concourent à l'objectif de développement durable. La notion de **services écosystémiques** et des valeurs d'usage¹⁷ associées à ce patrimoine est également introduite (*Article L. 110-1*). Un des objectifs de développement durable, introduit par le code de l'environnement à l'article L110-1 concerne l'engagement en matière de **préservation de la biodiversité, des milieux, des ressources ainsi que la sauvegarde des services qu'ils fournissent et des usages qui s'y rattachent**.

En France, le patrimoine commun de la nation comprend les « espaces, ressources et milieux naturels terrestres et marins, les sites, les paysages diurnes et nocturnes, la qualité de l'air, les êtres vivants et la biodiversité ». Les processus biologiques, les sols et la géo diversité concourent à la constitution de ce patrimoine. (Article L. 110-1 du Code de l'environnement).

¹⁷ Les valeurs d'usage sont les valeurs des bénéfices concrets apportés par l'utilisation effective, envisagée ou possible d'un bien.

Les 9 principes suivants doivent s'appliquer afin d'assurer les exigences citées sur ce patrimoine « *environnement* » :

1° **Le principe de précaution**, selon lequel l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à *l'environnement* à un coût économiquement acceptable ;

2° **Le principe d'action préventive et de correction**, par priorité à la source, des atteintes à *l'environnement*, en utilisant les meilleures techniques disponibles à un coût économiquement acceptable. Ce principe implique d'éviter les atteintes à la *biodiversité et aux services qu'elle fournit* ; à défaut, d'en réduire la portée ; enfin, en dernier lieu, de compenser les atteintes qui n'ont pu être évitées ni réduites, en tenant compte des espèces, des habitats naturels et des fonctions écologiques affectées ; Ce principe doit viser un objectif d'absence de perte nette de biodiversité, voire tendre vers un gain de biodiversité ;

3° **Le principe pollueur-payeur**, selon lequel les frais résultant des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur ;

4° **Le principe** selon lequel toute personne a le **droit d'accéder aux informations** relatives à *l'environnement* détenues par les autorités publiques ;

5° **Le principe de participation** en vertu duquel toute personne est informée des projets de décisions publiques ayant une incidence sur *l'environnement* dans des conditions lui permettant de formuler ses observations, qui sont prises en considération par l'autorité compétente ;

6° **Le principe de solidarité écologique**, qui appelle à prendre en compte, dans toute prise de décision publique ayant une incidence notable sur l'environnement des territoires concernés, les interactions des écosystèmes, des êtres vivants et des milieux naturels ou aménagés ;

7° **Le principe de l'utilisation durable**, selon lequel la pratique des usages peut être un instrument qui contribue à la biodiversité ;

8° **Le principe de complémentarité entre l'environnement, l'agriculture, l'aquaculture et la gestion durable des forêts**, selon lequel les surfaces agricoles, aquacoles et forestières sont porteuses d'une biodiversité spécifique et variée et les activités agricoles, aquacoles et forestières peuvent être vecteurs d'interactions écosystémiques garantissant, d'une part, la préservation des continuités écologiques et, d'autre part, des services environnementaux qui utilisent les fonctions écologiques d'un écosystème pour restaurer, maintenir ou créer de la biodiversité ;

9° **Le principe de non-régression**, selon lequel la protection de l'environnement, assurée par les dispositions législatives et réglementaires relatives à l'environnement, ne peut faire l'objet que d'une amélioration constante, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment.

A noter : *Vis-à-vis des enjeux associés à la biodiversité, le terme « restauration » est employé par le code de l'environnement, mais cependant sans définition réglementaire. Le terme « réhabilitation » n'est pas utilisé.*

La France a également marqué sa volonté de faire entrer la biodiversité dans le champ de toutes les politiques publiques en adoptant une stratégie nationale pour la biodiversité (SNB 2004-2010), fixant un cadre pour la mise en œuvre en France des recommandations de la convention pour la diversité biologique de 1992 (CBD). Après cette première phase basée sur des plans d'actions sectoriels, la SNB 2011-2020 vise maintenant un engagement plus important des acteurs dans tous les secteurs d'activité, à toutes les échelles territoriales, en métropole et outre-mer.

Zoom sur l'historique du code de l'environnement :

- Au départ le droit de l'environnement a été conçu de manière négative et ce sont **des mesures de protection** et de sauvegarde *stricto sensu* qui ont été élaborées : réglementation des activités,

mesures de police (ex. installations classées) ;

- Par la suite, le droit de l'environnement s'est traduit par des attitudes plus positives consistant en **des mesures de gestion** des milieux et des espèces ou d'aménagement des espaces : l'eau, l'air et les déchets ;
- Enfin, on a créé **des mesures de prévention** en appliquant le principe selon lequel il fallait réagir avant que ne surviennent les atteintes aux milieux, en s'en prenant aux risques : c'est la création du droit concernant les pollutions et des nuisances.

2.3.2 POLITIQUE NATIONALE ET EXIGENCES REGLEMENTAIRES SUR LA REHABILITATION DES SITES ET SOLS POLLUES OU DEGRADES EN FRANCE

La loi 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages a pour ambition de mieux concilier activités humaines et biodiversité notamment à travers la prise en compte des services écosystémiques. Néanmoins, malgré les avancées notables dans le domaine de la préservation de l'environnement, un compartiment n'est pas encore pris en compte : le sol.

En effet, malgré les avancées notables dans le domaine de la préservation de l'environnement, il n'y a pas **de politique nationale globale des sols en France** alors que des politiques nationales existent en effet pour d'autres milieux comme l'eau (ex. loi de 2004 transposant la directive Cadre sur l'Eau) ou les milieux marins (ex. transpositions dans le code de l'environnement de la directive cadre Stratégie pour le milieu marin).

Le CGEDD¹ et le CGAAER¹, ont fait des propositions pour un cadre national de gestion durable des sols (MEEDE, MAAF 2015), notamment suite à l'abandon de projet de directive cadre sur les sols. Cependant. Cependant, la **gestion des sols en France est toujours abordée de manière sectorielle** : les sites et sols pollués, prévention des risques naturelles, urbanisme, politique agricole et forestière etc.

Il n'existe pas de définition réglementaire du « sol ». Le **sol** est un milieu constitué de l'association de particules minérales, de matières organiques, d'eau, d'air et d'organismes vivants, en interface avec la lithosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère.

Il est important de noter que les services rendus par les écosystèmes reposent sur le sol, lieu d'échange de matière et d'énergie. En effet le sol est en constante interaction avec les autres compartiments de l'environnement (eau, air, roches, organismes vivant). Grâce à ses nombreuses fonctions, le sol joue un rôle majeur dans la fourniture de services par les écosystèmes : production alimentaire, production de biomasse, stockage, filtration et transformation de nombreuses substances telles que l'eau, le carbone l'azote, etc. Au même titre que l'eau et l'air, sa qualité et ses caractéristiques sont susceptibles d'avoir un impact sur l'homme et l'environnement. (MEDDE, MAAF, 2015).

Le code de l'environnement identifie depuis 2016, les sols comme contribuant directement au patrimoine commun de la nation. **L'état du sol, et donc sa capacité à assurer ses fonctions et à rendre des services, peut être dégradé** relativement rapidement alors que ses processus de formation ou de régénération sont beaucoup plus lents.

Le code de l'environnement identifie depuis 2016, les sols comme contribuant directement au patrimoine commun de la nation. **L'état du sol, et donc sa capacité à assurer ses fonctions et à rendre des services, peut être dégradé** relativement rapidement alors que ses processus de formation ou de régénération sont beaucoup plus lents.

En 2014, tant la loi pour l'accès au logement et l'urbanisme rénové (ALUR) que la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt (LAAF) ont mis l'accent sur la nécessité de lutter contre l'artificialisation¹⁸ des sols en préservant les espaces naturels, agricoles et forestiers ; l'artificialisation étant mise en avant comme principale menace affectant les fonctions des sols et services rendus. Ces deux lois ont par là même souligné la nécessité de repenser la construction des villes sur elles-mêmes,

encourageant la reconquête des espaces délaissés, souvent dégradés telles que les friches.

De nombreux sites urbains ayant accueilli par le passé des activités industrielles se retrouvent en effet à l'état de friches polluées. La reconquête de ce foncier contraint est un enjeu majeur de la recomposition des fonctionnalités et des paysages urbains. Les projets d'aménagement représentent environ 70% du marché de la dépollution (études et travaux) et concernent principalement des sites en zone urbaine (MTES 2017 a, MTES 2017 b).

A noter : *Les milieux dégradés présentent généralement une biodiversité fortement perturbée voire absente. La restauration de cette biodiversité lors d'opérations de restauration sous-tend la récupération des services écosystémiques. S'assurer qu'elle soit prise en compte lors de ces opérations nécessite un cadre réglementaire et des méthodes pour aider les gestionnaires.*

La législation française insiste sur l'importance de la prise en compte de la biodiversité et des services qu'elle fournit dans l'application du principe d'action préventive et de correction, visant un objectif d'absence de perte nette de biodiversité, voire un gain de biodiversité.

Les sites et sols pollués au sens large ne font pas l'objet d'un cadre juridique spécifique ou unique, comme le sont les installations classées mais s'appuient principalement sur la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et notamment sur le Livre V - Prévention des pollutions, des risques et des nuisances du code de l'environnement, ou sur la réglementation relative aux déchets suivant les cas.

La réglementation ICPE s'applique pour les terrains pollués (ou non) qui ont été occupés par une exploitation ICPE. Elle permet de mettre en place des programmes de surveillance de l'impact potentiel de l'exploitation sur l'environnement mais aussi d'établir le responsable des travaux de réhabilitations après l'arrêt d'une exploitation. En effet, toute exploitation industrielle ou agricole susceptible de créer des risques ou de provoquer des pollutions ou nuisances, notamment pour la sécurité et la santé des riverains, mais aussi pour la protection de la nature, de l'environnement et des paysages a le statut d'installation classée. Les activités relevant de la législation des installations classées sont énumérées dans une nomenclature qui les soumet à un régime d'autorisation, de déclaration ou d'enregistrement en fonction de l'importance des risques ou des inconvénients qui peuvent être engendrés.

Jusqu'à l'arrivée de la loi ALUR, les sites pollués sur lesquels aucune ICPE n'a jamais été exploitée connaissait un vide réglementaire. Le seul fondement envisageable pour trouver un responsable était principalement la « réglementation déchets », Cependant depuis la loi ALUR, plusieurs nouveautés ont concerné les sites et sols pollués : le nouveau chapitre sur les sites et sols pollués, les Secteurs d'Informations sur les Sols, et le dispositif du tiers demandeur.

¹⁸ D'après le ministère de l'Agriculture, les sols artificialisés comprennent les sols bâtis et les sols revêtus et stabilisés (routes, voies ferrées, parkings, chemins etc.), mais également les chantiers, les terrains vagues et les espaces verts artificiels. L'artificialisation correspond à un changement d'utilisation, laquelle n'est pas nécessairement irréversible (<http://www.gouvernement.fr/indicateur-artificialisation-sols>).

L'article 173 de la loi ALUR prévoit en effet que l'État élabore des Secteurs d'Information sur les Sols (SIS) répertoriant les "terrains où la connaissance de la pollution des sols justifie, notamment en cas de changement d'usage, la réalisation d'études de sols et de mesures de gestion de la pollution". La loi ALUR a également prévu un dispositif permettant de faciliter la réhabilitation des friches industrielles en vue de densifier le bâti en zone urbaine. Ce dispositif consiste à confier à un tiers qui en fait la demande les travaux de réhabilitation d'un site ayant accueilli une installation classée (ICPE) en se substituant au dernier exploitant s'il est d'accord. Ces éléments ont permis de combler en partie le vide réglementaire concernant les sites pollués sur lesquels aucune ICPE n'a jamais été exploitée.

En matière de sites et sols pollués, les démarches de gestion mises en place s'appuient sur les principes suivants :

- Prévenir les pollutions futures, via l'action de l'inspection des installations classées consistant à connaître et à maîtriser les émissions de toutes natures produites par les installations on exploitation ;
- Mettre en sécurité les sites nouvellement découverts, grâce à la mise en œuvre d'éventuelles mesures de protection ;
- Connaître, surveiller et maîtriser les impacts, traiter et réhabiliter en fonction de l'usage puis pérenniser cet usage ;
- Garder la mémoire ;
- Impliquer l'ensemble des acteurs.

La méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, actualisée en 2017, conforte les référentiels précédemment établis, aujourd'hui reconnus par les acteurs du domaine. Elle reprend les principes qui ont conduit à leur élaboration :

- La distinction entre les pollutions actuelles et futures, appelées à être gérées selon un principe de prévention et de réparation, et les pollutions historiques pour lesquelles s'applique le principe de gestion du risque suivant l'usage ;
- L'évaluation du risque fondée sur la réalité des usages, la connaissance des milieux d'exposition et l'emploi d'outils de gestion (Interprétation de l'état des milieux, plan de gestion) transcrivant les objectifs nationaux de santé publique ;
- Le principe de spécificité impliquant une appréciation au cas par cas, au plus près des réalités effectives de terrain ;
- Enfin, le rôle central donné à l'analyse de la faisabilité technique et aux démonstrations financières argumentées.

***A noter :** Dans le cas d'ICPE portant une atteinte possible à la biodiversité, la réglementation ICPE impose que cet intérêt soit pris en compte lors de l'évaluation de dangers ou inconvénients. Dans le cas de sites pollués non réglementés par le régime ICPE, il n'y a pas d'exigence réglementaire. Cependant, la méthodologie nationale de gestion des SSP précise qu'elle concerne tous les sites présentant potentiellement des problématiques de pollution de leurs sols et/ou de leurs eaux souterraines, ces sites relevant ou non de la réglementation des ICPE (Introduction à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, MEEM 2017).*

En plus du cadre juridique (installations classées et déchets), la politique nationale de gestion des sites et sols pollués est une politique de gestion des risques suivant l'usage des milieux (textes révisés de 2017). Elle engage à définir les modalités de suppression des pollutions au cas par cas, compte tenu des techniques disponibles et de leurs coûts économiques. Le maintien de pollution résiduelle sur un site est lié à sa compatibilité avec l'usage retenu (industriel, résidentiel

etc.) et, si nécessaire, assorti de conditions de maîtrise de leur impact sanitaire ou environnemental.

A l'heure actuelle la méthodologie nationale de gestion des SSP précise clairement qu'il faut prendre en compte les enjeux pour **les ressources, les milieux naturels, la biodiversité** aussi bien que les enjeux pour la santé humaine, et ceux pour la ressource en eau (de surface et souterraines). La mise en œuvre de la méthodologie nationale de gestion des SSP est guidée par les principes fondamentaux du droit de l'environnement, notamment le **principe d'action préventive et de correction des atteintes à l'environnement**, et celui du **pollueur-payeur** tels qu'énoncés à l'article L. 110-1 -II du code de l'environnement (MEEM 2017).

A noter : *Les milieux dégradés présentent généralement une biodiversité fortement perturbée voire absente. La restauration de cette biodiversité lors d'opérations de restauration sous-tend la récupération des services écosystémiques. S'assurer qu'elle soit prise en compte lors de ces opérations nécessite un cadre réglementaire et des méthodes pour aider les gestionnaires. La législation française insiste sur l'importance de la prise en compte de la biodiversité et des services qu'elle fournit dans l'application du principe d'action préventive et de correction, visant un objectif d'absence de perte nette de biodiversité, voire un gain de biodiversité.*

La méthodologie nationale de gestion des SSP 2017 rappelle par ailleurs que les « **principes d'information sur les actions correctives et de prévention sont également au cœur du processus de gestion d'une pollution. Au-delà des documents de planification qui prévoient les dispositions à mettre en œuvre pour la protection de la biodiversité, l'identification des ressources, des milieux naturels et de la biodiversité à protéger repose sur le dialogue avec l'administration mais aussi avec les associations de protection de l'environnement œuvrant au niveau local pour la préservation des espèces naturelles et concernées par le projet. Il est recommandé d'engager ce dialogue le plus en amont possible et de le maintenir au fur et à mesure de l'avancement du processus de gestion** » (MEEM 2017).

A noter : *Les anciens textes de la méthodologie 2007 n'évoquaient pas aussi clairement l'évaluation des risques sur les enjeux dits « écologiques », mais se focalisaient plutôt sur les enjeux sanitaires. Les premiers textes de méthodologie nationale sur la gestion des SSP, (méthodologie d'évaluation détaillée des risques de 2000), évoquaient, à l'inverse, plus clairement la prise en compte des écosystèmes.*

Jusqu'à présent, l'application des outils de gestion des SSP pour l'aide à la décision a été très orientée sur les enjeux liés à la santé humaine et à l'évaluation du risque sanitaire¹⁹. L'évaluation des risques sanitaires vise à prévenir et à gérer, sur le long terme, le risque potentiel encouru par une population vivant à proximité de sources de pollution²⁰. Cette évaluation contribue à la mise en place de mesures de gestion proportionnées (valeurs limites d'émission plans de réduction des émissions et de surveillance, etc.). Par exemple, lors de reconversion de sites, notamment des friches de moins de 3 ha, les enjeux écologiques sont rarement pris en compte dans le projet de reconversion et aucun diagnostic permettant d'évaluer la richesse écologique n'est réalisé (ADEME 2014).

Ainsi, selon le Guide de l'ADEME (2014), *le changement d'usage du site (reconversion de la friche polluée) est le moment opportun pour régler un risque sanitaire potentiel ou avéré en réalisant des travaux de dépollution et s'assurer ainsi de la parfaite compatibilité du milieu avec les nouveaux usages. La gestion de la pollution mise en œuvre consiste à éliminer, au moins l'un*

¹⁹ Un risque sanitaire est caractérisé par 3 éléments : la source de pollution, le vecteur de transfert (sol, eau, air) ; la cible, c'est-à-dire les milieux exposés (l'Homme, l'environnement).

²⁰ <https://www.ineris.fr/fr/recherche-appui/risques-chroniques/risques-sanitaires>

des éléments qui constituent le risque sanitaire. La difficulté réside dans le fait que les calculs de risque sont orientés vers l'Homme et non pas vers l'environnement au sens large. En conséquence, les éventuelles pollutions résiduelles peuvent être tout à fait compatibles avec la cible « Homme », mais cependant impacter la chaîne trophique. **Les concepteurs d'un futur projet de réaménagement de friche devront alors réfléchir en amont à la stratégie de dépollution la moins pénalisante pour la biodiversité.**

2.3.3 EXIGENCES REGLEMENTAIRES CONCERNANT LA BIODIVERSITE LORS DE PROJET DE REAMENAGEMENT EN FRANCE

Lors d'un projet de réaménagement, un site peut être soumis à certaines procédures de type « étude d'impact, dossier loi sur l'eau, dossier Natura 2000 etc. » mais le site peut aussi faire l'objet de démarches environnementales volontaires. La prise en compte de l'écologie dans un projet d'aménagement relève à la fois de ces obligations réglementaires, de choix politique et de la volonté des porteurs de projets (Figure 7, ADEME 2014).

Zones	Objectif	Effets Règlementaires
Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF)	Zone d'inventaire.	Pas d'effet réglementaire Mise en garde sur la présence d'éventuelles espèces protégées.
Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux (ZICO)	Zone d'inventaire.	Pas d'effet réglementaire Mise en valeur de sites à haute valeur ornithologique.
Sites Natura 2000 et les Zones de Protection Spéciales (ZPS) associées aux Zones Spéciales de Conservation (ZSC)	Protection d'espèces et d'habitats (réseau européen). Définition des objectifs du site par un document d'objectifs appelé DOCOB.	Élaboration d'une étude d'incidences Natura 2000 Le projet d'aménagement est-il susceptible de porter atteinte à l'état de conservation des habitats et/ou des espèces d'intérêt communautaire ayant justifié la classification du site ?
Arrêté Préfectoral de Protection de Biotope (APPB)	Conservation des biotopes nécessaires à l'alimentation, à la reproduction, au repos ou à la survie d'espèces protégées.	Soumission de certaines activités à autorisation et interdiction de certaines activités (installation de stockage de déchets, réalisation de constructions, extraction de matériaux, etc.).
Espace Naturel Sensible (ENS)	Outils de protection des espaces naturels gérés par le Département : acquisition foncière ou signature de convention avec les propriétaires privés ou publics du site.	Pas d'effet réglementaire Mise en garde sur la qualité des sites, paysages et habitats naturels par le Conseil Général qui peut mettre en œuvre une politique de protection, de gestion et d'ouverture des ENS.
Espace Boisé Classé (EBC)	Protection ou création de boisements ou d'espaces verts dans la cadre des Plans Locaux d'Urbanisme (PLU).	Interdiction de changements d'affectation ou de modes d'occupation du sol de nature à compromettre la conservation, la protection ou la création de boisements.

Figure 7 : Les zonages de la biodiversité et leurs effets réglementaires (Figure issue de ADEME 2014).

L'étude d'impact constitue par exemple un véritable outil d'aide à la prise en compte de la biodiversité au sein des projets d'aménagement et, par extension, au sein de la reconversion d'une friche (ADEME 2014). Celle-ci permet en effet de dresser un bilan environnemental du projet d'aménagement et de repérer les impacts de ce dernier sur l'environnement : organisation de l'espace, infrastructures, déplacements, paysages, déchets, assainissement, pollutions, nuisances etc.

L'étude d'impact doit contenir les thèmes suivants :

- **État initial de l'environnement** : diagnostic écologique, inventaire faune-flore obligatoire, recensement des zones de protection situées au sein ou à proximité du projet ;
- **Impacts du projet sur l'environnement** : atteinte aux espèces ou aux habitats à enjeux, sensibilités écologiques du projet ;
- **Mesures d'évitement** : une mesure d'évitement permet de modifier un projet afin de supprimer un impact négatif identifié que le projet engendrerait (par exemple évitement de milieux naturels qui ne pourraient pas être restaurés) ;
- **Mesures de réduction** : une mesure de réduction vise à réduire autant que possible la durée, l'intensité et /ou l'étendue des impacts d'un projet qui ne peuvent être complètement évitées. Ce peut être par exemple des mesures de restauration (maintien des continuités écologiques, valorisation écologique des ouvrages de gestion des eaux pluviales...) ou de précaution pendant les travaux ;
- **Mesures de compensation** : une mesure compensatoire a pour objet d'apporter une contrepartie aux effets négatifs notables, directs ou indirects du projet qui n'ont pu être évités ou réduits. Cela peut être traduit par l'acquisition de parcelles pour le déplacement des habitats et espèces protégées, mise en place de baux agro-environnementaux.

L'intégralité des mesures préconisées dans l'étude d'impact doit nécessairement être respectée par le maître d'ouvrage du projet, sous la surveillance des services de l'État. Dans le cas de projets de reconversions de friches, en fonction des catégories d'aménagement d'ouvrages et de de travaux, un projet peut être soumis à étude d'impact ou à la procédure « cas par cas » (Figure 8).

Catégories d'aménagement, d'ouvrages et de travaux	Projets nécessairement soumis à étude d'impact	Projet soumis à la procédure "cas par cas"
ZAC, permis d'aménager, lotissement, sur une commune dotée d'un PLU (Catégorie n° 33)	Réalisation de l'opération en une ou plusieurs phases SHON opération ≥ 40 000 m² OU Terrain d'assiette > 10 ha	Réalisation de l'opération en une ou plusieurs phases 10 000 m² ≤ SHON opération ≤ 40 000 m² OU 5 ha < Terrain d'assiette < 10 ha
Travaux ou constructions soumis à permis de construire, sur une commune dotée d'un PLU (Catégorie n°36)	Réalisation de l'opération en une ou plusieurs phases SHON opération ≥ 40 000 m²	Réalisation de l'opération en une ou plusieurs phases 10 000 m² ≤ SHON opération ≤ 40 000 m²

Figure 8 : Extrait du tableau annexé au décret n°2011-2019 du 29 décembre 2011 réformant les études d'impact des projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements (Figure issue de ADEME 2014).

Selon le décret n°77-1133 du 21 septembre 1977, modifié par le décret 2000-258 du 20 mars 2000, chaque étude d'impact doit également présenter un schéma de remise en état écologique. Ce document doit permettre de retrouver, après la phase d'exploitation, un site dans un état écologique satisfaisant et doit comporter des composantes obligatoires, tels que l'évaluation des coûts de remise en état ou la description biologique de la nature des sols et de la végétation après réaménagement (ADEME 2014).

Le principe général de préservation de la biodiversité, tel que proposé par le déroulé classique d'une étude d'impact, peut être appliqué à un projet de reconversion assez simplement. L'idée est bien d'éviter autant que possible que le projet de reconversion ne détruise des habitats en place, après les avoir fait évaluer par un spécialiste. En général, le changement d'usage va dans le sens de l'amélioration, puisque d'une situation dégradée (friche polluée ayant des impacts sur la santé et l'environnement, et engendrant une perte de valeur sur et autour du site) pourra naître un nouveau projet d'aménagement. Cependant, ce changement d'usage peut aussi avoir des impacts importants sur la biodiversité, y compris sur des milieux qui n'auraient pas pu se

développer sans le passé industriel du site et sans qu'il ait été laissé à l'abandon quelque temps. Il faudra donc veiller à réduire ces impacts, et en dernier ressort compenser les pertes engendrées par ce changement d'usage.

Le changement d'usage est un temps privilégié dans la vie d'un foncier : c'est à ce moment précis que la biodiversité peut être évaluée, protégée, voire encouragée ou favorisée dans le nouveau projet en trouvant sa (bonne) place.

A noter : L'obligation réelle environnementale est un nouveau dispositif issu de la loi 2016 sur la biodiversité (article L. 132-3 du code de l'environnement). Elle se présente sous la forme d'une clause que le propriétaire d'un site pollué peut introduire dans un contrat (par voie d'acte authentique, notamment avec une collectivité publique, en vertu de laquelle il s'engage, ainsi que les propriétaires ultérieurs, à des obligations réelles ayant pour finalité « le maintien, la conservation, la gestion ou la restauration d'éléments de la biodiversité ou de fonctions écologiques. En contrepartie, le propriétaire se verra exonéré de la taxe de publicité foncière et de la taxe foncière sur les propriétés non bâties. Ce dispositif présente un intérêt non négligeable pour les collectivités publiques en ce qu'il encourage la protection environnementale de son territoire via l'initiative privée (Rivoire et al., 2017).

2.4 conclusions sur le contexte réglementaire

On retiendra de cette revue réglementaire que 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 états membres de l'UE disposant de législations spécifiques sur les sols, (cas des 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.

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'ODD sur la multifonctionnalité des sols 	<ul style="list-style-type: none"> ↻ Echec 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 sols rare

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 pu être appliquée au final 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. Par 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 états membres doivent cartographier et évaluer l'état et la valeur économique des écosystèmes et de leurs services. 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 fixée à l'échelle mondiale ou domestique en matière de biodiversité et de changement climatique.

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 la sauvegarde des services qu'ils fournissent et des usages qui s'y rattachent. Elle a pour ambition 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 etc. Les réglementations en place telles que « 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 palier à ce manque ont été identifiés.

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

3.1. Introduction

Les milieux qui ont été impactés par une activité humaine de type industrielle, minière, stockage ancien de déchets, apports de remblais potentiellement pollués présentent en général des caractéristiques spécifiques (sols déstructurés et compactés, enrichis en éléments minéraux et en matière organique, présence de polluants) qui sont autant de contraintes pour la biodiversité et pour le fonctionnement général des écosystèmes.

En dépit de la très grande diversité de situations rencontrées, des grandes tendances se dessinent quant aux atteintes à la biodiversité et à la fonctionnalité des milieux avec par exemple, une forte densité d'espèces pionnières et nitrophiles accompagnées d'espèces exotiques à caractère envahissant qui profitent des perturbations survenues (comme par exemple les vergerettes, les solidages, les Paspalum, le Sénéçon du Cap etc.). Il en résulte une transformation profonde de la physiologie végétale, voire de la dynamique évolutive, et un impact notable sur les cortèges animaux, notamment un appauvrissement de la diversité spécifique. Le retour à une dynamique végétale originelle est souvent compromis ou lent. Dans des milieux plus humides, d'autres enjeux émergent comme les risques liés à la diffusion des polluants (dégradation du fonctionnement des écosystèmes et de la qualité de l'eau en aval), la perte en sol ou encore l'installation d'espèces invasives (par exemple, Renouée du Japon) limitant l'implantation d'espèces natives. Enfin, l'usage de ces terres est, en général, limité avec une perte nette en termes de fourniture de SE.

Comme présenté dans la première section de ce rapport, la réglementation impose désormais la réalisation d'une étude d'impact permettant de retrouver, après la phase d'exploitation des sites industriels et miniers notamment, un site dans un état écologique compatible avec son futur usage. La définition d'un schéma de remise en état écologique nécessite la réalisation d'un état des lieux préalable de la biodiversité en place mais aussi une caractérisation physico-chimique du milieu. En effet, avec le temps, certaines espèces protégées ont pu s'installer sur le site. Par ailleurs selon les milieux présents, certains enjeux en termes de connectivité nécessitent également d'être pris en compte. L'évaluation des fonctions et services rendus (SE) doit par ailleurs faire partie du diagnostic initial afin de permettre l'amélioration de la fonctionnalité globale du site, support de biodiversité, et à l'origine d'un bouquet de SE.

Le diagnostic réalisé dans le cadre de l'étude d'impact est un préalable à la définition des mesures à mettre en place. Il peut également aboutir à l'élaboration d'un tableau de bord listant les indicateurs à suivre pour vérifier l'efficacité des actions mises en œuvre et définir des valeurs cibles à atteindre (par exemple, indicateurs d'objectifs avec indication sur la temporalité des améliorations attendues).

A l'heure actuelle, de nombreux indicateurs existent pour caractériser la biodiversité et évaluer l'efficacité des mesures de restauration écologique. Néanmoins, seuls certains d'entre eux sont pertinents dans le cas de sites pollués ou perturbés (biodiversité initiale spécifique, contraintes physico-chimiques fortes etc.). Les fonctions et SE font également l'objet d'une importante littérature scientifique mais les méthodes proposées sont en général peu opérationnelles au regard des contraintes budgétaires et temporelles.

Cette section propose un travail de synthèse issu de la littérature scientifique et du dire d'experts aboutissant à la proposition d'un arbre d'aide à la décision identifiant les indicateurs pertinents pour suivre l'efficacité des mesures de restauration/réhabilitation de sites dégradés ou pollués.

3.2. Cadre conceptuel et méthodologique

3.2.1. QUELQUES CONCEPTS CLES

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 dense réseau de dépendances, d'échanges d'énergie, d'information et de matière permettant le maintien et le développement de la vie.

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

On distingue généralement trois grandes catégories de fonctions :

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

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

3.1.2. QUELLES APPROCHES POUR EVALUER LE SUCCES DE LA RESTAURATION ?

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

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

- L'évaluation peut se faire par **comparaison des conditions du site entre un moment t et t + 1 et par l'analyse de sa 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 originel 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 services écosystémiques (SE) associés à cet écosystème, en adéquation avec son futur usage.

Dans ce contexte, il semble 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 9 ci-dessous illustre le lien entre écosystèmes, fonctions et SE.

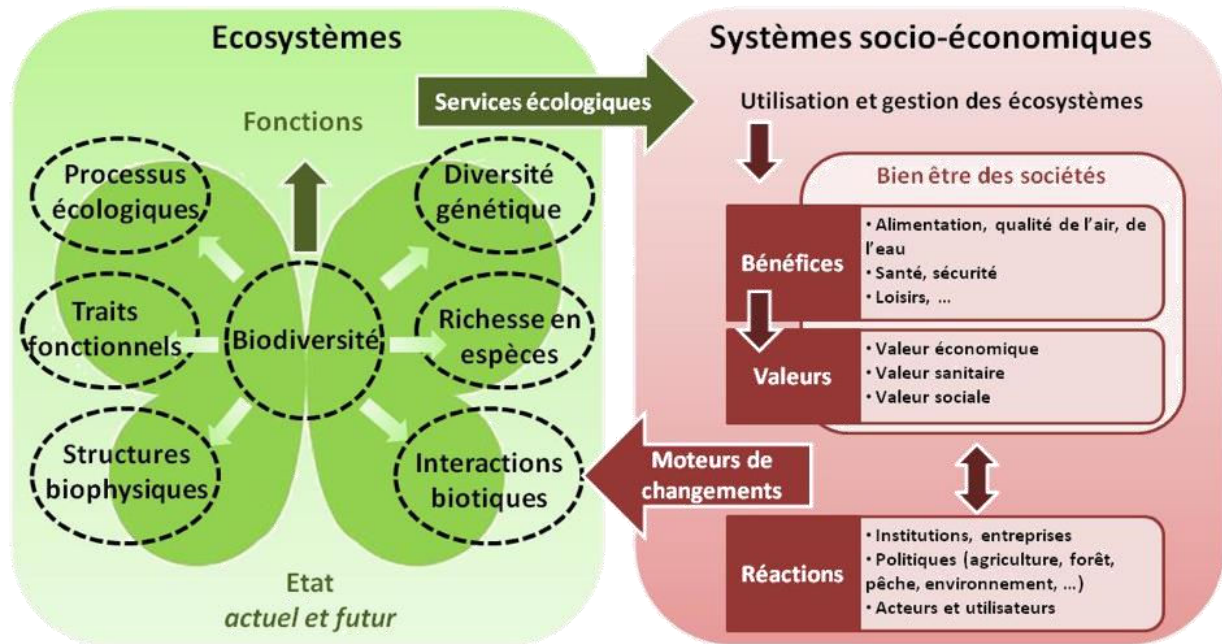


Figure 9 : Cadre conceptuel des écosystèmes et de leurs services (MEDDE 2012).

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 dégradés, elle offre un cadre pertinent pour étudier, optimiser et évaluer la régénérescence des fonctions et services écosystémiques du milieu.

A l'heure actuelle, l'appréciation de la réussite d'une restauration écologique passe essentiellement par une approche centrée sur les espèces et les communautés (Cristofoli et Mahy, 2010). Il s'agit en général de vérifier si les espèces ou les communautés présentes sont celles attendues au regard du système de référence (par exemple une pelouse sèche, ou encore une prairie hygrophile).

En dépit du cadre présenté ci-dessus, les fonctions écologiques et les SE ne sont que rarement évaluées du fait de la complexité des processus en jeu et/ou de l'important appareillage nécessaire à leur quantification. Pour autant, 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, 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 sol²¹, au même titre que la composition des communautés végétale, est donc à la clé d'un bon rétablissement de la fonctionnalité générale des milieux et d'une fourniture optimale de SE (Figure 10).

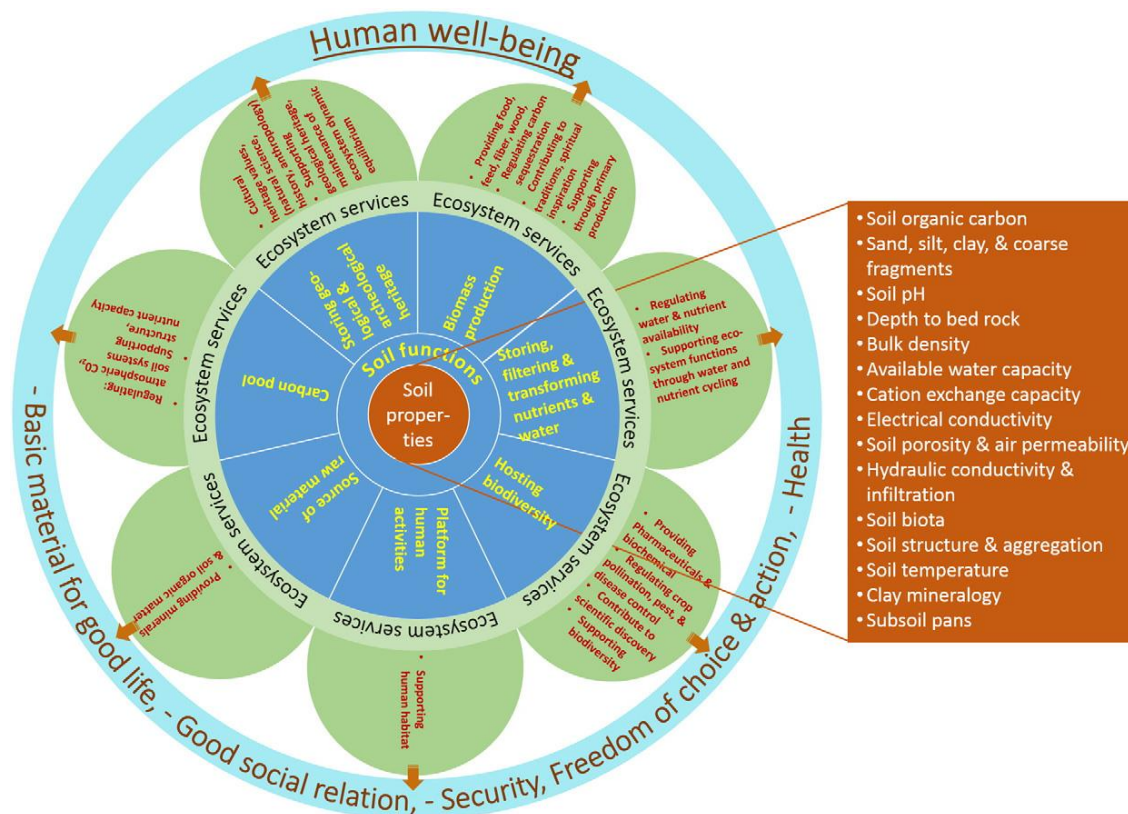


Figure 10 : Diagramme conceptuel reliant les propriétés clés des sols aux services écosystémiques à travers les fonctions du sol (Adhikari et al. 2016).

Evaluer le succès d'une restauration de cette fonctionnalité passe donc par le suivi d'indicateurs portant à la fois sur le compartiment aérien ou souterrain, sur des composantes biotiques ou abiotiques.

Par exemple, la restauration d'une prairie hygrophile pourra à la fois s'évaluer au travers de la composition des communautés végétale (espèces hygrophiles), de la macrofaune (odonates, amphibiens etc.), de la microfaune du sol (présence, par exemple, de bactéries dénitrifiantes favorisées par les environnements anoxiques) ou encore par le suivi de l'engorgement des sols (piézométrie, traces d'hydromorphie). Pour chacun de ces indicateurs, il s'agira de vérifier la trajectoire suivie par rapport à une trajectoire de référence. Il devient ainsi possible d'évaluer l'avancée de la mise en œuvre des actions de restauration, de mesurer leur efficacité ou encore d'adapter la trajectoire d'une restauration écologique en vue d'atteindre un objectif qualitatif ou quantitatif précis (actions correctrices).

²¹ Longtemps considéré uniquement comme une surface « support », la société et les pouvoirs politiques ont ainsi pris conscience depuis environ 25 ans de la fragilité des sols et de leur rôle clé. Le concept de la « qualité des sols » a par la suite émergé avec un lien fort avec l'usage, et qui peut être traduit comme la capacité d'un sol à réaliser ses fonctions durablement (Vrščaj et al 2008).

3.2.3 LES INDICATEURS DE SUIVI DE L'EFFICACITE DE LA RESTAURATION

On demande d'un indicateur qu'il soit sensible à des modifications d'usage, pertinent, fiable, reproductible, peu onéreux, connu scientifiquement (références, normes), accessible, facile d'interprétation (Doran et Parkin, 1996; Rutgers et al. 2012 ; Hopkin, 1993) et quantifiable. A ce jour il n'existe pas de liste universelle d'indicateurs applicables dans toutes les régions de France et pour tous les usages (Obriot et al. 2016 ; Seybold et al. 1998). Cependant de nombreux auteurs ont défini des approches méthodologiques soit pour la mesure d'un « indice de qualité » des milieux en fonction de leur usage, soit en définissant statistiquement ou à dire d'experts une liste d'indicateurs adapté au contexte. Ainsi, nous pouvons distinguer différents types d'indicateurs qui sont soit la résultante directe de la mesure d'un paramètre, soit une agrégation de plusieurs paramètres.

Les indicateurs peuvent être biotiques (liés à la présence d'espèces végétales ou animales spécifiques) ou abiotiques (engorgement des sols, pH etc.). Ils apportent des informations sur la biodiversité en soulignant la présence d'**une espèce particulière ou de communautés végétales ou animales spécifiques** (plantes fixatrices d'azote, communautés de nématodes...). Ils peuvent également informer sur **l'état du milieu** (pH, rétention d'eau), le **potentiel transfert de polluants** (bio indicateurs d'accumulation) ou enfin évaluer de manière intégrative **l'état d'un milieu** et dans ce cas on parlera plutôt d'indices.

Comme mentionné ci-dessus, les indicateurs biotiques se basent sur la présence d'espèces ou communautés spécifiques.

L'approche « espèce » fait référence à une espèce cible de la restauration, comme par exemple, des espèces bio-indicatrices, des espèces clés de voûtes ou encore des espèces parapluies. Les indicateurs concernent, dans ce cas, directement l'état de la (les) population(s) (présence, nombre d'individus, démographie, diversité génétique, etc.).

Les **espèces bio-indicatrices** sont des espèces dont la présence et la fluctuation de leurs effectifs sont censées refléter les variations des conditions environnementales locales ou les variations des effectifs des autres espèces de la communauté. Les espèces bio-indicatrices seront différentes en fonction des éléments que l'on souhaite suivre et de l'échelle considérée.

Différents types d'espèces bio-indicatrices sont particulièrement intéressantes dans le contexte de la restauration de sites pollués/dégradés :

- **Espèces exigeantes en ressources ou en habitats** qui nécessitent des nutriments ou des niches écologiques particulières. On pourrait inclure dans cette catégorie les espèces rudérales ou présentant une forte résistance aux métaux lourds par exemple (espèces phyto-accumulatrices) ;
- **Espèces pionnières ou à cycle court** permettant une adaptation aux perturbations anthropiques. A terme, la persistance de ces espèces dans un écosystème stabilisé devient quasi-nulle.
- Inversement, **espèces vivaces ou à cycle long** indicatrices d'une atteinte d'un équilibre ;
- **Espèces à spectre écologique étroit**, caractéristiques des milieux à forte naturalité ou sensibles aux perturbations affectant les équilibres écologiques, apparaissant dans le temps et complétant les cortèges initiaux composés uniquement d'espèces adaptables à spectre écologique large (ubiquistes) ou envahissantes. Leur apparition est signe d'une bonne trajectoire de restauration / résilience.
- **Espèces exigeantes en surface** qui permet de conserver des populations viables sur de vastes territoires ;
- **Espèces à moyens limités de dispersion** dont les capacités de colonisation dépendent surtout de la présence de continuités écologiques ;

Les espèces clés de voute sont des espèces dont la présence est indispensable à l'existence même d'un écosystème, non pas par son effectif mais par l'action qu'elle exerce sur les comportements et/ou effectifs des autres espèces qui composent le système (espèces fournisseurs de ressources, espèces ingénieur etc.). L'activité et l'abondance des espèces clés de voûte déterminent l'intégrité de la communauté, sa persistance et sa stabilité. Leur présence permet donc d'avoir une vision intégrée de l'état de conservation du milieu.

Enfin, les espèces parapluies sont des espèces dont l'étendue du territoire ou de la niche écologique permet la protection d'un grand nombre d'autres espèces si celle-ci est protégée. Leur protection est donc aussi utile à de nombreuses autres espèces qui partagent le même habitat mais ne nécessitent pas autant d'espace. Dans le cadre du suivi de la restauration des sites pollués/dégradés, les indicateurs liés à ces espèces présentent moins d'intérêt que les espèces bio-indicatrices ou encore clé de voute.

Bien que l'approche espèce se justifie dans le cadre de suivi de projets de restauration visant explicitement une espèce en particulier ou dans le cas de sites pollués (espèces bio-indicatrices de la pollution en question), il est important de mentionner que celle-ci a fait l'objet de critiques concernant le fait qu'elle n'apporte qu'une information restreinte par rapport aux diverses composantes de biodiversité de l'écosystème à évaluer. Néanmoins, ces indicateurs présentent l'avantage (économique et main d'œuvre) d'une collecte de données restreinte, puisque ne concernant qu'une espèce.

L'approche communauté, à l'inverse, est supposée saisir l'intégrité, la diversité et la vulnérabilité d'une communauté donnée (Lambeck, 1997). Des indicateurs classiques en sont la diversité et la richesse spécifique. La richesse spécifique est le nombre d'espèces correspondant à un nombre d'individus (ou une biomasse) donnés ou à une superficie donnée. La richesse spécifique peut être considérée dans son ensemble (nombre total d'espèces) ou être décomposée en compartiments. La richesse en espèces spécialistes de l'écosystème visé par la restauration est ainsi fréquemment utilisée. En effet, les espèces spécialistes sont davantage sensibles aux modifications environnementales que les espèces généralistes (Tschardt et al. 2002 ; Krauss et al. 2003) et l'impact d'une restauration, de même que les vitesses de (re)colonisation du milieu restauré peuvent ainsi différer entre différents groupes d'espèces (Cristofoli et Mahy 2010).

D'autres approches vont plus loin et visent à générer des résultats permettant une meilleure compréhension des mécanismes écologiques sous-jacents aux réponses différenciées entre espèces et déterminant la composition en espèces dans un écosystème donné (Maurer et al., 2003 ; Hérault et al., 2005). Les groupes fonctionnels en sont un exemple. Il s'agit d'ensembles d'espèces ayant des combinaisons de traits d'histoire de vie morphologiques, physiologiques et phénologiques similaires (Lavorel et al., 1997).

On recense ainsi dans la littérature de nombreux indicateurs incluant notamment :

- **Les indicateurs de richesse spécifique** : l'indice de diversité brute, ceux de Shannon, Shannon evenness index ou encore l'indice de Sørensen-Dice qui permet de mesurer des similarités et inversement l'indice de dissimilarité de Bray-Curtis (voir notamment Jaunâtre et al. 2013). Un des problèmes liés aux estimateurs de richesse spécifique est leur dépendance vis-à-vis de l'effort d'échantillonnage qui rend notamment difficile la comparaison entre études (Gaston, 1996) ;
- **Les indicateurs de mesure de l'évolution des cortèges par synusies ou types biologiques**, pour évaluer les changements structurels et l'assemblage des espèces dans le temps, pouvant être révélateur de telle ou telle condition ou de tel ou tel mode de gestion (Gillet et al. 1991). La méthode des synusies ou association de cortèges peut être adaptée

aux espèces faunistiques, notamment aux orthoptères (voir par exemple les travaux de E. Boitier, B. Défaud etc.²²).

- **Les indicateurs de la richesse trophique du milieu et du niveau de rudéralité**, en utilisant entre autres les caractéristiques écologiques connues des espèces et les valeurs écologiques d'Ellenberg, Landolt ou celles plus complètes proposées par Julve (2014). On peut ainsi avoir basiquement des indices calculés à partir de la moyenne des valeurs indicatrices considérées, pondérées par le recouvrement des espèces sur une placette, ou leur abondance le long d'une corde métrée, considérant que le recouvrement d'une espèce témoigne de sa vitalité. La méthodologie est facile à mettre en œuvre, reproductible et proche des indicateurs développés pour suivre l'évolution des milieux humides dans le programme RhoMéO, du bassin Rhône-Méditerranée²³ ;
- **Les indicateurs d'un état favorable du milieu** par rapport à un optimum de naturalité ou lié à un mode de gestion, ou à une similarité d'habitat par comparaison des listes d'espèces. Ce type d'indicateur basé sur des espèces caractéristiques, par exemple des milieux agropastoraux, est en général utilisé pour évaluer des états de conservation, mais il peut très bien être adapté à l'évaluation de la qualité d'une restauration ou d'une réhabilitation. Ces espèces sont en effet marqueurs de stabilité des conditions édaphiques du maintien de l'habitat et d'équilibre avec les pratiques de gestion (Maciejewski et al., 2015). On cherchera ainsi à mesurer une proportion d'espèce caractéristiques du milieu considéré comme étant à atteindre, sur l'ensemble des espèces relevées. Plus celle-ci sera élevée, plus la trajectoire par rapport à l'habitat perturbé sera bonne. La liste des espèces caractéristiques est à définir au préalable en tenant compte des connaissances sur les habitats régionaux et des relevés initiaux sur les milieux « témoins » (Figure 11). Pour les habitats de prairie et de pelouse, elles sont relativement bien connues.

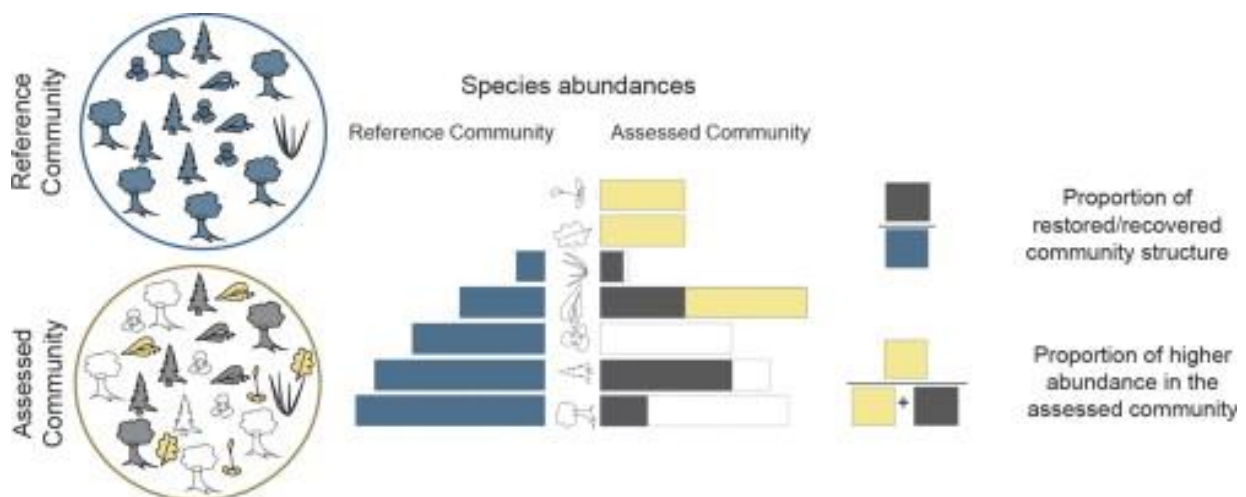


Figure 11. Illustration du type de résultats pouvant être obtenus pour vérifier l'atteinte des objectifs visés en termes de restauration des communautés (Jaunâtre et al. 2013).

²² Exemple de ces travaux ici : http://ascete.org/wp-content/uploads/MOE_09_BOITIER.pdf

²³ <http://rhomeo-bao.fr/?q=indicateurs>.

3.2.4 SPECIFICITE DES MILIEUX PRAIRIAUX ET ZONES HUMIDES

Comme mentionné en section 1, le travail présenté dans le cadre de cette étude porte spécifiquement sur la restauration de milieux prairiaux et zones humides.

Les prairies sont des écosystèmes semi-naturels, maintenus ouverts par les activités humaines (fauche, pâturage etc.). La composition floristique de ces milieux varie grandement selon le contexte édapho-climatique (acidité, humidité et fertilité). Il est ainsi possible de classer les prairies comme acidiphiles, ou basophiles (en présence de calcaire notamment). Le degré d'humidité conduit par ailleurs à des communautés hygrophiles²⁴, mésophile ou xérophiles. Les prairies mésotrophes à eutrophes (gradient croissant de fertilité) présentent également des variations importantes en termes de diversité. Enfin, certains sols relativement pauvres et secs vont favoriser le développement des pelouses sèches, qui se distinguent des prairies par leur plus faible productivité herbagère mais inversement par une diversité végétale intéressante. Ces pelouses sont le plus souvent pâturées de manière extensive.

L'ensemble de 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 (par ex. par complexation aux particules du sol puis métabolisation, phytoaccumulation) 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 (par complexation aux particules du sol ou phytoaccumulation), transformer (métabolisation) voire éliminer (dénitrification principalement) certains polluants tels que les phytosanitaires, l'azote²⁵ 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 2) et qui ont été prises en compte dans le cadre de cette étude.

²⁴ Les prairies dominées par une végétation hygrophile et dont les sols sont engorgés de façon permanente ou temporaire sont considérées comme des zones humides au sens de la réglementation (Article 2 de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992).

²⁵ 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 humides.

Tableau 2 : 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, métabolisation etc.)	Séquestration du carbone Restauration ou maintien de la qualité des sols (recyclage de la matière organique, fertilité) Rétention, transformation, élimination des polluants (complexation aux particules du sol, phytoaccumulation, métabolisation, dénitrification etc.)
Fonctions biologiques	Habitats d'espèces Connectivité	Habitats d'espèces Connectivité

Dans le cadre spécifique de la restauration de sites dégradés et pollués, l'objectif est de rétablir la fonctionnalité générale des milieux mais également certaines fonctions spécifiques dépendant du type de pollution ou encore de l'usage futur du site.

La section suivante présente la grille de lecture proposée pour sélectionner les indicateurs pertinents au regard du type d'écosystème à restaurer, du type de perturbation et enfin des usages futurs.

3.3 Présentation de la grille de lecture

Comme formulé par Lévêque et Mounolou (2001) et rappelé par Bazin et Barnaud (2002), les indicateurs ne correspondent pas à de simples données relatives aux écosystèmes, mais doivent « véhiculer une information la plus pertinente possible sous une forme condensée, notamment en essayant de représenter de manière simplifiée des phénomènes complexes ; servir de moyen de communication, en particulier entre ceux qui recueillent les informations et ceux qui les utilisent ».

Si l'objectif visé influence la sélection des indicateurs, le choix résulte également d'un compromis entre la pertinence scientifique de l'indicateur, sa sensibilité à la dégradation, son coût et sa complexité de mise en œuvre et d'interprétation. Il paraît notamment préférable de réduire la collecte de données au profit de la longévité du suivi, tout en s'assurant de la capacité des indicateurs sélectionnés à décrire de manière complète l'état de l'écosystème.

Le choix des indicateurs relève de plusieurs questions-clés :

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

Ces trois questions permettent de cibler les fonctions et indicateurs associés à relever afin d'évaluer le succès de la restauration. Au-delà, des critères de coûts et de complexité en termes de récolte des données ou d'interprétation peuvent s'appliquer.

Sur cette base, un outil a été conçu sous Excel afin d'accompagner l'utilisateur dans le choix et la sélection d'indicateurs pertinents au regard du contexte du site étudié.

Trois exemples d'utilisation de ce tableur sont proposés en section 4.

La première étape consiste à renseigner le type de de perturbation.

Outil d'accompagnement à la sélection d'indicateurs de suivi des actions de restauration écologique	
Nom du site :	<input type="text"/>
Localisation :	<input type="text"/>
Date :	<input type="text"/>
Utilisateurs :	<input type="text"/>
1	Type de dégradation
Si dégradation physique, veuillez préciser la nature de cette dégradation :	
<input type="checkbox"/> Dévégétalisation des sols (sols mis à nu)	
<input type="checkbox"/> Présence d'un technosol	
Si dégradation chimique, veuillez préciser la nature de cette dégradation :	
<input type="checkbox"/> Contamination métallique (présence de métaux dans les sols)	
<input type="checkbox"/> Contamination organique	
<input type="checkbox"/> Contamination minérale (N, P) / sols eutrophisés	

En cas de dégradation physique de type « dévégétalisation des sols », les indicateurs liés à la fonction de **protection contre l'érosion** sont automatiquement retenus.

En cas de dégradation ou modification physique conduisant à des anthroposols²⁶ ou technosols²⁷, les indicateurs liés à **la fonction de protection contre l'érosion** et de **restauration ou maintien de la qualité des sols** sont automatiquement sélectionnés.

²⁶Anthroposols : sols d'origine naturelle tellement transformés par des processus anthropo-génétiques que le *substratum* originel n'est plus reconnaissable où a acquis de nouvelles morphologies et propriétés qui ne permettent plus son rattachement à d'autres références pédologiques. Au sens plus large ce sont des sols fabriqués par l'homme à la suite d'apports artificiels ou terreurs ou technologiques (AFES 2008).

²⁶ Technosol : Regroupement des différents types d'anthroposols proposé par la WRB (IUSS Working Group WRB, 2015) rassemblant tous les sols dont les propriétés et la pédogénèse sont dominés par leur origine technique : forte quantité de matériaux apportés (naturels ou artificiels) et présence d'artéfacts en surface ou en profondeur.

Enfin, en cas de dégradation chimique, les indicateurs liés à la fonction de **réten**tion, **transformation** et **élimination des polluants** sont là aussi automatiquement sélectionnés (selon le type de contamination).

La seconde étape consiste à préciser le type d'écosystème visé (zones humides, zones non humides).

2 Ecosystèmes visés par la restauration	
<input checked="" type="checkbox"/> Milieux humides	Type de zone humide : <input checked="" type="checkbox"/> Zone humide de type alluvial <input type="checkbox"/> Zone humide en tête de bassin versant connectée au réseau hydrographique <input type="checkbox"/> Autres types de zones humides (étendue d'eau, zones humides de plateau, zones humides dépressionnaires etc.)
<input type="checkbox"/> Milieux non humides	

Si le milieu visé n'est pas humide, aucune sélection préalable d'indicateurs n'est faite.

Si le milieu visé est humide, des questions complémentaires liées au type même de zones humides sont proposées. Si la zone humide est de type alluvial, **les fonctions de rétention des écoulements et des sédiments** sont automatiquement sélectionnées. Il sera néanmoins nécessaire de s'assurer que ces fonctions s'expriment ou pourront effectivement s'exprimer après restauration (reconnexion de la zone humide au cours d'eau par exemple).

Si la zone humide est située en tête de bassin versant et connectée au réseau hydrographique, la fonction de **soutien d'étiage** est automatiquement sélectionnée.

Pour les autres types de zones humides, aucune fonction n'est présélectionnée car leur niveau d'expression dépend du contexte dans lequel se situe le site.

Attention : la sélection automatique de certaines fonctions ne préjuge en rien de leur expression réelle. L'utilisateur doit vérifier les propositions en fonction de sa connaissance du site et peut, si besoin, décocher les cases qui ne sont pas pertinentes.

Enfin, la troisième étape consiste à renseigner les usages ciblés par la restauration du site.

<input type="checkbox"/> Usage agricole ou apicole	<input type="checkbox"/> Usage industriel (Prélèvement en eau)	<input type="checkbox"/> Site touristique
<input checked="" type="checkbox"/> Site ouvert au public (accessible librement)	<p>Si vous avez coché " Site ouvert au public", veuillez préciser le(s) type(s) d'usages :</p> <input checked="" type="checkbox"/> Le site accueille des visiteurs <input type="checkbox"/> Le site est le support d'activités de recherche <input type="checkbox"/> Le site est utilisé à des fins pédagogiques <input type="checkbox"/> Les chasseurs pratiquent leur activité sur le site <input type="checkbox"/> Les pêcheurs (de loisir) pratiquent leur activité sur le site <input type="checkbox"/> Des ressources médicinales y sont prélevées <input checked="" type="checkbox"/> Des habitants vivent à proximité du site (moins de 10 km)	
<input checked="" type="checkbox"/> Usages à l'extérieur du site	<p>Si vous avez coché "Usages à l'extérieur du site", veuillez préciser si :</p> <input checked="" type="checkbox"/> Des agriculteurs sont présents à proximité directe du site (2 km max) <input checked="" type="checkbox"/> Des agriculteurs, éleveurs, industries ou des habitants sont présents en aval du site	

En cas d'usage agricole ou apicole, les indicateurs socio-économiques liés aux SE de l'agriculture, de l'élevage et de l'apiculture sont automatiquement retenus. Si l'écosystème visé par la restauration est un milieu humide, alors les indicateurs liés au service d'approvisionnement en eau sont aussi sélectionnés. Ces derniers indicateurs sont également proposés si un prélèvement en eau est effectué sur le site dans le cadre d'un usage industriel.

Si le site est touristique, alors les indicateurs liés aux intérêts récréatif (balades, sports de nature, observation, valeur paysagère, etc.) et éducatif (activités pédagogiques et sensibilisation à l'environnement) sont automatiquement sélectionnés.

Sans être forcément touristique, le site peut également accueillir des visiteurs. Dans ce cas, l'indicateur évaluant l'intérêt récréatif est retenu. Le site peut par ailleurs être le support d'activités de recherche ou être utilisé à des fins pédagogiques. Les indicateurs liés aux intérêts scientifique et éducatif sont alors sélectionnés. Aussi, les chasseurs et/ou pêcheurs peuvent exercer leur activité de loisir sur le site. Les indicateurs évaluant les services culturels de la chasse et de la pêche sont dans ce cas proposés. Plus rarement, des ressources médicinales peuvent être prélevées sur le site. L'indicateur lié aux ressources médicinales est alors sélectionné. Enfin, le site peut offrir des champignons, baies et autres produits issus de la cueillette aux habitants vivant à proximité. Ainsi, lorsque la case « Des habitants vivent à proximité du site (moins de 10 km) » est cochée, l'indicateur lié au service écosytémique de la cueillette est automatiquement sélectionné (attention néanmoins à vérifier l'usage réel notamment en fonction du type de dégradation).

Si la restauration du site ne vise pas d'usage spécifique, il est tout de même important de renseigner les usages qui peuvent être faits dans l'environnement du site de manière plus large. En effet, les écosystèmes présents sur le site peuvent rendre des SE au-delà du périmètre de celui-ci. Si des agriculteurs, industriels ou habitants sont présents en aval du site, ceux-ci peuvent bénéficier des SE de protection contre les inondations (s'il s'agit d'une zone humide de type alluvial par exemple) et de régulation de la qualité de l'eau fournis par les écosytèmes présents sur le site. Les indicateurs correspondant à ces SE sont dans ce cas pré-sélectionnés. Par ailleurs, les agriculteurs situés à proximité directe peuvent également bénéficier d'autres SE rendus par les écosystèmes du site comme la pollinisation et la régulation de la qualité des sols.

Il est à noter que le service de protection contre l'érosion est automatiquement sélectionné lorsque l'écosystème visé par la restauration est un milieu non humide. Par ailleurs, l'indicateur évaluant le service de régulation du climat est proposé systématiquement quelque soit le type d'écosystème visé par la restauration du site. En effet, ce SE est rendu par les milieux humides et non humides et profite à l'ensemble de la population mondiale. Si ces SE ne représentent pas un enjeu lors de la restauration, il est possible de les décocher.

Dans la quatrième partie de la grille de lecture, une liste d'indicateurs est proposée pour chacune des fonctions manuellement ou automatiquement sélectionnés. Ces indicateurs sont en général organisés en fonction du compartiment étudié (sol, aérien - flore/faune) et de leur caractère biotique ou abiotique. Le numéro de chaque indicateur s'affiche également afin de le retrouver facilement dans la base de données associée.

4 Les fonctions ciblées par la restauration écologique			
Selon les réponses données ci-dessus, certaines fonctions ont été automatiquement cochées. Si ces fonctions ne sont pas prioritaires, il est possible de les décocher manuellement.			
Pour les fonctions non cochées, il est possible d'aller affiner l'analyse et de les cocher manuellement en fonction des enjeux de la restauration mise en oeuvre.			
<input checked="" type="checkbox"/> Fonctions hydrogéomorphologiques			
<input checked="" type="checkbox"/> Ralentissement des eaux de ruissellement	Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Taux d'infiltration de l'eau dans les sols (28) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indice de qualité du sol (31) ; Index de la qualité des sols (34) ; Structure de la végétation (35)	<input checked="" type="checkbox"/> Rétention des sédiments (liés aux écoulements d'eau)	Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Index de la qualité des sols (34) ; Structure de la végétation (35)
<input checked="" type="checkbox"/> Stabilisation des sols (protection contre l'érosion)	Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indice de qualité du sol (31) ; Index de la qualité des sols (34) ; Structure de la végétation (35)	<input checked="" type="checkbox"/> Recharge des nappes	Piézométrie (19) ; Taux d'infiltration de l'eau dans les sols (28) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Structure de la végétation (35)
<input checked="" type="checkbox"/> Rétention des écoulements	Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Index de la qualité des sols (34) ; Structure de la végétation (35)	<input checked="" type="checkbox"/> Soutien d'étiage	Piézométrie (19) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Structure de la végétation (35)
<input type="checkbox"/> Fonctions biogéochimiques			

La cinquième et dernière partie de la grille de lecture présente la liste des indicateurs pour chaque SE sélectionné. Ces indicateurs organisés par catégorie de SE (biens produits par les écosystèmes, services culturels et services de régulation). Une fois encore, le numéro de chaque indicateur s'affiche afin de le retrouver facilement dans la base de données des indicateurs socio-économiques.

5 Les services écosystémiques ciblés par la restauration écologique	
<p>Selon les réponses données ci-dessus, certains services ont été automatiquement cochés. Si ces services ne sont pas prioritaires, il est possible de les décocher manuellement.</p> <p>Pour les services non cochés, il est possible d'aller affiner l'analyse et de les cocher manuellement en fonction des enjeux de la restauration mise en oeuvre.</p>	
<input checked="" type="checkbox"/> Biens produits par les écosystèmes	
<input checked="" type="checkbox"/> Approvisionnement en eau douce (point de prélèvement sur site ou en aval)	Prélèvement en eau en aval destinée à la consommation humaine (1) ; Prélèvement en eau en aval destinée à l'agriculture ou à l'industrie (2) ; Prélèvement en eau in situ destinée à l'agriculture ou l'industrie (3)
<input checked="" type="checkbox"/> Ressources médicinales	Production de ressources médicinales (7)
<input checked="" type="checkbox"/> Produits de la ruche	Production de produits de la ruche (8)
<input type="checkbox"/> Services culturels	
<input checked="" type="checkbox"/> Produits de l'agriculture et de l'élevage	Production de fourrage et de dérivés issues de cultures vivrières (4) ; Production de dérivés issues de l'élevage (5)
<input checked="" type="checkbox"/> Produits de la cueillette	Production de denrées issues de la cueillette (6)

Les deux feuilles accompagnant la grille de lecture dans le tableur Excel présentent chaque indicateur lié aux fonctions et socio-économiques. Ces indicateurs sont également présentés dans les sections qui suivent. Des informations sont données sur leur interprétation, coûts et complexité d'interprétation. Ainsi, une fois les indicateurs obtenus pour chaque fonction/service écosystémique retenu, il est ensuite possible de sélectionner l'indicateur optimal au regard du budget et de la complexité de l'indicateur.

La grille de lecture proposée est présentée schématiquement ci-dessous (Figure 12).

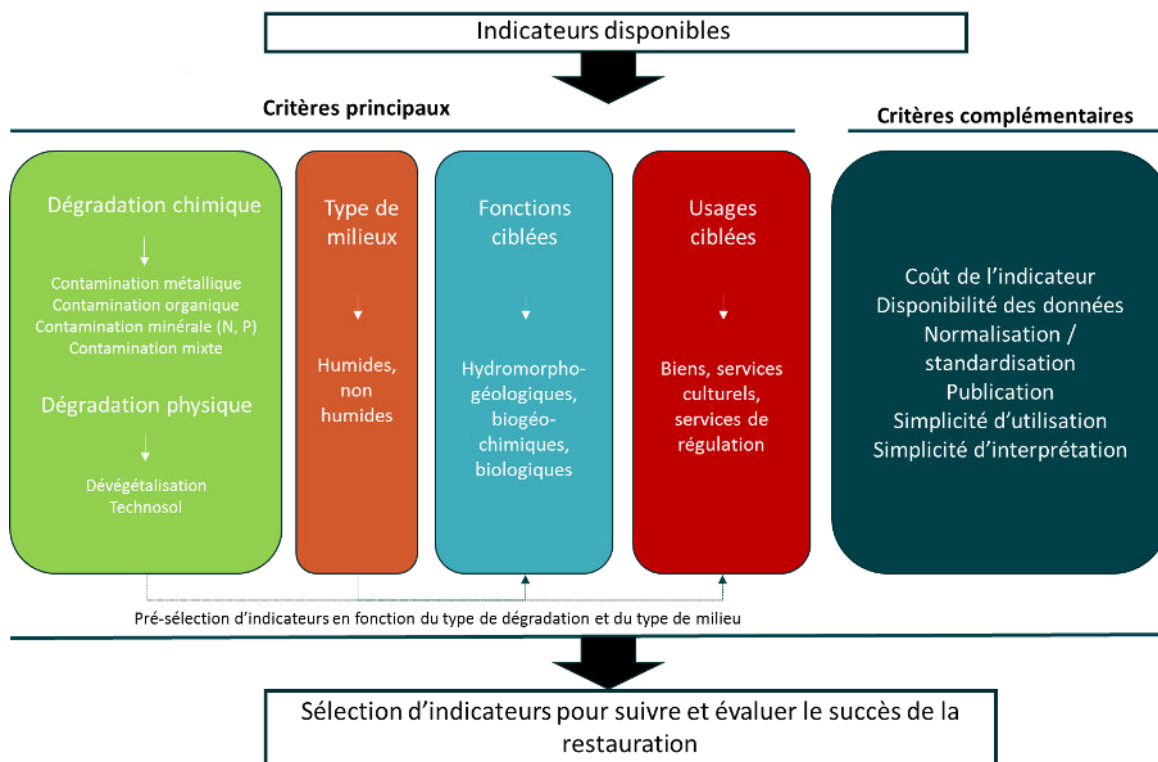


Figure 12 : Présentation schématique de la grille de sélection des indicateurs.

La section suivante présente les indicateurs recensés dans la grille de lecture (indicateurs liés aux fonctions). (Section 3.4). Les indicateurs socio-économiques sont par la suite proposés en section 3.5 avec au préalable un rapide rappel sur l'intérêt de l'évaluation des SE dans le cadre de la restauration écologique.

3.4 Inventaire des indicateurs associés aux fonctions

3.4.1 INDICATEURS ASSOCIES COMPARTIMENT SOUTERRAIN

Le sol est issu de l'altération des couches superficielles de la roche mère auquel s'incorpore la matière organique. La capacité d'un sol à réaliser ses fonctions est intimement lié à ses propriétés physico-chimiques et biologiques (Tableau 3). On peut distinguer d'une part les propriétés inhérentes aux sols, c'est-à-dire définies par la nature de la roche mère, le climat ou la topographie, telles que la texture, la minéralogie ou la profondeur et qui sont utilisés pour qualifier différents usages du sol (Seybold et al 1999). Ils sont constants à échelle de temps humaine (Robinson et al 2009). D'autre part, on peut qualifier de paramètres dynamiques les propriétés du sol tels que la teneur en matière organique, la disponibilité des nutriments, les activités biologiques, la structure des communautés ou encore la teneur en polluants plus ou moins disponibles (Obriot et al 2016). Ces paramètres biotiques ou abiotiques permettent d'évaluer l'impact des plans de gestion des sols et peuvent être rapidement modifiés par les activités humaines.

Tableau 3. Liste des propriétés des sols reliés aux services écosystémiques ou fonctions de support et de régulation (Extrait d'Adhikari et al, 2016).

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

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

Dans le présent rapport, nous nous sommes efforcés de lister les indicateurs et indices de qualité connus les plus pertinents dans le cadre d'une restauration de milieux humides ou prairiaux spécifiquement.

Le tableau 4 liste un ensemble d'indicateurs qui permettent d'évaluer l'état biologique du sol, de caractériser ses propriétés physico-chimiques, ou encore d'évaluer le risque de transfert de contaminants vers le compartiment biologique. Bien que ces indicateurs soient individuellement révélateurs d'un état du sol ou d'un risque de transfert de polluants et qu'en fonction d'une question ou problématique donnée l'on peut y recourir (voir l'outil de « comment choisir ses indicateurs » mis au point par le projet Bioindicateurs II de l'ADEME <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/dev.php>), il est également intéressant d'intégrer un ensemble de paramètres du sol et d'indicateurs biologiques pour mesurer une fonction du sol, par exemple « l'activité biologique » ou « les propriétés chimiques du sol ».

Pour cela plusieurs études ont proposé des indices reflétant une fonction du sol ou sa « qualité » en lien avec un usage précis. Ces indices multiparamétriques (également présenté dans le tableau 4)

sont généralement construits sur la base d'un choix initial d'une liste de paramètres/indicateurs minimum, sur avis d'expert, ou construite par le biais d'une approche statistique. Cependant il n'existe à ce jour pas de consensus sur cette base de données minimale (BDM) (Morvan et al., 2008), ni de liste universelle d'indicateurs applicables dans toutes les régions pour tous les usages (Seybold et al., 1999).

Dans le cadre de cette étude, nous avons sélectionné les travaux qui se sont basés sur une base de données minimale et ont utilisé différentes approches d'intégration de plusieurs paramètres physico-chimiques ou biologiques pour mesurer une fonction particulière du sol dans un cadre donné (usage, climat). Cette liste n'est pas exhaustive, nous n'y avons pas inclus tous les indices de qualité du sol issus du monde agricole qui sont souvent en lien avec une espèce cultivée bien particulière.

3.4.2 INDICATEURS ASSOCIES AU COMPARTIMENT AERIEN

A l'image du compartiment souterrain, le compartiment aérien (végétation et macrofaune) peut faire l'objet de différents relevés et indicateurs afin d'évaluer si la trajectoire observée répond aux objectifs initiaux de réhabilitation ou de restauration.

Les indicateurs proposés dans le cadre de cette étude se basent sur des suivis reproductibles des espèces et des communautés végétales et animales présentes par placette échantillon (Tableau 4). Certains indicateurs dans leur calibration renseignent sur les conditions édaphiques du site (par exemple le degré d'engorgement d'un sol de zones humides), d'autres permettent de vérifier si la composition végétale ou animale observée est indicatrice d'un milieu ou plutôt d'une trajectoire écologique qui correspond aux objectifs visés. Ces derniers se basent en général sur une comparaison avec des milieux référentiels ou sur un assemblage structurel (par exemple, recouvrement en graminée) ou qualitatif (cortèges de couleurs de papillon révélateur d'un paramètre donné comme par exemple le degré d'eutrophisation, l'état d'une pelouse ou d'une prairie, la qualité de la gestion par fauche ou pâturage etc).

Les taux de recouvrement de la couverture végétale, combinés aux l'indicateurs « graminées », « fermeture du milieu » et « structure de la végétation »²⁸ renseignent sur le degré de pression d'entretien et permettent d'évaluer la bonne trajectoire d'une réhabilitation ou d'une restauration ayant pour objectif l'obtention d'une pelouse ou d'une prairie assez équilibrée et riche en espèces. Ils sont associés à l'indicateur « qualité de la végétation » qui compare l'association des espèces du relevé aux milieux herbacés de référence alentours et à l'indicateur « d'eutrophilie » pour estimer la qualité de la trajectoire partant d'un état eutrophe et rudéral à un état souhaité mésotrophe avec un cortège à fort pourcentage de typicité de pelouse ou de prairie. Les indicateurs liés aux espèces animales (lépidoptères, orthoptères etc.) viennent alors compléter le diagnostic qui se base sur des pourcentages d'espèces indicatrices de tel ou tel état par rapport à l'ensemble des espèces des relevés par placettes.

Enfin, certains indicateurs contribuent à évaluer une fonction donnée comme par exemple la rétention/transformation des polluants ou encore la stabilisation des sols.

A noter :

Pour certains indicateurs, des protocoles complémentaires à ceux existants dans la littérature sont fournis en annexe 1 avec des exemples de liste d'espèces pouvant être retenues lors de la phase de calibration.

²⁸ Ces indicateurs nécessitent de réaliser les études de terrain à la saison favorable.

Remarque

Nous n'avons pas retenu les indicateurs dont la finalité principale est d'établir un indice de qualité biologique ou écologique (IQE de Delzons et al., 2013) basé essentiellement sur la diversité des espèces, des cortèges et des habitats (macro et micro), la patrimonialité et la fonctionnalité.

Ce type d'indicateur est intéressant pour évaluer la qualité globale d'un site assez grand, mais permet difficilement d'évaluer la trajectoire de résilience ou de restauration. Il part en effet du principe que la diversité en espèces d'un site est positivement corrélée à la qualité des milieux. Cependant plusieurs facteurs peuvent influencer la diversité d'un site, même encore fortement marqué par l'anthropisation, comme la multiplicité de micro-habitats (murets, mares, tas de bois, tas de pierre, cabanons, pose de nichoirs etc.) issus d'une intervention gestionnaire plus ou moins poussée, son évolution dans le temps en fonction des actions de gestion, la pression et la qualité des observations etc. Les résultats obtenus au travers de ce type d'indicateurs dépendent également des groupes étudiés. Sur des endroits fortement perturbés, l'installation des cortèges végétaux suit en général une tendance naturelle et spontanée vers un appauvrissement du nombre d'espèces. La diversité spécifique est souvent plus élevée les premières années suivant une réhabilitation qu'après une longue période de plusieurs dizaines d'années. Beaucoup d'espèces annuelles ou bisannuelles pionnières disparaissent, en effet, avec la stabilisation du recouvrement par les graminées vivaces. En l'absence de gestion maintenant un équilibre, l'évolution naturelle conduit ensuite à une stabilisation du couvert herbacé haut et dense, dominé par les glumiflores (graminées, carex et joncs) et laissant peu de place aux petites espèces à fleurs comportant des pétales. La diversité végétale décroît alors naturellement. Les espèces animales associées suivent aussi. On voit ainsi que le paramètre « diversité » dépend beaucoup du type de milieu, du mode de gestion pratiquée, et de la diversité des conditions écologiques offertes sur un espace donné dont les limites sont par ailleurs variables. Il est donc difficile en effet de comparer des sites de quelques dizaines d'hectares et des sites beaucoup plus grands.

3.4.3 LISTE DES INDICATEURS ASSOCIES AUX FONCTIONS

Tableau 4 : Liste des indicateurs biologiques et physicochimiques 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 tableur (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		Fonctions hydromorphologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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											
1	Densité et des vers de terre	X	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 grumeleuse 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 escargots SET	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	X	X		X	X	A partir d'un référentiel (ELISOL®), 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	+++	€	+++	+++	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 in vitro (NF ISO 10872)

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		Fonctions hydromorphologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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											
	(IVD)							importante et satisfaisante. Cet indicateur est sensible aux perturbations chimiques (métalliques, organiques ou minérales) ainsi qu'aux modes d'exploitation agricole.					
4	Les microarthropodes du sol	X	X		X	X	Une perturbation diminue le nombre et la diversité des microarthropodes du sol.	Bio-indicateur d'effet. Facile à mettre en œuvre et sensible aux modes de gestion, nécessitent une expertise spécifique.	++	€	++	++	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php Protocoles de prélèvement normalisés (ISO 23611-2:2004).
5	Expression génique de la métallothionine (MT) par les vers de terre	X	X		X		Indicateur de la biodisponibilité du cadmium (et potentiellement d'autres métaux lourds)	Révélateur de la présence de métaux biodisponibles, du cadmium en particulier	+	€	+++	++	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php
6	Indice CMT végétaux	X	X		X		L'indice reflète les écarts des distributions en éléments traces métalliques entre les parcelles témoins et contaminées, selon sa valeur on peut déterminer s'il y a absence de transfert anormal (aucune préconisation), transfert faible à modéré (mise en place d'une surveillance) ou un transfert élevé (zone à risque nécessitant des mesures de gestion).	Contamination métallique, évaluation du risque de transfert du sol vers les végétaux	++	€	+	+	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php ADEME (2017).

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		Fonctions hydromorphogéologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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											
7	Bioaccumulation des éléments métalliques par les micromammifères	X	X		X		Nécessite un référentiel global faisant appel à une base de données disponibles dans des publications scientifiques.	Contamination métallique. Cette méthode est assez récente en biosurveillance et nécessite à ce jour le sacrifice des individus. De plus l'approche nécessite une définition plus précise des référentiels d'interprétation. C'est donc une méthode à réserver à des cas d'études spécifiques ou l'accumulation de métaux est un élément important du suivi/diagnostic de site		€€	+++	+++	Le calcul de l'excès de charge métallique nécessite de se référer à une base de données (initiation dans le cadre du projet Bioindicateurs II) https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php
8	Indice Omega 3	X	X		X		L'indice Oméga-3 diminue en présence de contaminants. Les données acquises sont à interpréter par rapport à une situation de référence (ne peut pas être utilisé pour déterminer la qualité intrinsèque d'un sol provenant d'une zone spécifique). Cet indice est un outil de comparaison et doit obligatoirement comparer au moins deux zones d'étude ayant les mêmes caractéristiques climatiques.	Contamination organique et métallique	+++	€	+	+	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php ADEME (2017) L'utilisation de la méthode sur l'espèce modèle <i>Lactuca sativa</i> cultivées sur un échantillon de sols à tester en conditions contrôlées au laboratoire est normée (norme AFNOR XP X31-233)
9	Activités enzymatiques du sol	X	X		X		Chacun de ces enzymes est impliquée dans un cycle biogéochimique (N, C, P, S). Ils donnent donc une vision sur l'ensemble de ces cycles de manière très sensible et très sélectif. Leur interprétation doit être faite en lien avec un référentiel ou en lien avec un échantillon témoin avoisinant.	Pertinent dans le cadre d'une dégradation physique ou chimique des sols afin de s'assurer d'une meilleure fonctionnalité suite à la mise en œuvre des mesures de restauration.	+++	€	+	+	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php Une norme est en cours de développement sur les méthodes de mesure des activités enzymatiques dans les sols (ISO/FDIS 20130 Soil quality -- Measurement of enzyme activity patterns in soil

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		Fonctions hydromorphologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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											
													samples using colorimetric substrates in micro-well plates)
10	Respirométrie (Oxitop®)	X	X		X		Activité globale du sol soulignant son niveau de fonctionnalité. Son interprétation doit être faite en lien avec un référentiel.	Pertinent dans le cadre d'une dégradation physique ou chimique des sols afin de s'assurer d'une meilleure fonctionnalité suite à la mise en œuvre des mesures de restauration.	+++	€	+	+	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php Le système Oxitop® control est une marque déposée (WTW, Weilheim, Allemagne). Le système, ainsi que les protocoles de mesure, sont disponibles auprès du fournisseur et des distributeurs. Ils ont fait l'objet de procédures de normalisation ; Normes ISO 16072 : 2002 et DIN 19 737.
11	Biomasse moléculaire microbienne	X	X		X		Activité globale du sol soulignant son niveau de fonctionnalité. Son interprétation doit être faite en lien avec un référentiel local ou national (MicroSol database®).	Sensible, robuste et indicateur précoce d'une perturbation des sols (physique ou chimique).	+++	€	+	+	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php Plateforme GenoSOI (INRA Dijon) L'extraction d'ADN est une méthode normalisée (ISO 11063) et l'indicateur biomasse moléculaire microbienne est une méthode standardisée
12	Empreinte moléculaire des communautés microbiennes (bactéries et champignons)	X	X		X	X	Ces indices témoignent de la diversité des microorganismes dans le sol. Leur interprétation doit être faite en lien avec un référentiel local.	Sensible à une perturbation physique ou chimique, il peut révéler une réduction de la diversité sous l'effet d'un impact (à partir de calculs d'indices de diversité type Shannon, Simpson)	+++	€€€	+++	+++	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php Plateforme GenoSOI (INRA Dijon) L'extraction d'ADN est une méthode normalisée (ISO 11063) et l'indicateur empreinte moléculaire des communautés microbiennes (bactéries et champignons) est une méthode standardisée.
13	Diversité taxonomique microbienne	X	X		X	X	Plus précis que l'empreinte moléculaire seule, il donne une vision très complète des genres présents dans le sol, et donc des indices de	Pertinent dans le cadre d'une dégradation physique ou chimique des sols afin de	+++	€€€€	+++	+++	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		Fonctions hydromorphologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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											
							diversité, ces approches de pointe sont en perpétuelle évolution et développement	s'assurer d'une meilleure fonctionnalité suite à la mise en œuvre des mesures de restauration.					Plateforme GenoSOI (INRA Dijon) L'extraction d'ADN est une méthode normalisée (ISO 11063) et l'indicateur diversité taxonomique microbienne est une méthode standardisée
14	Diversité métabolique potentielle	X	X		X		Approche globale d'évaluation de l'activité potentiel de communautés microbiennes en place. En comparaison à un référentiel local non impacté, il révèle la diversité métabolique du sol.		++	€€	+	+	https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/fiches-outils.php
15	Gènes de fonction	X	X		X		Méthode indirecte pour des mesures d'abondance et d'activité potentielle, soit de la communauté bactérienne globale (en ciblant le gène codant l'ARNr 16S) soit des gènes impliqués dans des cycles biogéochimiques spécifiques (azote, carbone) ou dans la dégradation ou transformation de certains polluants. Un horizon humifère épais (en superficie) traduit un stockage important du carbone dans les sols. Les horizons très organiques sont également favorables à la rétention de l'eau (soutien d'étiage). L'augmentation de l'épaisseur de cet horizon organique témoigne d'une amélioration du fonctionnement général du site notamment si initialement les sols étaient dégradés (technosol, contamination chimique).		+++	€€	+++	+++	
16	Episolum humifère en surface	X	X		X				+	€	+	+	http://www.onema.fr/node/3981 Indicateur développé pour les zones humides mais applicable dans d'autres contextes. Indicateur standardisé à l'échelle nationale

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		Fonctions hydromorphologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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											
17	Niveau d'hydromorphie	X		X			Plus la note d'hydromorphie est importante, plus la saturation en eau du sol est importante. Une diminution de cette note traduit donc un assèchement de la zone humide. Plus l'hydromorphie est marquée, plus les fonctions telles que la dénitrification ou encore le soutien d'étiage sont favorisées. De manière générale, l'engorgement des sols a une incidence sur la fonctionnalité globale de la zone humide	Pertinent dans le cadre de la restauration d'une zone humide.	+++	€	+	++	http://www.onema.fr/node/3981 Indicateur standardisé à l'échelle nationale
18	Niveau d'humidité du sol	X		X			Plus le niveau d'hydromorphie est important, plus la saturation en eau du sol est importante. Une diminution de cette note traduit donc un assèchement de la zone humide. Plus l'hydromorphie est marquée, plus les fonctions telles que la dénitrification ou encore le soutien d'étiage sont favorisées. De manière générale, l'engorgement des sols a une incidence sur la fonctionnalité globale de la zone humide	-	+++	€€	++	++	http://rhomeo-bao.fr/?q=indicateurs Indicateur standardisé sur le bassin Rhône-Méditerranée (en cours sur d'autres secteurs géographiques, notamment sur le bassin de la Loire)
19	Piézométrie	X		X			Les variations de la nappe renseignent sur le fonctionnement hydrologique du site et par conséquent sur le niveau d'expression vraisemblable de certaines fonctions biogéochimiques (dénitrification, séquestration du carbone)	Pertinent dans le cadre de la restauration d'une zone humide.	+++	€€ / €€€	+	++	http://rhomeo-bao.fr/?q=indicateurs Indicateur standardisé sur le bassin Rhône-Méditerranée (en cours sur d'autres secteurs géographiques, notamment sur le bassin de la Loire)
20	Fertilité des sols	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		++	€	+	+++	Obriot et al., 2016

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		Fonctions hydromorphologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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												
21	Biodiversité des sols	X	X		X	X	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.	Indices pertinents pour évaluer la qualité globale des sols	++	€€€	+++	+++	Obriot et al., 2016	
22	Activités biologiques du sol				X	X			++	€€	++	+++	Obriot et al., 2016	
23	Propriétés physico-chimiques du sol	X	X	X	X				Pertinent dans le cadre d'une dégradation physique des sols afin de s'assurer d'une meilleure structure suite à la mise en œuvre des 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
25	Contaminants disponibles	X	X		X				Pertinent dans le cadre d'une contamination chimique pour évaluer des risques de transferts et biodisponibilité des contaminants	++	€	+	+++	Obriot et al., 2016

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		Fonctions hydromorphologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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											
26	Stock de carbone dans les plantes	X	X		X		Estimation de la biomasse à partir de mesures de diamètres des arbres/arbustes dans des parcelles réduites et des données disponibles pour les espèces présentes	Pertinent si la restauration vise à une production de biomasse végétale et au stockage de carbone	+	€	+	++	Clec'h et al. (2016), Grimaldi et al. (2014)
27	Stock de carbone des sols	X	X		X		Calcul de la teneur moyenne en C par ha de sol	Tous milieux	++	€	+	++	Clec'h et al. (2016), Grimaldi et al. (2014)
28	Taux d'infiltration de l'eau dans les sols	X	X	X	X		La vitesse d'infiltration d'eau dans les sols renseigne sur la capacité du site à ralentir les ruissellements, à recharger les nappes. Cette caractéristique donne également des indications sur la qualité générale des sols.	Tous milieux	++	€	+	++	Clec'h et al. (2016), Grimaldi et al. (2014)
29	Indice de la qualité chimique du sol	X	X		X		Statistique : détermination d'un indice de qualité à partir de l'analyse par analyse en composantes principales (ACP) des données (selon Velasquez et al 2007)	Pertinent pour évaluer la qualité agronomique d'un sol restauré	++	€	+	++	Clec'h et al. (2016), Grimaldi et al. (2014)
30	Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile	X	X	X	X		Statistique : modèle de régression linéaire pour déterminer les capacités de rétention d'eau des sols puis la réserve utile aux plantes comme étant le volume d'eau drainé entre 30 et 16 kPa	Tous milieux en théorie	++	€	+	++	Clec'h et al. (2016), Grimaldi et al. (2014)
31	Indice de qualité physico-chimique du sol (RSQI - Relative Soil quality Index)	X	X	X	X		Le calcul de cet indice pondère plusieurs paramètres physico-chimiques (Profondeur du sol, texture, pente, teneur en matière organique, N, C et K total et biodisponible, CEC et pH) selon leur importance relative pour la croissance végétale et selon 4 classes décrivant un mauvais, moyen, bon et très bon état des sols. L'indice permet soit une comparaison entre sols soit un suivi au cours du temps de la qualité du sol.	Evaluation des changements de qualité du sol dans des systèmes naturels ou agricoles	++	€	+	++	Wang and Gong (1998)

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		Fonctions hydromorphogéologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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											
32	Index d'altération des sols basé sur des activités enzymatiques	X	X		X		Cet index a été développé basé sur des données réelles puis testé sur différentes données publiées et a pu discriminer significativement des sols altérés (perturbés) de sols en bon état. L'interprétation repose sur la valeur de l'index, plus elle est basse plus le sol est dégradé (à comparer aux valeurs de la publication).	Qualité des sols agricoles contaminés par des contaminants d'origine industrielles ou d'eaux usés, une fertilisation organique ou irrigation avec de l'eau de mauvaise qualité	++	€	+	++	Puglisi et al. (2006)
33	Index d'altération des sols basé sur l'analyse des PFLA	X	X		X		Cet index a été développé sur la base de données réelles puis testé sur différentes données publiées et a pu discriminer significativement des sols altérés (perturbés) de sols en bon état. L'interprétation repose sur la valeur de l'index, plus elle est basse plus le sol est dégradé (à comparer aux valeurs de la publication)	Qualité des sols agricoles contaminés par des contaminants d'origine industrielles ou d'eaux usés, une fertilisation organique ou irrigation avec de l'eau de mauvaise qualité	++	€	++	++	Puglisi et al. (2005)
34	Index de la qualité des sols basé sur des propriétés physico-chimiques et biologiques	X	X	X	X		La mesure de cet indice est basée sur une somme de scores appliquée pour chacun des paramètres mesurés. Les valeurs obtenues sont à comparer avec un sol témoin ou dans le cadre d'un suivi au cours du temps Pelouses ou prairies : Bon état = spectre équilibré avec une dominance des herbacés vivaces (>50%). Trop grande proportion de sol nu, thérophytes (>30%) = état pionnier ou rudéral. % recouvrement ligneux >10% = Evolution de fermeture. Un important recouvrement est favorable à la protection contre l'érosion et à la stabilisation des sols.	Impact des différentes approches de préparation des sols sur la qualité des sols agricoles	++	€	++	++	Erkossa et al. (2007)
35	Structure de la végétation et recouvrement	X	X	X	X		Un important recouvrement est favorable à la protection contre l'érosion et à la stabilisation des sols.	Stabilisation de sols contaminés (exemple des crassiers)	++	€	+	+	Voir protocole proposé en annexe 1 (section végétation). Indicateur standardisé

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		Fonctions hydromorphologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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											
36	Qualité de la végétation	X	X			X	La proportion d'espèces caractéristiques du milieu correspondant à la trajectoire de réhabilitation par rapport au nombre d'espèces totales des relevés renseigne sur la qualité de la gestion mise en œuvre.	Milieux herbacés	++	€	++	+	http://spn.mnhn.fr/spn_rapports/archivage_rapports/2015/SPN%202015%20-%2043%20-%20EvalEChabagroV3_guideappli_Maciejewski_etal_2015.pdf
37	Fermeture du milieu	X	X			X	Le % de recouvrement ou la proportion d'espèces signe de fermeture du milieu renseigne sur la qualité de la gestion mise en œuvre.	Milieux herbacés	++	€	++	+	http://spn.mnhn.fr/spn_rapports/archivage_rapports/2015/SPN%202015%20-%2043%20-%20EvalEChabagroV3_guideappli_Maciejewski_etal_2015.pdf
38	Rareté des lisières	X	X			X	La fragmentation des milieux est néfaste à l'accomplissement du cycle de vie des espèces. Plus le linéaire d'écotone/lisière est faible sur le site, plus la fonction habitats d'espèce est potentiellement favorisée. A ne pas confondre avec la notion d'ourlet qui présente, si non dégradé, une superficie suffisante pour accueillir des espèces spécifiques à ces milieux d'interface.	-	?	€	+	+	http://www.onema.fr/node/3981 Indicateur développé pour les zones humides mais applicable dans d'autres contextes. Indicateur standardisé à l'échelle nationale
39	Similarité avec le paysage	X	X			X	Indicateur visant à vérifier le niveau de similarité des habitats du site avec ceux présents à proximité afin de maximiser la connectivité.	-	?	€	+	+	http://www.onema.fr/node/3981 Indicateur standardisé à l'échelle nationale

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		Fonctions hydromorphologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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											
40	Indicateur Odonates	-	X			X	<p>Mesure de la diversité spécifique (+ indice de Shannon et d'équitabilité) qui décroît avec l'augmentation des concentrations en nitrates, phosphates et ammonium (pollution minérale, voire métaux lourds). Indice de qualité à partir de 3 cortèges (tolérants, moyennement tolérants et sensibles), allant de 1 (faible), 2 (moyen), jusqu'au maximum de 3 (très fort)</p> <p>Evolution de la diversité et des espèces indicatrices de pollution par rapport aux espèces sensibles : une baisse du pourcentage d'espèces indicatrices indique une bonne trajectoire de résilience .</p>	Sites pollués par exemple	++	€€	+++	+++	<p>http://rhomeo-bao.fr/?q=indicateurs</p> <p>Attention : indicateur Rhomeo proposé pour évaluer une gestion conservatrice d'une bonne qualité. Nous proposons de tester un autre indice pour évaluer la trajectoire d'amélioration de la qualité des eaux et des habitats humides, basé sur quelques références : Clark et al., 1996 ; Hornung et Rice, 2003 ; Faton J.M., 2003 ; Masselot et Nel, 2003 ; D'amico et al., 2004 ; Catling, 2005 ; Foote et Hornung, 2005.</p> <p>Voir protocole proposé en annexe 1 (section odonates). http://odonates.pnaopie.fr/wp-content/uploads/2010/12/protocole-odonates-2011.pdf</p> <p><i>Indicateur standardisé à différentes échelles spatiales et pour différents territoires selon les protocoles proposés.</i></p>

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		Fonctions hydromorphologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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											
41	Indicateur Lépidoptères	X		X	X		Test de la qualité du milieu herbacé obtenu (eutrophe - avec une dominance des espèces "blanches" de type piéride - à mésotrophes témoignant du bon état du milieu herbacé associé à une diversité floristique et diversité maximale des couleurs de papillons - blanc et noir, orange, brun et bleus -), Diversité des espèces liée à la diversité d'habitats d'un site et de l'intensité du mode de gestion (fauche, pâturage) : plus la fauche ou le pâturage est intense, moins grande est la diversité par baisse de la diversité végétale. Catégorisation des cortèges relevés dans 4 types de liste : généralistes ubiquistes (milieu dégradé), moyennement généralistes, bonne proportion de spécialistes (milieu en bon état, restauration correcte), majorité de spécialistes et espèces rares (très bon état, restauration réussie)	Pelouses et prairies	++	€€	+++	++	http://spn.mnhn.fr/spn_rapports/archivage_rapports/2015/SPN%202015%20-%2043%20-%20EvalEChabagroV3_guideappli_Maciejewski_etal_2015.pdf Test à réaliser pour vérifier que cet indicateur peut fonctionner en zones humides Indicateur standardisé
42	Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie	X	X			X	La valeur de l'indicateur est corrélée positivement avec la disponibilité en nutriments (azote et phosphore). Cet indicateur permet de suivre la trophie des milieux présents. La proportion des espèces nitrophiles de valeur ≥ 7 , sur le nombre total donne également une indication de l'évolution positive ou négative d'une réhabilitation	Pertinent dans le cadre d'une dégradation physique ou chimique des sols (contamination minérale) afin de s'assurer d'une meilleure fonctionnalité suite à la mise en œuvre des mesures de restauration.	+++	€€	++	++	http://rhomeo-bao.fr/?q=indicateurs Attention : indicateur disponible pour le bassin Rhône-Méditerranée – Corse. http://spn.mnhn.fr/spn_rapports/archivage_rapports/2015/SPN%202015%20-%2043%20-%20EvalEChabagroV3_guideappli_Maciejewski_etal_2015.pdf Voir protocole complémentaire proposé en annexe 1 (section végétation). Indicateur standardisé à différentes échelles spatiales et pour différents territoires selon les protocoles proposés.

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		Fonctions hydromorphologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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											
43	Indicateur graminées	X	X			X	Trajectoire vers un recouvrement « maîtrisé » signe d'un équilibre du milieu au stade « pelouse » ou « prairie pâturée / fauchée ». % recouvrement en graminées hautes >50% : restauration / gestion défavorable 30% < recouvrement <50%, avec une diversité équilibrée entre graminées : état ou trajectoire satisfaisant < 30 % recouvrement, diversité élevée et en faveur des espèces florales : trajectoire bonne, voir autres indicateurs pour tester surpâturage	Utilisé dans le cas d'un mode de gestion par fauche ou pâturage.	++	€	+	+	Voir protocole proposé en annexe 1 (section graminée). Indicateur standardisé
44	Présence d'espèces végétales exotiques envahissantes	X	X			X	Moins le recouvrement par des espèces envahissantes est élevé, plus le site est en capacité d'accueillir une diversité d'espèces importante et jugé en bon état.	Perturbation et mise à nu des sols	+++	€	+	+	http://www.onema.fr/node/3981 http://spn.mnhn.fr/spn_rapports/archivage_rapports/2015/SPN%202015%20-%2043%20-%20EvalEChabagroV3_guideappli_Maciejewski_etal_2015.pdf Indicateur standardisé à différentes échelles spatiales selon les protocoles proposés
45	Indicateur floristique d'engorgement					X	La valeur de l'indicateur est corrélée positivement avec le niveau moyen annuel ou estival de la nappe : plus sa valeur est élevée, plus le niveau moyen de la nappe est proche de la surface (niveau d'engorgement important) et plus les fonctions telles que la dénitrification ou encore le soutien d'étiage sont potentiellement favorisées.	Restauration de zones humides	+++	€€	+++	++	http://rhomeo-bao.fr/?q=indicateurs http://www.ligero-zh.org/ligero Attention : indicateur disponible pour le bassin Rhône-Méditerranée – Corse et bassin de la Loire. Mais applicable à toute zone humide, y compris pour les prairies hygrophiles. Indicateur standardisé sur le bassin Rhône-Méditerranée (en cours sur d'autres secteurs géographiques, notamment sur le bassin de la Loire)

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides	Prairies non humides	Fonctions hydromorphologiques	Fonctions biogéochimiques	Fonctions biologiques	Interprétation	Pertinence dans le cas d'actions spécifiques	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte 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>
46	Humidité du milieu - orthoptères	X		X	X		L'indicateur définit un degré d'humidité moyen de la zone humide au niveau du sol et de la strate herbacée, à partir des peuplements d'orthoptères (criquets, sauterelles et grillons) observés par rapport à une liste d'espèces potentielles. Cet indicateur permet d'identifier des changements dans l'engorgement des sols mais également un isolement du site (déconnexion du réseaux).	Restauration de zones humides	+++	€€	+++	+++	http://rhomeo-bao.fr/?q=indicateurs Attention : indicateur disponible pour le bassin Rhône-Méditerranée – Corse. Voir protocole complémentaire proposé en annexe 1 (section orthoptère). Indicateur standardisé sur le bassin Rhône-Méditerranée

3.5. Inventaire des Indicateurs socio-économiques

3.5.1. SERVICES ECOSYSTEMIQUES : RAPPEL THEORIQUE

Classification des services écosystémiques

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

Elle distingue quatre catégories de services (Figure 13) :

- **Les services d’approvisionnement** : il s’agit des produits obtenus directement des écosystèmes pour l’alimentation (cultures, produits d’élevage, pêcheries, produits aquacoles, aliments sauvages, eau douce), l’énergie combustible (bois de chauffage, céréales pour la production d’éthanol), la fabrication de matériaux (bois d’œuvre, fibres) et la pharmacopée ;
- **Les services culturels** : les services culturels comprennent l’ensemble des 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, la prévention des risques naturels, la pollinisation, le traitement des déchets organiques et des polluants, etc ;
- **Les services de support** : ces services ne bénéficient pas directement à l’Homme mais conditionnent le bon fonctionnement des écosystèmes. Ces services peuvent inclure le recyclage des nutriments, la formation des sols, la production primaire de biomasse, etc.

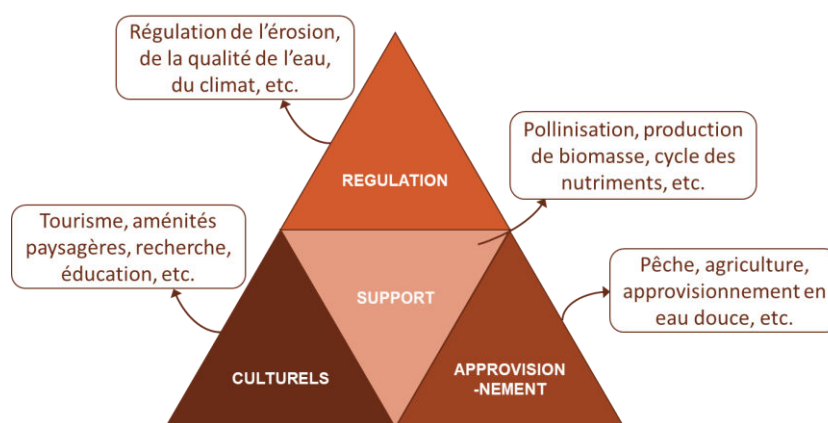


Figure 13 : Catégories de services identifiées par le Millenium Ecosystem Assessment et exemples de SE associés (MEA, 2005).

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

Beyou 2017). Contrairement au MEA, cette classification ne retient que trois catégories de biens et services :

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

L'EFESE considère en effet les services de support comme des fonctions écologiques. Par ailleurs, une partie des services culturels (au sens du MEA) ne sont plus assimilés à des services écosystémiques. En effet, certains d'entre eux reposant sur le 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 5).

Tableau 5 : 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	

L'évaluation économique des services écosystémiques

Les biens et services issus des écosystèmes (et indirectement de la biodiversité en tant que support de fonctionnement et de maintien de ces écosystèmes) sont assimilés à des biens économiques (Godard, 2005). Par conséquent, il est possible d'attribuer une valeur économique à ces biens et services.

Si l'on considère qu'il existe une corrélation entre d'une part la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes, et d'autre part la quantité et la qualité (ou même la stabilité) des biens et services procurés, alors estimer la valeur économique des biens et services écosystémiques est une approximation raisonnable de la « valeur économique des écosystèmes et de la biodiversité » pour le bien-être humain (Binet et al., 2012). La notion de « valeur économique de la biodiversité et des écosystèmes » mesure donc la valeur des services rendus ou le coût associé à la dégradation de ces services.

Cela implique par ailleurs que les efforts de conservation entrepris envers les écosystèmes et la biodiversité, comme par exemple les actions de restauration écologique, sont garants de la valeur des services procurés. A l'inverse, la disparition des écosystèmes et de la biodiversité engendre nécessairement la perte des biens et services écosystémiques dont ils sont le support. La valeur des écosystèmes et de la biodiversité est donc dépendante de l'état de santé des écosystèmes.

Ce lien logique entre les écosystèmes et l'existence d'une valeur économique est largement renseigné dans la littérature scientifique et a notamment été formalisé par les travaux du TEEB (*The Economics of Ecosystems and Biodiversity*), initiative internationale visant à caractériser la valeur économique des écosystèmes naturels et de la biodiversité et à l'intégrer dans les processus de

décision. Ces travaux ont notamment permis de développer des méthodes capables d'étendre l'évaluation monétaire au-delà des seuls services marchands. Ces méthodes permettent ainsi d'intégrer les externalités au calcul économique à travers diverses techniques d'évaluation (p. ex. : évaluation des coûts évités, des coûts de remplacement, des prix hédoniques²⁹, d'un consentement à payer pour un service par les usagers ou les riverains, etc.).

Les évaluations économiques des services écosystémiques ont fait l'objet de nombreux travaux ces dernières années. A l'échelle de la France et de l'Europe, certaines études font aujourd'hui référence (CGDD 2011 ; CAS 2006 ; MEA 2005 ; TEEB 2010). L'utilisation grandissante et constatée dans la littérature des évaluations de services écosystémiques témoigne de la pertinence de cet outil pour la prise en compte et la préservation de la biodiversité.

Dans le cadre de la restauration écologique, la mobilisation des évaluations de SE est en revanche beaucoup plus récente et anecdotique. Par ailleurs, les études engagées jusqu'à présent dépassent rarement le stade de la recherche (Sy M. 2016; Lespez *et al.* 2016). Cependant, l'évaluation par les SE dans les projets de restauration est un sujet émergent qui transparaît dans tous les débats récents (Lespez *et al.* 2016). Les utilisations qui peuvent en être faites sont présentées dans la partie suivante.

Utilisations des services écosystémiques dans le cadre de la restauration écologique

Les SE et leur évaluation peuvent être mobilisés à plusieurs fins. Ces finalités ont été qualifiées selon les trois catégories conceptualisées par Billé *et al.* (2012). Pour les auteurs, les études d'évaluation des services écosystémiques peuvent être conduites à des fins décisionnelles, techniques ou informatives, définies comme suit.

Dans les études à visée **décisionnelle** l'évaluation des SE va faciliter une décision bien identifiée. L'évaluation contribue ici à un processus dans lequel un choix doit être fait, *ex ante*, par un décideur confronté à plusieurs alternatives. Elle peut permettre aux parties prenantes de négocier et d'arriver à un compromis, proposer une analyse coût-avantage pour obtenir un optimal social, ou encore servir de critère de gestion environnementale.

L'objectif **technique** fait référence aux études menées après le choix d'une politique dans le but d'ajuster l'instrument économique qui va mettre en œuvre la décision. L'étude peut par exemple établir des niveaux de compensation de dommages ou déterminer des prix d'entrée pour l'accès à des espaces naturels protégés en se basant sur le consentement à payer des visiteurs.

Les études à visée **informatif**, cherchent, quant à elles, à fournir des informations destinées à influencer indirectement une prise de décision. Ici, on ne s'attend pas à ce que l'évaluation de services écosystémiques détermine un choix par rapport à une décision spécifique, mais plutôt qu'elle contribue aux discussions, modifie les points de vue et démontre l'intérêt de certaines options politiques. Le but est donc de sensibiliser voire convaincre, de justifier un choix déjà établi ou bien encore de créer des indicateurs permettant aux décideurs ou à l'opinion publique de rester informés de l'état du capital naturel.

Dans le cadre de la restauration écologique, l'évaluation des SE peut être utilisée dans un but décisionnel ou informatif. La prise en compte des SE permet tout d'abord de contribuer à une meilleure compréhension de la complexité des processus et des relations entre écosystèmes et usages. 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.

²⁹ Méthode d'évaluation reposant sur l'analyse de la formation du prix d'un bien immobilier en fonction de ses attributs environnementaux.

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.

La restauration écologique telle qu'elle est réalisée aujourd'hui passe avant tout par la restauration de l'écosystème endommagé. Cependant, elle ne garantit pas forcément le rétablissement des fonctions écologiques ni des SE associés à cet écosystème. L'approche holistique et systémique des SE permet en revanche de rétablir le lien entre l'écosystème et l'Homme. Par ailleurs, son utilisation peut être un moyen de guider la restauration écologique d'un site vers un usage spécifique dans le but de maximiser la contribution des actions de restauration à l'augmentation du capital naturel et des services écosystémiques.

3.5.2. REVUE DES INDICATEURS DE SE

Cette partie vise à identifier les indicateurs opérationnels quantitatifs qui pourraient témoigner du succès des opérations mises en œuvre en termes de rétablissement des SE. Ces indicateurs pourront, par la suite, être mobilisés dans le cadre d'une évaluation économique des SE (non abordée dans cette étude).

La prise en compte des SE dans le contexte de la restauration écologique étant encore au stade des prémices, aucun indicateur permettant leur quantification ne semble avoir été construit à ce jour. Dans un cadre plus large, de nombreuses études relatives à la construction d'indicateurs de SE ont, en revanche, été menées. Les travaux de Maes et al., (2016), visant à décrire le développement d'un cadre d'indicateurs pour l'évaluation des écosystèmes dans l'Union Européenne, ont ainsi recensé 327 indicateurs de SE. Ces indicateurs ont ensuite été classés en fonction des différentes catégories de services, du type de milieu concerné mais également en fonction de leur qualité d'indicateur (Figure 14).

Ainsi parmi ces indicateurs, seuls 64 ont été jugés de bonne qualité selon une notation basée sur la disponibilité des données et la capacité de transmettre des informations aux processus d'élaboration des politiques et de mise en œuvre.

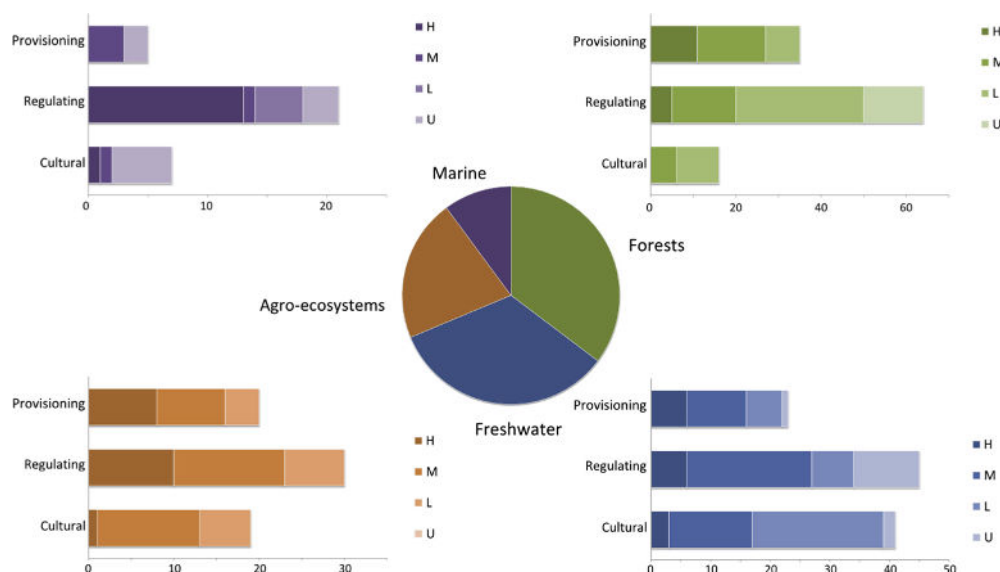


Figure 14 : Nombre et classification des indicateurs proposés pour cartographier les services écosystémiques dans l'UE. Les lettres se réfèrent à la qualité des indicateurs : H=haute ; M=moyenne ; L=faible ; U=inconnue (Maes et al., 2016).

La figure 14 permet d'identifier quelques lacunes parmi le panel d'indicateurs existants. Il est notamment intéressant de remarquer que les indicateurs cherchant à évaluer les écosystèmes marins et agricoles sont beaucoup moins nombreux que ceux relatifs aux écosystèmes humides ou forestiers. On note également que les services culturels sont bien moins couverts que les services de régulation. Par ailleurs, ils sont pour la plupart de qualité moyenne ou faible.

Dans les tableaux ci-dessous (Tableaux 6 et 7), les indicateurs de bonne qualité relatifs aux écosystèmes prairiaux et aux zones humides ont été répertoriés afin de constituer une base solide pour la construction de nos indicateurs de SE. Il est néanmoins important de préciser que ces indicateurs sont souvent conçus pour mener des évaluations à grande échelle. Ils devront donc être adaptés au contexte plus local de la restauration écologique (voir parties 3.5.3 et 3.5.4).

Tableau 6 : Indicateurs de haute qualité pour les services écosystémiques des zones humides, (Maes al., 2016).

Division	Groupe	Classe	Indicateur
Matériaux	Biomasse	Fibres et autres matières provenant de plantes, d'algues et d'animaux destinés à être utilisés ou transformés directement	Bois produit (tonnes ou volume) par forêt riveraine
			Surface des forêts humides exploitées et roseaux
	Eau	Eau de surface utilisée à d'autres fins que pour boire	Surface des zones sujettes aux inondations
Médiation des flux	Flux de liquide	Protection contre les inondations	Zones inondables (et enregistrement des inondations annuelles)
			Superficie des zones humides situées dans les zones à risque d'inondation
Entretien des conditions physiques, chimiques et biologiques	Conditions de l'eau	Etat chimique des eaux douces	Statut chimique
Interactions physiques et intellectuelles avec le biote, les écosystèmes et les paysages terrestres et marins	Interactions intellectuelles et représentatives	Educatif	Parcs nationaux et sites Natura 2000
		Esthétique	Proximité des zones urbaines des rivières ou des lacs pittoresques

Tableau 7 : Indicateurs de haute qualité pour les services écosystémiques des cultures et prairies, (Maes et al., 2016).

Division	Groupe	Classe	Indicateur Cultures	Indicateur Prairies
Nutrition	Biomasse	Cultures cultivées	Rendements des cultures vivrières et fourragères (tonne/ha, tonne de matière sèche/ha, MJ/ha)	Rendements (tonne/ha, tonne de matière sèche/ha, MJ/ha)
			Superficie des cultures vivrières et fourragères (ha)	Superficie des prairies (ha)

Division	Groupe	Classe	Indicateur Cultures	Indicateur Prairies
		Animaux élevés et leurs produits	Données sur le bétail (nombre/ha, tonne/année/région)	
	Eau	Eau de surface pour boire	Terres agricoles à haute valeur naturelle	
Matériaux	Biomasse	Fibres et autres matières provenant de plantes, d'algues et d'animaux destinés à être utilisés ou transformés directement	Rendements des cultures de fibres (tonne/ha, tonne de matière sèche/ha, MJ/ha)	
			Superficie des cultures de fibres (ha)	
Médiation des flux	Débit de masse	Stabilisation de masse et contrôle des taux d'érosion	Risque d'érosion des sols	
	Flux gazeux/d'air	Ventilation et transpiration	Quantité de biomasse	
Entretien des conditions physiques, chimiques et biologiques	Maintien du cycle de vie, protection de l'habitat et du pool génétique	Pollinisation et dispersion des graines	Pollinisation potentielle	
		Maintenir les populations de pépinières et les habitats	Part des terres agricoles à haute valeur naturelle	
	Formation et composition du sol	Processus d'altération	Teneur en matière organique du sol	
			pH de la terre végétale	
			Capacité d'échange cationique	
	Processus de décomposition et de fixation	Superficie de N cultures fixatrices		
Conditions de l'eau	Etat chimique des eaux douces	Etat chimique		
Interactions physiques et intellectuelles avec le biote, les écosystèmes et les paysages terrestres et marins	Interactions physiques et expérientielles	Utilisation physique des paysages terrestres et marins dans différents contextes environnementaux	Nombre d'entreprises rurales offrant des services liés au tourisme	

On remarque, en toute logique, que de nombreux indicateurs présentés ci-avant sont intimement liés aux fonctions écologiques dont dépendent les SE. Ces derniers dépendent en effet du bon fonctionnement des processus biophysicochimiques sur lesquels ils s'appuient. Il est d'ailleurs tout à fait envisageable de mener une évaluation des fonctions et des SE simultanément, tout particulièrement lorsqu'il s'agit d'évaluer les services de régulation. Cependant, rappelons que pour qu'un SE puisse exister il est impératif d'identifier un bénéficiaire. L'évaluation des SE à travers les indicateurs doit donc tenir compte de la présence de bénéficiaires. Or, aucun des indicateurs proposés dans les différentes sources bibliographiques analysées (Grimaldi et al., 2014; INRA, 2017; Maes et al., 2016; Office fédéral de l'environnement, 2011; Walter et al., 2015) ne tient compte de ce critère. Cette étude propose donc d'intégrer ce critère aux indicateurs de SE afin de s'assurer que le lien entre fonction écologique et usage des populations humaines soit rétabli.

3.5.3. CONSTRUCTION DES INDICATEURS SOCIO-ECONOMIQUES

Nous cherchons à travers cette étude, à construire un panel d'indicateurs de SE (ou socio-économiques) répondant à plusieurs critères :

- Les indicateurs doivent couvrir les principaux SE rendus par les milieux prairiaux et les zones humides ;
- Ils doivent prendre en compte la présence de bénéficiaires ;
- Ils doivent s'adapter au contexte de la restauration écologique ;
- Ils doivent pouvoir être facilement utilisés par des économistes de l'environnement afin de mener si nécessaire une évaluation économique de SE.

Afin de construire ces indicateurs, une revue de littérature a tout d'abord été menée pour tenter de lister de manière exhaustive les SE rendus par les milieux prairiaux et les zones humides. A partir de ces services, les bénéficiaires potentiels de chacun de ces services sont ensuite identifiés. La liste des SE et des bénéficiaires associés est présentée en Annexes 2 et 3. Les indicateurs de SE tentent de couvrir l'ensemble de ces SE.

La construction des indicateurs s'appuie sur la typologie de SE proposée par l'EFESE. L'utilisation de cette typologie permet en effet d'éviter les redondances avec les indicateurs de fonctions écologiques qui couvrent déjà les SE de support. Par ailleurs, elle ne prend pas en compte les services culturels reposant sur des valeurs de non-usage³⁰, qu'elle considère comme patrimoine naturel. En ce sens, les services culturels sont ainsi associés à un usage direct avec ou sans prélèvement (ex : sports de nature, tourisme vert, chasse, pêche de loisirs, attractivité touristique, connaissances scientifiques, etc.) alors que le patrimoine naturel, correspondant aux services spirituels dans la typologie du MEA, renvoie aux valeurs de spiritualité, d'identité et d'identification. L'exclusion de ces SE dans la typologie de l'EFESE est en cohérence avec les travaux de Maes et al. (2016) qui jugent la qualité de la plupart des indicateurs associés à ces SE comme étant faible. Les indicateurs de SE construits dans cette étude sont donc classés selon les trois catégories suivantes :

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

Chacun des indicateurs de SE présentés dans l'étude est créé après avoir répondu aux six questions exposées dans la figure ci-dessous. Ces questions ont été proposées par l'Office Fédéral de l'Environnement suisse (OFEV) dans le but de créer une liste d'indicateurs de biens et services écosystémiques en relation directe avec le bien-être et sont en parfait accord avec les besoins de calibrage évoqués en amont (Figure 15).

³⁰ Les valeurs de non-usage font référence à des actifs qui ne seront jamais utilisés. Elles regroupent les valeurs d'existence, les valeurs altruistes et les valeurs d'héritage.

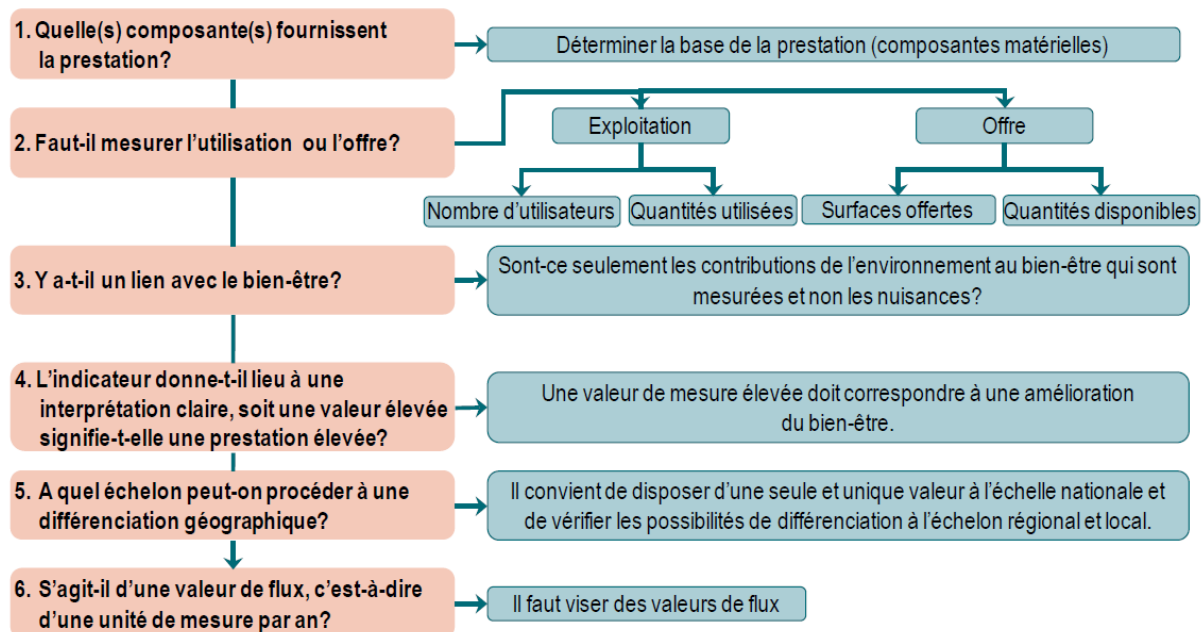


Figure 15 : Questions à se poser avant de sélectionner ou construire un indicateur spécifique (Office fédéral de l'environnement, 2011).

La prise en compte des bénéficiaires des SE par les indicateurs socio-économiques est rendue possible grâce à la grille de lecture, présentée en partie 3.3. Les différentes cases à cocher dans la partie « Les usages sur le site et dans l'environnement du site » de cet outil de sélection permettent de déterminer s'il existe ou non un bénéficiaire. Lorsque la case d'un usage n'est pas cochée, cela signifie qu'aucun bénéficiaire n'a été identifié ; il n'y a donc pas de SE. Dans ce cas, l'indicateur associé à cet usage n'est pas sélectionné par l'outil. Si la case de l'usage en question est en revanche cochée, la grille de lecture renvoie alors aux indicateurs permettant de quantifier le SE concerné.

3.5.4. LISTE DES INDICATEURS SOCIO-ECONOMIQUES

Le tableau ci-dessous présente la liste des indicateurs socio-économiques élaborés (Tableau 8). Ces derniers ayant été construits dans le but de s'adapter au contexte précis de la restauration écologique, ils ne s'appuient pas systématiquement sur des indicateurs de référence.

Les valeurs des indicateurs du tableau sont toutes positivement corrélées avec celles des SE ; plus la valeur est élevée, plus le SE concerné est important.

Tableau 8 : Liste des indicateurs socio-économiques.

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides	Prairies non humides	SE ciblé	Bénéficiaires potentiels	Paramètre mesuré (variable)	Interprétation	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte et analyse)	Accessibilité des données	Analyse des données et niveau d'expertise requis	Référence et lien vers site web (aucun standard, ni norme n'existent pour les SE)
Biens produits par les écosystèmes												
1	Prélèvement en eau en aval destinée à la consommation humaine	X		Approvisionnement en eau douce	Population locale	Prélèvement en eau provenant d'eaux de sources et de nappes phréatiques non traitées issus de captages situés en aval du site et destiné à la consommation humaine (en m ³ par an)	La valeur de l'indicateur est corrélée positivement avec celle du SE. Plus le prélèvement est important, plus le service d'approvisionnement en eau douce fourni aux populations situées en aval du site est élevé.	+++	€	++	+	Indicateur proche : CGDD (2015)
2	Prélèvement en eau en aval destinée à l'agriculture ou à l'industrie	X		Approvisionnement en eau douce	Agriculteurs, éleveurs et industries	Prélèvement en eau provenant d'eaux de sources et de nappes phréatiques non traitées issus de captages situés en aval du site et destiné à l'agriculture ou à l'industrie (en m ³ par an)	Les milieux humides peuvent potentiellement jouer un rôle important dans l'approvisionnement en eau douce pour les besoins agricoles ou industriels (en lien avec les fonctions de soutien d'étiage, recharge de nappe etc.). L'existence de ces SE dépendent néanmoins de la qualité chimique des eaux.	+++	€	++	+	http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/indicateurs-indices/f/498/1328/prelevements-eau-usage.html
3	Prélèvement en eau <i>in situ</i> destinée à l'agriculture ou l'industrie	X		Approvisionnement en eau douce	Agriculteurs, éleveurs et industries	Prélèvement en eau provenant d'eaux de surface situées sur le site et destiné à l'agriculture ou à l'industrie (en m ³ par an)	Les milieux humides peuvent potentiellement jouer un rôle important dans l'approvisionnement en eau douce pour les besoins agricoles ou industriels (en lien avec les fonctions de soutien d'étiage, recharge de nappe etc.). L'existence de ces SE dépendent	+++	€	++	+	http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/indicateurs-indices/f/498/1328/prelevements-eau-usage.html

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		SE ciblé	Bénéficiaires potentiels	Paramètre mesuré (variable)	Interprétation	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte et analyse)	Accessibilité des données	Analyse des données et niveau d'expertise requis	Référence et lien vers site web (aucun standard, ni norme n'existent pour les SE)
			Prairies non humides									
							néanmoins de la qualité chimique des eaux.					
4	Production de fourrage et de denrées issues de cultures vivrières	X	X	Produits de l'agriculture	Agriculteurs et éleveurs	<ul style="list-style-type: none"> - Superficie des cultures fourragères sur le site (en ha) - Rendements des cultures fourragères du site (en tonnes par ha et par an) - Superficie des cultures vivrières sur le site (en ha) - Rendement par type de culture (en tonnes par ha et par an) 	Un site ou sol pollué restauré peut devenir le support de nouvelles cultures. Cet indicateur agrégé quantifie le volume de denrées produites chaque année grâce aux cultures implantées sur le site (sous réserve de vérifier leur comestibilité /absence de contamination chimique).	+++	€	++	+	Indicateur proche : (Maes et al., 2016) http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041615300504
5	Production de denrées issues de jardins partagés	X	X	Produits de l'agriculture ³¹	Population locale	<ul style="list-style-type: none"> - Superficie des jardins partagés sur le site (en ares) - Rendements par type de cultures (en kg par are et par an) - Nombre d'adhérents aux jardins partagés 	Un site ou sol pollué restauré peut devenir le support de nouvelles cultures, notamment à travers la création de jardins partagés. Cet indicateur agrégé quantifie le volume de denrées produites chaque année grâce aux jardins partagés implantés sur le site (sous réserve de vérifier leur comestibilité /absence de contamination chimique) et suit le nombre d'adhérents à ces jardins.	+++	€	++	+	-

³¹ Dans le cadre de cette étude, cet indicateur est associé au service d'approvisionnement des produits de l'agriculture. Néanmoins, il pourrait également être considéré comme un service culturel. Dans ce cas, l'indicateur pourrait être évalué à travers le nombre d'adhérents au jardin partagés et le coût de l'adhésion.

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		SE ciblé	Bénéficiaires potentiels	Paramètre mesuré (variable)	Interprétation	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte et analyse)	Accessibilité des données	Analyse des données et niveau d'expertise requis	Référence et lien vers site web (aucun standard, ni norme n'existent pour les SE)
		Prairies humides	Prairies non humides									
6	Production de denrées issues de l'élevage	X	X	Produits de l'élevage	de Eleveurs	- Nombre de bêtes sur le site (par espèce et ha) - Rendements de l'élevage par type de produit (viande, lait, etc.) (en tonnes par an) - Superficie des prairies sur le site (en ha)	Un site pollué restauré peut devenir le support de nouveaux usages comme l'élevage. Cet indicateur agrégé quantifie le volume annuel de produits issus de l'élevage présent sur le site.	+++	€	++	+	Indicateur proche : (Maes et al., 2016) http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041615300504
7	Production de denrées issues de la cueillette	X	X	Produits de cueillette	de la Population locale	Volume de produits issus de la cueillette (champignons, fleurs, baies) cueillis sur le site (en kg par an)	Les prairies sèches ou humides sont aussi le support de plantes sauvages pouvant être utilisées par la population locale à des fins médicinales ou alimentaires (sous réserve de vérifier leur comestibilité /absence de contamination chimique). Ces indicateurs quantifient le volume de ces ressources extraites sur le site. Ils peuvent être renseignés à partir d'entretiens ou d'estimations.	++	€€	+	+	-
8	Production de ressources médicinales	X	X	Ressources médicinales	Population locale	Volume de ressources médicinales extraites sur le site par type de ressources (en kg par an)	Les prairies sèches ou humides sont aussi le support de plantes sauvages pouvant être utilisées par la population locale à des fins médicinales ou alimentaires (sous réserve de vérifier leur comestibilité /absence de contamination chimique). Ces indicateurs quantifient le volume de ces ressources extraites sur le site. Ils peuvent être renseignés à partir d'entretiens ou	++	€€	+	+	-

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides	Prairies non humides	SE ciblé	Bénéficiaires potentiels	Paramètre mesuré (variable)	Interprétation	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte et analyse)	Accessibilité des données	Analyse des données et niveau d'expertise requis	Référence et lien vers site web (aucun standard, ni norme n'existent pour les SE)
							d'estimations.					
9	Production de produits de la ruche	X	X	Apiculture	Agriculteurs, apiculteurs et population locale productrice de fruits et légumes ou produits de la ruche	- Nombre de ruches installées sur le site - Volume de miel (ou autres produits) produit par ruche et par an	Cet indicateur agrégé quantifie la contribution du milieu naturel à la production de miel et d'autres produits de la ruche.	+++	€	++	+	-
Services culturels												
10	Nombre de visiteurs	X	X	Intérêt récréatif (balades, sport de nature, etc.)	Population locale, touristes	Nombre de visiteurs sur le site par an	En retrouvant un état naturel, le site pollué peut (re)devenir attractif pour les populations locales ou les touristes qui souhaitent s'y balader ou pour les naturalistes passionnés. Cet indicateur quantifie le rôle joué par les paysages, la faune et la flore du site dans le développement d'activités récréatives. Il peut être renseigné à partir d'entretiens ou d'estimations.	+++	€€	+	+	-
11	Nombre de projets de recherche	X	X	Intérêt scientifique	Chercheurs, population nationale (ou mondiale)	Nombre de projets de recherche menés sur le site par an	Un site restauré peut faire l'objet de projets de recherche, notamment sur la capacité de résilience de l'écosystème. Cet indicateur quantifie la contribution du milieu naturel au	+++	€€	++	+	-

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		SE ciblé	Bénéficiaires potentiels	Paramètre mesuré (variable)	Interprétation	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte et analyse)	Accessibilité des données	Analyse des données et niveau d'expertise requis	Référence et lien vers site web (aucun standard, ni norme n'existent pour les SE)
		Prairies	non humides									
							développement de la recherche. Il peut être renseigné à partir d'entretiens (ou informations sur le nombre de projets de recherche menés).					
12	Nombre de visites guidées	X	X	Intérêt éducatif/pédagogique	Population locale (adultes et enfants)	Nombre de scolaires ou adultes ayant bénéficié d'une visite guidée (payante ou non) par an	A l'instar d'autres sites naturels, un site restauré peut accueillir des visiteurs dans un but pédagogique. Cet indicateur quantifie la contribution du milieu naturel à l'éducation et la sensibilisation à l'environnement.	++	€	+++	+	-
13	Nombre de chasseurs	X	X	Chasse	Chasseurs	Nombre de chasseurs pratiquant leur activité sur le site par an	Les prairies et zones humides sont le refuge de nombreuses espèces chassables. Cet indicateur quantifie la contribution du milieu aux activités cynégétiques. Il peut être renseigné à partir d'entretiens ou d'estimations.	+	€€	+	+	-
14	Nombre de pêcheurs	X	X	Pêche	Pêcheurs	Nombre de pêcheurs pratiquant leur activité sur le site par an	Les zones humides peuvent être le refuge de nombreuses espèces pêchables. Cet indicateur quantifie la contribution du milieu aux activités de pêche. Il peut être renseigné à partir d'entretiens ou d'estimations.	+	€€	+	+	-

Services de régulation

Les indicateurs proposés ici sont complémentaires aux indicateurs de fonctions listés dans le tableau 4. Plus complexes et relativement plus coûteux à mettre en œuvre, ils permettent néanmoins au travers des données obtenus de procéder à une évaluation monétaire des SE rendus (en général par la méthode des coûts évités).

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		SE ciblé	Bénéficiaires potentiels	Paramètre mesuré (variable)	Interprétation	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte et analyse)	Accessibilité des données	Analyse des données et niveau d'expertise requis	Référence et lien vers site web (aucun standard, ni norme n'existent pour les SE)
		Prairies humides	Prairies non humides									
15	Rétention des eaux de ruissellement (m ³)		X	Protection contre l'érosion	Eleveurs et agriculteurs, population en aval, Etat (coûts d'entretiens et de dépollution dus aux ruissellements évités)	- Milieu végétal contribuant au ralentissement du ruissellement des eaux pluviales (en ha) - Volume de précipitation annuel sur le site (en m3) - Densité de couverture végétale (en %)	La végétation présente sur le site restauré protège les sols de l'ablation des substrats en réduisant l'énergie de l'érosion pluviale, lutte contre le ruissellement et maintient les sols grâce à ses systèmes racinaires. Cet indicateur agrégé quantifie le volume des eaux de ruissellement retenu par le milieu naturel.	+++	€€	++	++	Indicateur proche : (Beauchamp : https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/Erosion_sol/Erosion-sol.htm)
16	Risque d'érosion du sol		X	Protection contre l'érosion	Eleveurs et agriculteurs, population en aval, Etat (coûts d'entretiens et de dépollution dus aux ruissellements évités)	Indice de performance du risque d'érosion du sol (de 0 à 100) : 80-100 : souhaitable 60-79 : bon (6 à 11 t ha/an) 60-79 : bon (6 à 11 t ha/an) 40-59 : moyen (11 à 22 t ha/an) 20-39 : médiocre (22 à 33 t ha/an) 0-19 : à risque (> 33 t ha/an)	Cet indice de performance est positivement corrélé avec la valeur du service écosystémique. Plus il est élevé plus le risque d'érosion est faible. Il traduit la capacité du milieu à retenir les sols. Calcul : % de sols dans la catégorie « médiocre » X 0,25 + % dans la catégorie « moyen » X 0,5 + % dans la catégorie « bon » X 0,75 + % dans la catégorie « souhaitable »	+++	€€	++	++	(Gouvernement du Canada, 2016) http://www.agr.gc.ca/fra/science-et-innovation/pratiques-agricoles/sol-et-terre/indicateur-du-risque-d-erosion-du-sol/?id=1462893337151#calc
17	Stockage des eaux de crue (m ³)	X		Protection contre les inondations	Population en aval, agriculteurs et éleveurs, Etat (coûts évités des dommages potentiels)	- Superficie du milieu naturel (zones humides ou prairies) située dans les zones à risques d'inondation (en ha) - Volume de précipitation moyen sur le site en période de crue (en m3) - Conductivité hydraulique du milieu - en m/s	En période de crue, les zones humides et les plaines inondables rechargent la nappe phréatique en stockant l'eau. Cet indicateur agrégé quantifie la capacité du milieu à stocker le surplus d'eau et ainsi protéger les populations et cultures situées en aval du site.	+++	€€€	++	+++	-

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		SE ciblé	Bénéficiaires potentiels	Paramètre mesuré (variable)	Interprétation	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte et analyse)	Accessibilité des données	Analyse des données et niveau d'expertise requis	Référence et lien vers site web (aucun standard, ni norme n'existent pour les SE)
		Prairies humides	Prairies non humides									
18	Qualité des eaux	X	X	Régulation de la qualité de l'eau (atténuation des contaminants dans les compartiments aquatique)	Population en aval alimentée en eau, Etat (coûts de dépollution évités)	Statut chimique des eaux souterraines en amont et en aval du site	La comparaison de deux analyses des eaux souterraines d'une même nappe phréatique (en amont et en aval du site) permet de quantifier l'impact des sols végétalisés sur la qualité de l'eau. Plus la différence entre les deux analyses est importante, plus le site contribue à la régulation de la qualité de l'eau.	+++	€€€	++	+++	Bruxelles environnement (2016) http://www.environnement.brussels/sites/default/files/user_files/ree1114_fm_gw_chemistry_fr.pdf
19	Qualité des sols	X	X	Régulation de la qualité des sols (atténuation des contaminants dans les compartiments terrestre)	Agriculteurs, propriétaires des terrains, Etat (coûts de dépollution évités)	Statut chimique des sols sur le site et à proximité (périmètre à définir en fonction de la diffusion possible des contaminants dans le sol et l'air)	Le suivi temporel des contaminants chimiques sur le site et à proximité du site permet d'évaluer l'importance des processus d'atténuation des contaminants qui ont lieu dans les sols (processus de filtration, adsorption, biodégradation, assimilation, précipitation, transfert). L'abattement des concentrations des polluants peut être comparé aux coûts liés à la mise en œuvre d'actions de dépollution.	+++	€€€	++	+++	Walter et al. (2015)
20	Stockage de gaz à effet de serre (tonnes de CO ₂)	X	X	Régulation du climat global	Population mondiale	- Hectares par type de milieux fixateur de CO ₂ - Capacité de stockage de CO ₂ par type de milieux	Cet indicateur agrégé évalue la capacité du site à réguler le climat mondial en fonction des différentes occupations du sol.	+++	€€	+	++	(CGDD, 2017) http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/2690/0/matiere-organique-sols-stockage-carbone-1.html

Numéro	Nom de l'indicateur	Zones humides		SE ciblé	Bénéficiaires potentiels	Paramètre mesuré (variable)	Interprétation	Niveau de sensibilité aux actions de restauration	Coût total (récolte et analyse)	Accessibilité des données	Analyse des données et niveau d'expertise requis	Référence et lien vers site web (aucun standard, ni norme n'existent pour les SE)
		Prairies humides	Prairies non humides									
21	Nombre de pollinisateurs	X	X	Pollinisation	Agriculteurs, apiculteurs et population locale productrice de fruits et légumes ou produits de la ruche	Nombre moyen de pollinisateurs (par m ² de prairie)	Plus la quantité de pollinisateurs est élevée, plus le site joue un rôle important dans la production des angiospermes et des gymnospermes.	+++	€€	++	+++	Symbiose : https://www.symbiose-biodiversite.com/experimentation/les-protocoles-et-suivi-dindicateurs/

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

4.1 Site de Villeneuve sur Verberie

PRESENTATION GENERALE DU SITE

L'installation de stockage de déchets (ISD) de Villeneuve sur Verberie est située dans le département de l'Oise (60) à proximité de la ville de Compiègne. Après une centaine d'années d'extraction de sable, le site a changé de vocation pour devenir une installation de stockage de déchets géré par SUEZ Recyclage & Valorisation - France.

Le site est globalement découpé en 4 zones distinctes nommées V1, V2, V3 et V4 correspondant aux différentes phases d'exploitation (Figure 16) :

- Le secteur 1 (V1) exploité de 1973 à 1983 (nouvelle gestion depuis 1995) ;
- Le secteur 2 (V2) exploité de 1983 à 1993 ;
- Le secteur 3 (V3) exploité de 1993 à 1999 ;
- Le secteur 4 (V4) exploité de 2000 à 2014.

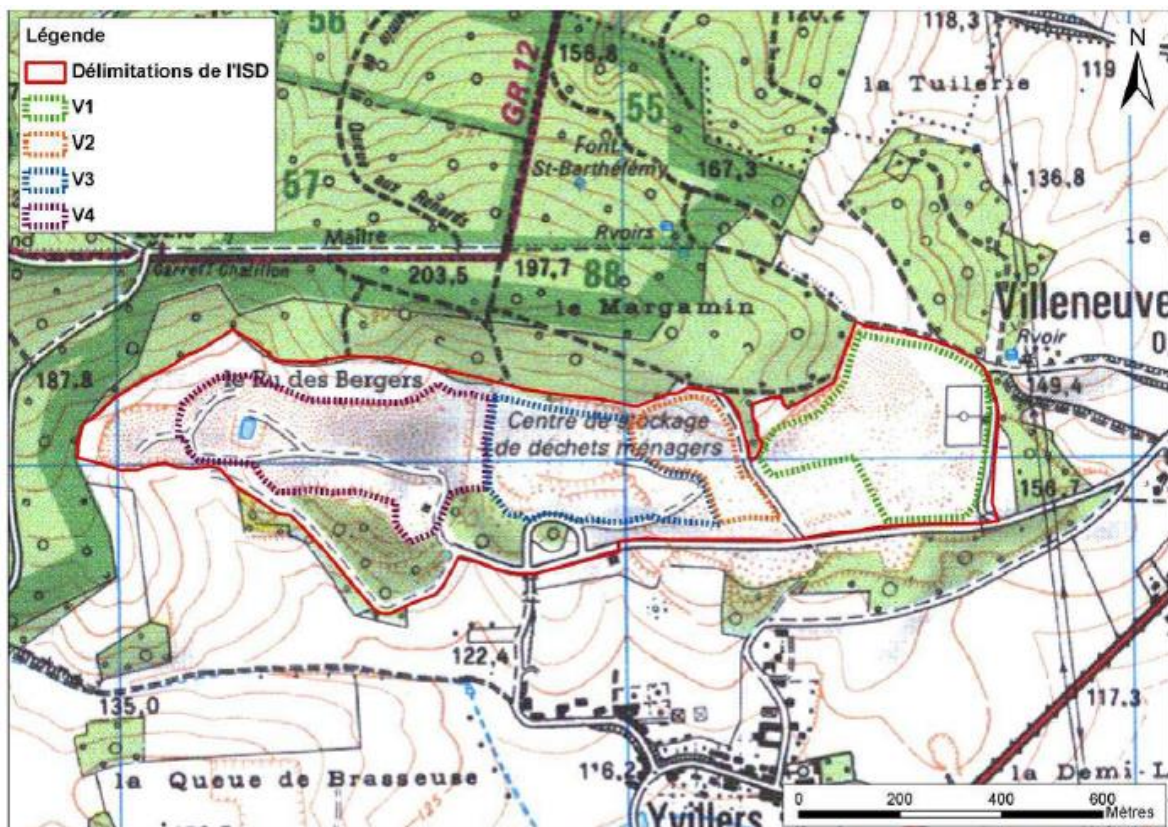


Figure 16. Localisation des 4 secteurs au sein du périmètre de l'ISD.

La mise en sécurité des différentes installations (infiltration d'eau, étanché aux émanations gazeuses) a été mise en œuvre selon le schéma suivant (Figure 17).

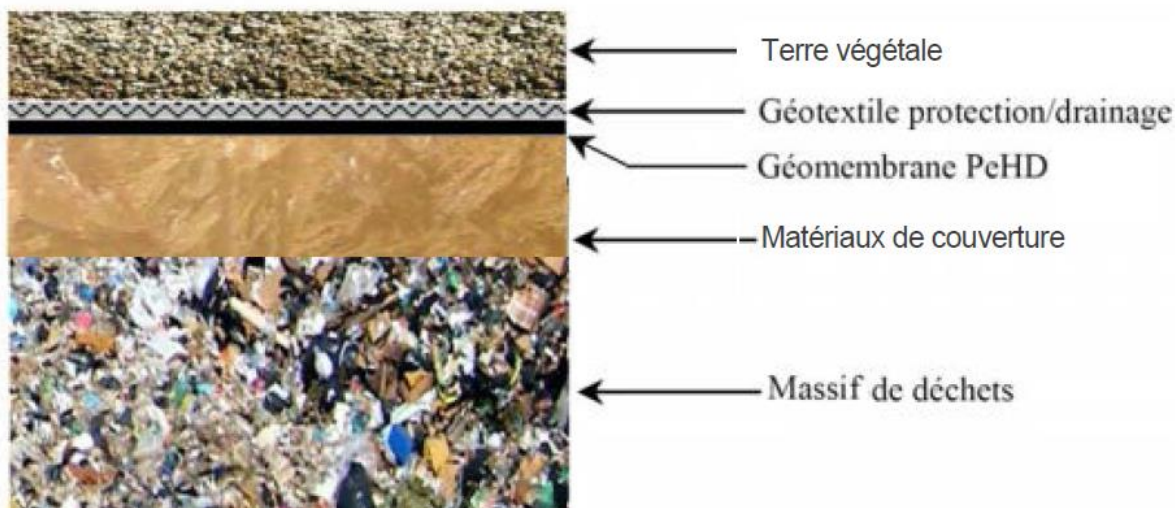


Figure 17 : Description des installations ayant permis la mise en sécurité des casiers.

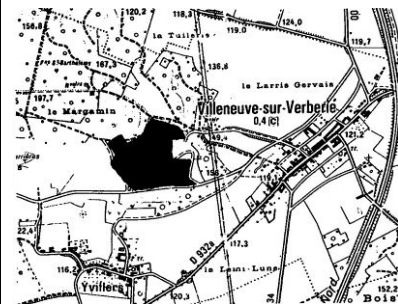
Les mesures de gestion et de restauration du site sont mises en place de façon progressive de manière à améliorer globalement l'intégration du site dans le contexte écologique global. Elles se termineront en fin d'exploitation.

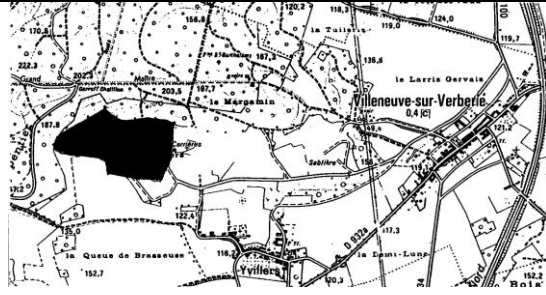
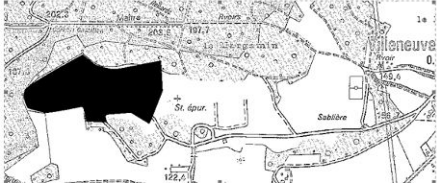
Une partie de ce site présente également une dimension récréative. Le secteur V1, dont l'activité et le suivi post-exploitation sont terminés a été rétrocédé à la commune. Ce secteur est ainsi devenu un lieu de promenade. Des activités de motocross ont également été observées sur le site (non voulues et défavorables à la flore du site). En revanche, le stade de foot a peu à peu disparu au profit du développement d'une prairie.

DONNEES DISPONIBLES

Les données disponibles sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tableau 9).

Tableau 9 : Présentation des ressources documentaires mises à disposition sur le site de Villeneuve-sur-Verberie.

Année	Nom de l'étude	Périmètre concerné	Données disponibles	Remarque complémentaires
1994	ECOSITA - Centre d'Enfouissement Technique - Zone 1. VILLENEUVE-SUR-VERBERIE (Oise). Etude botanique.	Secteur V1 (à la limite de V2) excluant le terrain de foot jouxtant le village de Villeneuve sur Verberie.  Secteur V4	Flore (présence) Liste non exhaustive (terrain d'une journée en juillet 1994)	Le secteur ouest où ont été réalisés les relevés n'a, a priori, pas été repris ensuite dans les relevés récents à partir de 2008. Les relevés réalisés sur V4, l'ont été avant exploitation du site. C'est-à-dire qu'entre les études de 1994 et 1997 et celles des années 2000, ce secteur a été

Année	Nom de l'étude	Périmètre concerné	Données disponibles	Remarque complémentaires
				comblé par des déchets. Les inventaires réalisés correspondaient donc à des états initiaux avant impact.
1997	Ecothème. Inventaire faune – flore sur la zone de Villeneuve sur Verberie.	Secteur V4 (Ancienne carrière de sable à ciel ouvert) pour projet d'extension. 	Flore (présence et identification des espèces non observées en 1994). A priori inventaires des groupes faunistiques mais non intégrés dans le rapport (oiseaux, mammifères, batraciens, reptiles, odonates)	Complément à l'étude 1994 du fait du projet d'extension du Centre d'Enfouissement Technique de Villeneuve-sur-Verberie.
2008	Expertise écologique des zones réaménagées du C.E.T. de Villeneuve sur Verberie (60). Rapport final	Ensemble des quatre secteurs incluant le terrain de foot.	Avifaune (présence) Flore (présence) Reptiles et amphibiens (présence) Entomofaune (présence) Mammifères (présence) Evaluation de la valeur de chaque secteur au regard des différents groupes étudiés	Relevés itinérants avec pour objectif d'évaluer un IQE (voir Delzons et al. 2013). Les données correspondent surtout à des listings d'espèces (biodiversité), ce qui ne permet pas d'évaluer des trajectoires de restauration par placette.
2009	Installation de Stockage de Déchets de Villeneuve-sur-Verberie (60). Diagnostic écologique – SITA Ile de France.	Ensemble des quatre secteurs incluant le terrain de foot.	Avifaune (présence et effectif) Flore (présence) Reptiles et amphibiens (présence, effectif) Entomofaune (présence, effectif) Mammifères (présence, effectif)	-

Année	Nom de l'étude	Périmètre concerné	Données disponibles	Remarque complémentaires
2014	Evaluation de la biodiversité des sites de SITA. Indicateur de Qualité Ecologique de VILLENEUVE-SUR-VERBERIE. 2014	Ensemble des quatre secteurs	Avifaune (présence et effectif) Flore (présence) Reptiles et amphibiens (présence, effectif) Entomofaune (présence, effectif) Mammifères (présence, effectif)	-
2017	Mise à jour pour l'évaluation 2017 avec de nouveaux indicateurs (données dans tableur)	Réorientation des suivis par placette (4 secteurs de pelouse et un bord de mare) pour comparer 2014 et 2017 avec divers indicateurs qui correspondent davantage aux indicateurs que nous proposons (eutrophilie, recouvrement en ligneux, espèces type du régime pastoral, recouvrement « graminées », fermeture du milieu avec le recouvrement en espèces d'ourlet etc.).	Relevés végétaux sur 5 secteurs de pelouse	Les données brutes ne sont en revanche pas disponibles (à confirmer).

Des données complémentaires existent mais n'ont pas été traitées dans le cadre de cette étude. Elles incluent :

- La surveillance de la qualité des eaux souterraines par 6 piézomètres ;
- La surveillance de la qualité des eaux pluviales rejetées au niveau des 4 bassins de rétention et des 5 bassins d'infiltration : Analyse trimestrielle des bassins du site ouvert (pH, hydrocarbures, DCO, DBO5, MES, Phénol, Fer, NH₄⁺) et analyse trimestrielle du bassin du site fermé (DCO, DBO5, pH, conductivité).

CHOIX DES INDICATEURS A SUIVRE AU REGARD DES OBJECTIFS DE RESTAURATION

L'application de la grille de lecture à ce site permet d'obtenir les résultats suivants :

1	Type de dégradation
<p>Si dégradation physique, veuillez préciser la nature de cette dégradation :</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Dévégétalisation des sols (sols mis à nu) <input checked="" type="checkbox"/> Présence d'un technosol</p> <p>Si dégradation chimique, veuillez préciser la nature de cette dégradation :</p> <p><input type="checkbox"/> Contamination métallique (présence de métaux dans les sols) <input type="checkbox"/> Contamination organique <input checked="" type="checkbox"/> Contamination minérale (N, P) / sols eutrophisés</p>	

→ La contamination minérale est possible sur ce site (apport de sol riche) mais peu probable car la plupart des actions de restauration ont privilégié l'utilisation de sol calcaire originaire du site en lui-même.

2 Ecosystèmes visés par la restauration	
<input checked="" type="checkbox"/> Milieux humides	Type de zone humide : <input type="checkbox"/> Zone humide de type alluvial
	<input checked="" type="checkbox"/> Zone humide en tête de bassin versant connectée au réseau hydrographique
	<input checked="" type="checkbox"/> Autres types de zones humides (étendue d'eau, zones humides de plateau, zones humides dépressionnaires etc.)
<input checked="" type="checkbox"/> Milieux non humides	

→ Différents types de milieux sont observés sur le site depuis l'arrêt de l'exploitation de la carrière, incluant notamment des pelouses sèches calcicoles et des milieux humides. Ces milieux humides sont localisés sur le secteur V1 du fait de la présence d'un sol marno-calcaire et à l'extrémité ouest du secteur V4 du fait de quelques suintements.

De manière générale, la restauration visait à réhabiliter des milieux humides et non humides présentant des caractéristiques similaires à ceux observés à proximité. Pour cette raison, les réaménagements ont été réalisés principalement avec les matériaux locaux (sable calcaire) en limitant au maximum l'apport de terre végétale et de semis afin de permettre la colonisation naturelle par les graines locales présentes au niveau des zones naturelles de fort intérêt présentes en proximité du site. Sur pentes et talus, des semis ont été effectués selon une liste préconisée par le Musée National d'Histoire Naturelle (MNHN) afin de stabiliser le substrat.

3 Les usages sur le site et dans l'environnement du site	
<input type="checkbox"/> Usage agricole ou apicole	<input type="checkbox"/> Usage industriel (Prélèvement en eau)
	<input type="checkbox"/> Site touristique
<input checked="" type="checkbox"/> Site ouvert au public (accessible librement)	<p>Si vous avez coché " Site ouvert au public", veuillez préciser le(s) type(s) d'usages :</p> <input checked="" type="checkbox"/> Le site accueille des visiteurs <input type="checkbox"/> Le site est le support d'activités de recherche <input type="checkbox"/> Le site est utilisé à des fins pédagogiques <input type="checkbox"/> Les chasseurs pratiquent leur activité sur le site <input type="checkbox"/> Les pêcheurs (de loisir) pratiquent leur activité sur le site <input type="checkbox"/> Des ressources médicinales y sont prélevées <input checked="" type="checkbox"/> Des habitants vivent à proximité du site (moins de 10 km)
<input checked="" type="checkbox"/> Usages à l'extérieur du site	<p>Si vous avez coché "Usages à l'extérieur du site", veuillez préciser si :</p> <input checked="" type="checkbox"/> Des agriculteurs sont présents à proximité directe du site (2 km max) <input checked="" type="checkbox"/> Des agriculteurs, éleveurs, industries ou des habitants sont présents en aval du site

→ Peu d'usages sont observés sur le site en lui-même. Le secteur V1 étant ouvert au public, les riverains peuvent venir s'y promener voire pratiquer certains sports comme du motocross, bien que cette activité ne soit pas souhaitée. A l'extérieur du site, l'agriculture céréalière est en revanche très présente (région du Valois).

D'après ces différents éléments, les **fonctions**, présentant un enjeu, incluent principalement (étape 4 de la grille de lecture) :

- Pour les fonctions hydrogéomorphologiques :
 - La fonction de ralentissement des eaux de ruissellement ;
 - La fonction de stabilisation des sols ;
- Pour les fonctions biogéochimiques :
 - Restauration et maintien de la qualité des sols ;
 - Rétention, transformation et élimination des polluants ;
- Pour les fonctions biologiques :
 - Habitats d'espèces ;
 - Connectivité à l'environnement.

Pour chacune de ces fonctions, les indicateurs retenus sont listés dans le tableau ci-dessous (Tableau 10).

Tableau 10 : Fonctions et indicateurs pertinents pour évaluer le succès de la restauration du site de Villeneuve-sur-Verberie.

Fonctions	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs pertinents spécifiquement dans le cadre du projet avec pour hypothèse budget moyen et niveau de complexité modéré (+ dire d'expert)	Indicateurs testés (données disponibles)
Ralentissement des eaux de ruissellement	Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Taux d'infiltration de l'eau dans les sols (28) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) (31) ; Index de la qualité des sols basé sur des propriétés physico-chimiques et biologiques (34) ; Structure de la végétation (35)	Taux d'infiltration de l'eau dans les sols (28) Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) Structure de la végétation (35)	<i>Données non disponibles.</i>
Stabilisation des sols	Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) (31) ; Index de la qualité des sols basé sur des propriétés physico-chimiques et biologiques (34) ; Structure de la végétation (35)	Taux d'infiltration de l'eau dans les sols (28) Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) Structure de la végétation (35)	Structure de la végétation (35) sur un échantillon de relevés de 1994 et 1997 par placette. Attention, ici il ne s'agit pas de suivre la restauration (car états initiaux avant impact). Les indicateurs peuvent néanmoins être utilisés pour suivre l'évolution de la végétation. Les données brutes des études de 2014 et 2017 permettent également d'évaluer l'évolution de cette fonction.
Restauration et maintien de la qualité des sols	Biologie du sol : Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Nématofaune : Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI), de maturité (IM), des nématodes phytophages (PPI) et indice des	Indice d'altération des sols (32) (regard métabolique sur le sol – mise en évidence d'un mauvais fonctionnement des cycles biogéochimiques	<i>Données non disponibles.</i>

Fonctions	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs pertinents spécifiquement dans le cadre du projet avec hypothèse budget moyen et niveau de complexité modéré (+ dire d'expert)	Indicateurs testés (données disponibles)
	<p>voies de décomposition (IVD) (3) ; Les microarthropodes du sol (4) ; Activités enzymatiques (9) ; Respirométrie (Oxitop®) (10) ; Biomasse moléculaire microbienne (11) ; Empreinte moléculaire des communautés microbiennes (bactéries et champignons) (12) ; Diversité taxonomique microbienne (13) ; Diversité métabolique potentielle (14) ; Gènes de fonction (15) ; Biodiversité des sols (21) ; Activités biologiques du sol (22) ; Index d'altération des sols basé sur des activités enzymatiques (32) ; Index d'altération des sols (PFLA) (33)</p> <p>Physico-chimie du sol : Episolum humifère en surface (16) ; Fertilité des sols (20) ; Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Stock de carbone des sols (27) ; Taux d'infiltration de l'eau dans les sols (28) ; Indice de la qualité chimique du sol (29) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) (31) ; Index de la qualité des sols basé sur des propriétés physico-chimiques et biologiques (34)</p>	<p>majeurs).</p> <p>Abondance/diversité des vers de terre (1) ou des nématodes (3).</p> <p>Indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) (31) (intègre les paramètres majeurs d'état agronomique d'un sol)</p>	
Rétention, transformation et élimination des polluants (pollution minérale)	<p>Biologie du sol Nématofaune : Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI), de maturité (IM), des nématodes phytophages (PPI) et indice des voies de décomposition (IVD) (3) ; Respirométrie (Oxitop®) (10) ; Biomasse moléculaire microbienne (11) ; Diversité taxonomique microbienne (13) ; Diversité métabolique potentielle (14) ; Gènes de fonction (15) ; Index d'altération des sols basé sur des activités enzymatiques (32)</p> <p>Physico-chimie du sol Fertilité des sols (20) ; Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Indice de la qualité chimique du sol (29)</p> <p>Indicateurs Faune/flore Indicateur - Odonates (40) ; Indicateur - Lépidoptères (41) ;</p> <p>Spécifiques aux milieux humides Niveau d'hydromorphie (17) ; Niveau d'humidité du sol (18) ; Niveau d'humidité du sol (18) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indicateur floristique d'engorgement (45) ; Humidité du milieu - orthoptères (46)</p>	<p>Pour les milieux non humides : Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie (42)</p> <p>Pour les milieux humides : Indicateur floristique d'engorgement (45), Niveau d'hydromorphie (17)</p>	Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie (42)
Habitats d'espèces	<p>Diversité des sols Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Nématofaune : Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI), de maturité (IM), des nématodes phytophages (PPI) et indice des voies de décomposition (IVD) (3) ; Les</p>	<p>Qualité de la végétation (36) ; Fermeture du milieu (37), Indicateur - Lépidoptères (41) ; Indicateur floristique de fertilité des sols ou</p>	Qualité de la végétation (36) ; Fermeture du milieu (37) ; Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie (42)

Fonctions	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs pertinents spécifiquement dans le cadre du projet avec pour hypothèse budget moyen et niveau de complexité modéré (+ dire d'expert)	Indicateurs testés (données disponibles)
	<p>microarthropodes du sol (4) ; Empreinte moléculaire des communautés microbiennes (bactéries et champignons) (12) ; Diversité taxonomique microbienne (13) ; Biodiversité des sols (21) ; Activités biologiques du sol (22)</p> <p>Structuration de la végétation Qualité de la végétation (36) ; Fermeture du milieu (37) ; Rareté des lisières (38) ;</p> <p>Diversité faune/flore Indicateur - Lépidoptères (41) ; Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie (42) ; Indicateur - graminées (43) ; Présence d'espèces végétales exotiques envahissantes (44)</p>	<p>d'eutrophilie (42) ; Indicateur - graminées (43) ; Présence d'espèces végétales exotiques envahissantes (44)</p>	<p>D'une manière générale, mis à part pour la dernière évaluation comparative entre 2014 et 2017, il manque les taux de recouvrement pour pouvoir utiliser certains indicateurs proposés dans le cadre de cette étude (incluant les indicateurs 37, 43 et 44).</p> <p>Pour la comparaison 2014 / 2017, les indicateurs utilisés sont :</p> <p>Qualité de la végétation (36) = Espèces représentatives du régime agropastoral (%) dans le tableau d'évaluation (annexe 1)</p> <p>Fermeture du milieu (37) = Recouvrement des ligneux (%) + Recouvrement des espèces d'ourlet</p> <p>Graminées (43) ≈ Recouvrement du Brachypode.</p> <p>Présence d'espèces végétales exotiques envahissantes (44)</p>
<p>Connectivité</p>	<p>Biologie des sols Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Nématofaune : Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI), de maturité (IM), des nématodes phytophages (PPI) et indice des voies de décomposition (IVD) (3) ; Les microarthropodes du sol (4)</p> <p>Structuration de la végétation Rareté des lisières (38) ; Similarité avec le paysage (39)</p> <p>Faune/flore Humidité du milieu - orthoptères (46)</p>	<p>Similarité avec le paysage (39)</p>	<p><i>Données non disponibles.</i></p>

D'après les éléments présentés dans ce tableau, seuls quatre indicateurs ont pu être testés et 2 réinterprétés à partir des éléments présentés dans la bibliographie. Ils incluent :

- **La structure de la végétation (35) ;**
- **La qualité de la végétation (36) ;**
- **La fermeture du milieu (37) ;**
- **L'indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie (42) ;**

- L'indicateur graminée (43) (interprétation des résultats issus de la bibliographie) ;
- L'indicateur Présence d'espèces végétales exotiques envahissantes (44) (interprétation des résultats issus de la bibliographie).

Ces indicateurs concernent les fonctions de stabilisation des sols, de rétention, transformation et élimination des polluants (pollution minérale) et d'habitats d'espèces.

Concernant les **services écosystémiques**, les enjeux concernent principalement (étape 5 de la grille de lecture) :

- Pour les biens produits par les écosystèmes :
 - L'approvisionnement en eau douce ;
- Pour les services culturels :
 - L'intérêt récréatif (sur le secteur V1) ;
- Pour les services de régulation :
 - La régulation de la qualité des sols ;
 - La régulation de la qualité de l'eau ;
 - La régulation du climat global ;
 - La pollinisation ;
 - La protection contre l'érosion.

A noter :

Les réponses apportées dans la grille de sélection entraînent la sélection automatique de certains SE, comme par exemple « produits de la cueillette » ou encore « la régulation des crues ». Seule une analyse contextuelle plus fine du site permet de déterminer si ces SE sont effectivement attendus. Le site de Villeneuve-sur-Verberie étant une installation de stockage de déchets (risque de pollution des sols) et par ailleurs situé en tête de bassin versant (écoulements limités vers l'aval), il n'apparaît pas pertinent de retenir ces deux SE.

Pour chacun de ces services écosystémiques, les indicateurs retenus sont listés dans le tableau ci-dessous (Tableau 11).

Tableau 11 : Services écosystémiques et indicateurs pertinents pour évaluer le succès de la restauration du site de Villeneuve-sur-Verberie.

Service écosystémique	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs testés (données disponibles)
Approvisionnement en eau douce	Prélèvement en eau en aval destinée à la consommation humaine (1) ; Prélèvement en eau en aval destinée à l'agriculture ou à l'industrie (2) ; Prélèvement en eau in situ destinée à l'agriculture ou l'industrie (3)	<i>Données non disponibles</i>
Intérêt récréatif (balades, sports de nature, observation, valeur paysagère, etc.)	Nombre de visiteurs (10)	<i>Données non disponibles</i>
Régulation de la qualité des sols	Qualité des sols (19)	<i>Données non disponibles</i>

Service écosystémique	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs testés (données disponibles)
Régulation de la qualité des eaux	Qualité des eaux (18)	<i>Données non disponibles</i>
Régulation du climat global	Stockage de gaz à effet de serre (tonnes de CO ₂) (20)	<i>Données non disponibles</i>
Pollinisation	Nombre de pollinisateurs (21)	<i>Données non disponibles</i>
Protection contre l'érosion	Rétention des eaux de ruissellement (m ³) (15) ; Risque d'érosion du sol (16)	<i>Données non disponibles</i>

Aucune donnée n'étant disponible, aucun test des indicateurs liés aux SE n'a pu être réalisé.

TESTS DES INDICATEURS SELECTIONNES

Au regard des données disponibles seuls les indicateurs liés aux données faune/flore ont pu être testés (voir liste ci-dessus).

Les études de 1994 et 1997 correspondent à des états initiaux avant aménagement. Il ne s'agit donc pas de suivre l'efficacité d'actions de restauration. Néanmoins les indicateurs proposés dans le cadre de ce travail permettent de suivre l'évolution de la trajectoire d'un milieu que ce soit ou non dans le cadre d'une restauration. L'exercice d'application de ces indicateurs est donc proposé ci-dessous pour mettre en évidence leur capacité à capturer des changements même légers des communautés végétales.

Ainsi, sur la base des relevés réalisés sur la partie occidentale du site, nous avons testé à partir des listings de végétation de la strate herbacée relevée sur les entités « pré-bois » (PB) et « fond de carrière » (FC), les indicateurs suivants :

- Structure de la végétation (35) ;
- Qualité de la végétation (36) ;
- Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie (42)

Ces tests se sont basés sur des données de présence / absence uniquement.

Structure de la végétation (35)

Sur l'entité « Fond de Carrière » (à partir des 63 espèces relevées), l'analyse des trajectoires évolutives des milieux indique une végétation en cours d'évolution vers des cortèges de pelouse / prairie, favorables à la stabilisation des sols (recouvrement principalement par des espèces vivaces dont le réseau racinaire ne disparaît pas durant l'hiver). En effet, la composition des géophytes (12,7%) et d'hémicryptophytes (47,3%) révèle selon la grille d'évaluation un bon état³² (voir annexe 1 et Figure 18 gauche).

³² D'après l'annexe 1, le bon état correspond à un spectre équilibré avec une dominance des herbacés vivaces basses et hautes (>50% d'hémicryptophytes et géophytes), 10-20% de thérophytes, et moins de 5% de petits chaméphytes.

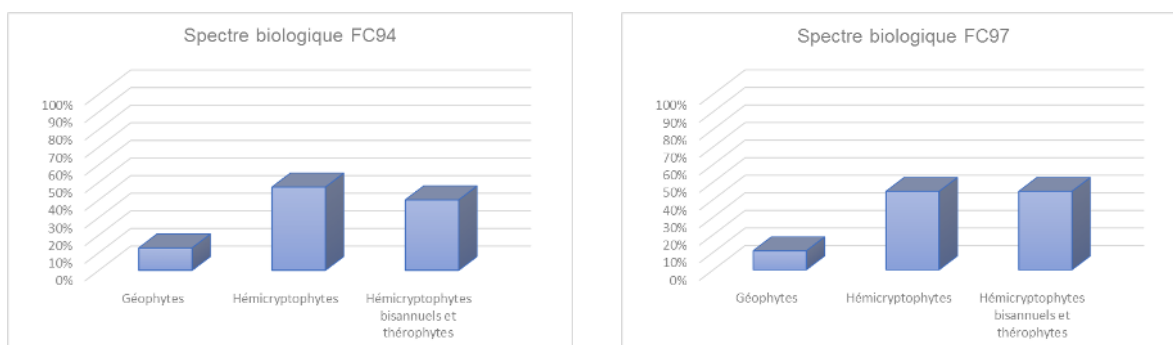


Figure 18 : Spectres des types biologiques issus d'un relevé sur le fond de carrière réalisé en 1994 (gauche) et en 1997 (droite) à Villeneuve-sur-Verberie.

Qualité de la végétation (36)

L'indicateur de « qualité de la végétation » montre que 29% du cortège du « Fond de Carrière » en 1994 appartient à des groupements de pelouse et 17% à des groupements de prairie, ce qui peut être considéré comme un état proche des milieux de cette nature (Figure 19 gauche). La présence de quelques espèces d'ourlet et des ligneux suggère néanmoins une légère dynamique évolutive de fermeture de milieu. Trente pour cent de l'ensemble restent encore cependant associé aux milieux anthropiques et rudéraux (friches et cultures). Sur la base de ces éléments, l'écosystème ne présente donc pas encore des milieux typiques de prairies ou de pelouses.

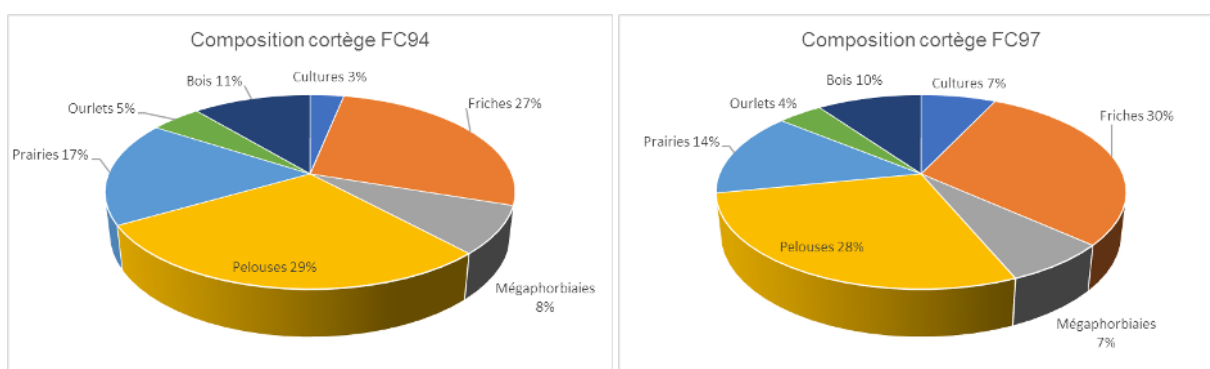


Figure 19 : Pourcentages d'appartenance des espèces aux divers groupements représentés dans les relevés réalisés sur le « Fond de Carrière » en 1994 et en 1997 à Villeneuve-sur-Verberie.

Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie (42)

L'indicateur « d'eutrophilie » des sols révèle que 31,7% des espèces sont indicatrices de conditions eutrophes à hyper-eutrophes (Figure 20 gauche). Ce chiffre est déjà correct, d'après la grille d'interprétation proposée (Annexe 1). Le secteur testé est en bon état (du point de vue de la trophie), avec l'essentiel du cortège méso à eutrophe (41,3%) et quelques espèces liées à des conditions oligotrophes, probablement dues au substrat sableux.

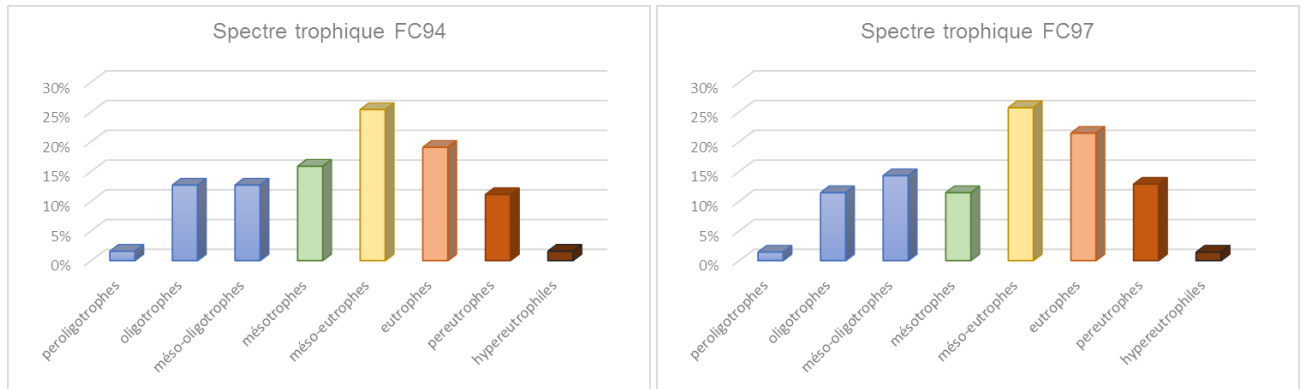


Figure 20 : Graphiques en histogrammes montrant les pourcentages d'espèces par catégories d'eutrophisation, résultats issus d'un relevé sur le fond de carrière réalisé en 1994 et en 1997 à Villeneuve-sur-Verberie.

Trois ans après, en 1997, on constate de légers changements et une trajectoire qui tend vers des conditions plus « perturbées », sans que cela soit très significatif. On note notamment au niveau structure une diminution des géophytes et une augmentation des annuelles (thérophytes) (Figure 18 droite). Cela transparait aussi au niveau composition des groupements avec une plus grande proportion d'espèces des cultures et des friches en 1997 qu'en 1994 (Figure 19 droite). Et en même temps, la proportion d'espèces eutrophes augmente légèrement passant à 35,7% en 1997 (Figure 20 droite). Enfin, on note aussi une légère augmentation des cortèges sabulicoles oligotrophes, qui peuvent profiter des zones sableuses en surface peu enrichies et drainantes.

Ces éléments montrant qu'il est possible de rendre compte assez finement de certaines évolutions et du type de trajectoire que prennent les parcelles avec des indicateurs basés uniquement sur des relevés qualitatifs de présence / absence des différentes espèces végétales. Cela suppose de pouvoir passer plusieurs fois sur les placettes afin de tendre vers l'exhaustivité, ou tout du moins de reproduire à chaque fois la même pression et à des dates équivalentes.

Concernant la fonction d'habitat d'espèces, les indicateurs témoignent d'une évolution vers des milieux prairiaux typiques dès 1994, avec néanmoins, une dégradation sensible du milieu en 1997 (augmentation de la trophie, augmentation des annuelles). Concernant la fonction de stabilisation des sols, le cortège végétal en 1994 est clairement favorable à la stabilisation des sols (couvert pérenne principalement) avec une tendance à la dégradation en 1997. Ce résultat doit néanmoins être nuancé car les taux de recouvrement ne sont pas connus. Enfin, la fonction de rétention, transformation et élimination des polluants (pollution minérale) est également favorisée au regard de la proportion d'espèces indicatrices de conditions eutrophes à hyper-eutrophes

Ces indicateurs pourraient être renforcés avec des relevés plus « rigoureux » avec notamment l'information sur les taux de recouvrement utiles, par exemple pour prendre en compte d'autres indicateurs complémentaires permettant d'évaluer la cicatrisation d'un site, sa capacité à stabiliser le sol, la qualité de la gestion d'entretien du couvert herbacé et des espèces envahissantes, etc.

Ceci a été fait à partir de 2014 où le dernier tableau comparatif avec des données de 2017 permet d'interpréter trois indicateurs complémentaires, cette fois-ci dans le cadre d'une restauration en bon et due forme :

- **Fermeture du milieu (37) :** Le recouvrement par des espèces d'ourlet augmente entre 2014 et 2017, signe d'un relâchement de l'entretien, en lien avec le résultat précédent. Les taux ne sont toutefois pas de nature à être jugés défavorables ;

- **Indicateur graminée³³ (43)** : Le recouvrement du Brachypode montre une évolution négative entre 2014 et 2017 pour les pelouses sud, mare, centre et nord, avec un pourcentage de recouvrement qui augmente. Sur la pelouse centre, il dépasse 60%, ce qui correspond dans notre grille d'évaluation à un état défavorable ;
- **Indicateur d'espèce végétales exotiques envahissantes (44)** : Le recouvrement en espèces exotiques envahissantes (EEE) donne une idée des perturbations anthropiques. Entre 2014 et 2017, il semble que certaines espèces apparaissent dans la littérature existante.

CONCLUSION ET LIMITES

Pour ce site, les indicateurs proposés par le maître d'ouvrage, incluant notamment l'indicateur de qualité écologique (IQE, développé par le MNHN) sont suffisants et très pertinents pour suivre l'évolution des milieux et l'impact positif ou négatif des actions de gestion. Ils correspondent à l'ensemble des six indicateurs proposés dans le cadre de cette étude (35, 36, 37, 42, 43, 44, voir Tableau 4). D'autres indicateurs pourraient compléter les relevés de végétation, notamment celui sur les lépidoptères qui peut permettre d'affiner l'évaluation sur l'état des pelouses et prairies, et les pratiques de gestion. Jusqu'à présent, seuls des relevés sur des itinéraires de transect ont été réalisés pour obtenir une liste d'espèces totale sur le site pour rentrer dans le calcul de l'indice de qualité écologique. Dans le futur, il serait intéressant de pratiquer des relevés sur les mêmes parcelles que celles des placettes « végétation » (placettes sur lesquelles ont été établies les données 2014 et 2017).

D'après les résultats obtenus sur la période 2014 - 2017, la qualité des milieux prairiaux tend à se dégrader sensiblement avec probablement une réduction de l'entretien (apparition d'espèces envahissantes, tendance à la fermeture du milieu etc.). Un entretien par la fauche, assez courte et avec export de la matière les premières années, voire du pâturage, serait à mettre en place. Une action ciblée pour le contrôle et l'éradication des espèces exotiques envahissantes serait aussi un plus pour la qualité globale des milieux à vocation « biodiversité ». Des actions en ce sens vont être mises en place dès 2018.

4.2 Site « KMO TGV Est » de Vaires-sur-Marne

PRESENTATION GENERALE DU SITE



Le deuxième site d'étude est situé à Pomponne, dans le département de la Seine-et-Marne (77), entre Paris et Meaux, sur le bassin versant de la Marne.



Il s'agit d'un bassin d'expansion des crues de 4 hectares qui a été créé entre deux voies ferrées, dans le cadre de la réalisation de la ligne à grande vitesse « TGV

³³ L'indicateur graminée tel que proposé en annexe 1 doit prendre en compte le recouvrement de toutes les glumiflores. Néanmoins, dans le cadre de cette étude, le Brachypode semble être suffisamment dominant pour que l'indicateur basé sur cette seule espèce puisse être interprété.

Est Européen ». L'ancienne zone humide a été impactée par cet aménagement et a subi diverses pollutions (débris en tout genre, reste de travaux, bidons d'huile, batteries de voiture, vieux meubles, débris verts, etc.). Avant la réhabilitation du site, le bassin d'expansion était un ouvrage purement fonctionnel d'un point de vue hydraulique.

De 2006 à 2008, le site a fait l'objet d'un projet d'éco-paysage. Son paysage a été redessiné afin de favoriser le retour des espèces observées dans les inventaires³⁴. Des dépressions ont ainsi été creusées pour se rapprocher du niveau de la nappe et un grand nombre de milieux a été créé sur une surface restreinte : création de micro-reliefs, de zones inondables plus ou moins humides en fonction du niveau de creusement, de milieux ouverts, semi-ouverts et fermés et d'une « falaise » à hirondelles aujourd'hui colonisée par des martins-pêcheurs. Diverses espèces spécifiques des milieux humides ont également été plantées. Afin de dynamiser la pollinisation et le renouvellement des herbacées, des ruches ont par ailleurs été installées en 2012.

Le site a également une dimension pédagogique. Des élèves de l'école du Cours Diderot de Paris participent en effet à la réalisation des inventaires. Les inventaires sont effectués quatre fois par mois et concernent la faune (mammifères, oiseaux, amphibiens, reptiles, poissons, mollusques, crustacés, insectes et arachnides) et la flore (plantes herbacées à fleurs).

DONNEES DISPONIBLES

Les données disponibles sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tableau 12).

Tableau 12. Présentation des ressources documentaires mises à disposition sur le site de Vaires-sur-Marne.

Année	Nom de l'étude	Périmètre concerné	Données disponibles	Remarque complémentaire
1997 - 2011	-	Bois du Marais (site Natura 2000 situé à proximité du site sur la commune de Pomponne)	Flore (plantes herbacées à fleurs)	Simple listes d'espèces non affectées à des placettes
2013	-	Réserve naturelle de Vaires-sur-Marne	Odonates (présence), lépidoptères (présence)	Simple listes d'espèces non affectées à des placettes
2013 - 2014	-	Site de Vaires-sur-Marne	Mammifères (présence), reptiles (présence), amphibiens (présence), avifaune (présence), insectes (odonates et lépidoptères)	Simple listes d'espèces non affectées à des placettes
2014	-	Etangs de Vaires, falaise à hirondelle de rivage	Flore (présence)	Simple listes d'espèces non affectées à des placettes
2017	-	Réserve naturelle de Vaires-sur-Marne	Mammifères (présence), reptiles (présence), amphibiens (présence), avifaune (présence), insectes (odonates principalement)	Indication des espèces ayant été observées suite à la restauration. Ces éléments incluent dans l'analyse les relevés de 2013

³⁴ Les études réalisées dans le cadre de l'établissement du dossier « Loi sur l'eau » en 1999 et l'étude complémentaire réalisée par OGE en 2002 montrent que plusieurs espèces d'amphibiens fréquentaient d'ores et déjà le site avant sa restauration.

CHOIX DES INDICATEURS A SUIVRE AU REGARD DES OBJECTIFS DE RESTAURATION

L'application de la grille de lecture à ce site permet d'obtenir les résultats suivants :

1	Type de dégradation
<p>Si dégradation physique, veuillez préciser la nature de cette dégradation :</p> <ul style="list-style-type: none"><input checked="" type="checkbox"/> Dévégétalisation des sols (sols mis à nu)<input type="checkbox"/> Présence d'un technosol <p>Si dégradation chimique, veuillez préciser la nature de cette dégradation :</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Contamination métallique (présence de métaux dans les sols)<input checked="" type="checkbox"/> Contamination organique<input checked="" type="checkbox"/> Contamination minérale (N, P) / sols eutrophisés	

→ La création du bassin de rétention des eaux a entraîné la mise à nu des sols. L'aménagement a donc généré une dégradation physique. Par ailleurs, du fait de la situation du site entre deux lignes de chemin de fer, une contamination chimique d'origine organique (utilisation d'herbicide sur les rails pour désherber) ou minérale (perturbation des sols, apports possibles de terre exogène ?) est probable.

2	Ecosystèmes visés par la restauration
<p><input checked="" type="checkbox"/> Milieux humides Type de zone humide : <input checked="" type="checkbox"/> Zone humide de type alluvial</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Zone humide en tête de bassin versant connectée au réseau hydrographique<input type="checkbox"/> Autres types de zones humides (étendue d'eau, zones humides de plateau, zones humides dépressionnaires etc.) <p><input type="checkbox"/> Milieux non humides</p>	

→ Le bassin de rétention des eaux accueille les eaux du Ru du Gué de l'Aulnay, petit affluent de la Marne qui est, elle-même, située à moins de 250 m de l'ouvrage. La zone humide de par son positionnement est donc clairement de type alluvial.

3 Les usages sur le site et dans l'environnement du site		
<input type="checkbox"/> Usage agricole ou apicole	<input type="checkbox"/> Usage industriel (Prélèvement en eau)	<input type="checkbox"/> Site touristique
<input type="checkbox"/> Site ouvert au public (accessible librement)	<p>Si vous avez coché " Site ouvert au public", veuillez préciser le(s) type(s) d'usages :</p> <input type="checkbox"/> Le site accueille des visiteurs <input type="checkbox"/> Le site est le support d'activités de recherche <input checked="" type="checkbox"/> Le site est utilisé à des fins pédagogiques <input type="checkbox"/> Les chasseurs pratiquent leur activité sur le site <input type="checkbox"/> Les pêcheurs (de loisir) pratiquent leur activité sur le site <input type="checkbox"/> Des ressources médicinales y sont prélevées <input type="checkbox"/> Des habitants vivent à proximité du site (moins de 10 km)	
<input checked="" type="checkbox"/> Usages à l'extérieur du site	<p>Si vous avez coché "Usages à l'extérieur du site", veuillez préciser si :</p> <input type="checkbox"/> Des agriculteurs sont présents à proximité directe du site (2 km max) <input checked="" type="checkbox"/> Des agriculteurs, éleveurs, industries ou des habitants sont présents en aval du site	

→ Le site en lui-même n'est pas ouvert au public. Néanmoins il présente une vocation pédagogique puisque les inventaire faune / flore sont réalisés par des étudiants. Enfin, des ruches ont été installées sur le site. L'utilisation commerciale du miel n'est néanmoins pas connue.

D'après ces différents éléments, les **fonctions**, présentant un enjeu, incluent principalement (étape 4 de la grille de lecture) :

- Pour les fonctions hydrogéomorphologiques :
 - Rétention des écoulements ;
 - Rétention des sédiments ;
- Pour les fonctions biogéochimiques :
 - Restauration et maintien de la qualité des sols ;
 - Rétention, transformation et élimination des polluants ;
- Pour les fonctions biologiques :
 - Habitats d'espèces ;
 - Connectivité à l'environnement.

Pour chacun de ces fonctions, les indicateurs retenus sont listés dans le tableau ci-dessous (Tableau 13).

Tableau 13 : Fonctions et indicateurs pertinents pour évaluer le succès de la restauration du site de Vaires-sur-Marne.

Fonctions	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs pertinents spécifiquement dans le cadre du projet avec pour hypothèse budget moyen et niveau de complexité modéré (+ dire d'expert)	Indicateurs testés (données disponibles)

Fonctions	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs pertinents spécifiquement dans le cadre du projet avec pour hypothèse budget moyen et niveau de complexité modéré (+ dire d'expert)	Indicateurs testés (données disponibles)
Rétention des écoulements	Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Index de la qualité des sols basé sur des propriétés physico-chimiques et biologiques (34) ; Structure de la végétation (35)	Les indicateurs proposés ici apportent des informations sur le temps de rétention des eaux dans le site <i>a priori</i> alimenté principalement par la nappe. Ce temps de rétention dépend de la texture de sols et de la quantité de matière organique. Deux indicateurs sont pertinents pour caractériser le type de sol et suivre l'évolution de la restauration : Taux d'infiltration de l'eau dans les sols (28) Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) L'indicateur 25 (structure de la végétation) n'est pas pertinent car ces fonctions dépendent dans ce cas précis de la capacité de stockage du site plus que de la rugosité du couvert végétal.	<i>Données non disponibles</i>
Rétention des sédiments			
Stabilisation des sols	Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indice de qualité du sol (31) ; Index de la qualité des sols (34) ; Structure de la végétation (35)	Structure de la végétation (35)	Existe uniquement des premières données de taux de recouvrement de la végétation sur des placettes témoins.
Restauration et maintien de la qualité des sols	<p>Biologie du sol : Densité et biodiversité des vers de terre (1); Nématofaune :Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI), de maturité (IM), des nématodes phytophages (PPI) et indice des voies de décomposition (IVD) (3) ; Les microarthropodes du sol (4) ; Activités enzymatiques (9) ;Respirométrie (Oxitop®) (10) ; Biomasse moléculaire microbienne (11) ; Empreinte moléculaire des communautés microbiennes (bactéries et champignons) (12) ; Diversité taxonomique microbienne (13) ; Diversité métabolique potentielle (14) ; Gènes de fonction (15) ; Biodiversité des sols (21) ; Activités biologiques du sol (22) ; Index d'altération des sols basé sur des activités enzymatiques (32) ; Index d'altération des sols basé sur l'analyse des PFLA (33)</p> <p>Physico-chimie du sol : Episolum humifère en surface (16) ; Fertilité des sols (20) ; Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Stock de carbone des sols (27) ;</p>	<p>Indice d'altération des sols (32) (regard métabolique sur le sol – mise en évidence d'un mauvais fonctionnement des cycles biogéochimiques majeurs).</p> <p>Abondance/diversité des vers de terre (1) ou des nématodes (3).</p> <p>Indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) (31)</p> <p>Taux d'infiltration de l'eau dans les sols (28) ; Indice de la qualité chimique du sol (29).</p>	<i>Données non disponibles</i>

Fonctions	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs pertinents spécifiquement dans le cadre du projet avec pour hypothèse budget moyen et niveau de complexité modéré (+ dire d'expert)	Indicateurs testés (données disponibles)
	Taux d'infiltration de l'eau dans les sols (28) ; Indice de la qualité chimique du sol (29) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) (31) ; Index de la qualité des sols basé sur des propriétés physico-chimiques et biologiques (34)		
Rétention, transformation et élimination des polluants (pollution minérale)	<p>Biologie du sol : Nématofaune : Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI), de maturité (IM), des nématodes phytophages (PPI) et indice des voies de décomposition (IVD) (3) ; Respirométrie (Oxitop®) (10) ; Biomasse moléculaire microbienne (11) ; Diversité taxonomique microbienne (13) ; Diversité métabolique potentielle (14) ; Gènes de fonction (15) ; Index d'altération des sols (32) Physico-chimie du sol Fertilité des sols (20) ; Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Indice de la qualité chimique du sol (29)</p> <p>Indicateurs Faune/flore : Indicateur - Odonates (40) ; Indicateur - Lépidoptères (41) ;</p> <p>Spécifiques aux milieux humides : Niveau d'hydromorphie (17) ; Niveau d'humidité du sol (18) ; Niveau d'humidité du sol (18) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indicateur floristique d'engorgement (45) ; Humidité du milieu - orthoptères (46)</p>	<p>Les indicateurs suivants permettent d'évaluer le niveau d'hydromorphie et donc la capacité du sol à dénitrifier une partie des apports en azote (apport naturel ou lié à des activités humaines) :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Indicateur floristique d'engorgement (45), Niveau d'hydromorphie (17) ; ▪ Humidité du milieu - orthoptères (46) ; ▪ Indicateur - Odonates (40) ; <p>Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Indice de la qualité chimique du sol (29)</p>	Indicateur - Odonates (40) testé en partie avec les listes d'espèce fournies.
Habitats d'espèces	<p>Diversité des sols : Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Nématofaune : Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI), de maturité (IM), des nématodes phytophages (PPI) et indice des voies de décomposition (IVD) (3) ; Les microarthropodes du sol (4) ; Empreinte moléculaire des communautés microbiennes (bactéries et champignons) (12) ; Diversité taxonomique microbienne (13) ; Biodiversité des sols (21) ; Activités biologiques du sol (22)</p> <p>Structuration de la végétation Qualité de la végétation (36) ;</p>	<p>Les indicateurs proposés auront pour objectif d'évaluer la qualité des milieux humides obtenus sur le site après réhabilitation, notamment la recolonisation végétale et animale naturelle et la résorption de polluants (organique, minérale...).</p> <p>Qualité de la végétation (36), Indicateur - graminées (43) ; Présence d'espèces végétales exotiques envahissantes (44)</p> <p>Indicateur - Lépidoptères (41), Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie (42)</p> <p>Les microarthropodes du sol (4)</p>	<i>Données non disponibles</i>

Fonctions	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs pertinents spécifiquement dans le cadre du projet avec pour hypothèse budget moyen et niveau de complexité modéré (+ dire d'expert)	Indicateurs testés (données disponibles)
	Fermeture du milieu (37) ; Rareté des lisières (38) ; Diversité faune/flore Indicateur - Lépidoptères (41) ; Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie (42) ; Indicateur - graminées (43) ; Présence d'espèces végétales exotiques envahissantes (44)		
Connectivité	Biologie des sols Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Nématofaune : Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI), de maturité (IM), des nématodes phytophages (PPI) et indice des voies de décomposition (IVD) (3) ; Les microarthropodes du sol (4) Structuration de la végétation Rareté des lisières (38) ; Similarité avec le paysage (39) Faune/flore Humidité du milieu - orthoptères (46)	Humidité du milieu - orthoptères (46)	<i>Données non disponibles</i>

Concernant les **services écosystémiques**, les enjeux concernent principalement (étape 5 de la grille de lecture) :

- Pour les biens produits par les écosystèmes :
 - L'approvisionnement en eau douce
 - Les produits de la ruche
- Pour les services culturels :
 - Les activités éducatives, sensibilisation à l'environnement
- Pour les services de régulation :
 - La protection contre les inondations
 - La régulation de la qualité des sols
 - La régulation de la qualité de l'eau
 - La régulation du climat global
 - La pollinisation

Pour chacun de ces services écosystémiques, les indicateurs retenus sont listés dans le tableau ci-dessous (Tableau 14).

Tableau 14 : Services écosystémiques et indicateurs pertinents pour évaluer le succès de la restauration du site de Vaires-sur-Marne.

Service écosystémique	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs testés (données disponibles)
Approvisionnement en eau douce	Prélèvement en eau en aval destinée à la consommation humaine (1) ; Prélèvement en eau en aval destinée à l'agriculture ou à l'industrie (2) ; Prélèvement en eau <i>in situ</i> destinée à l'agriculture ou l'industrie (3)	Données non disponibles
Produits de la ruche	Production de produits de la ruche (8)	Données non disponibles
Activités éducatives, sensibilisation à l'environnement	Nombre de visites guidées (12) ³⁵	Données non disponibles
Protection contre les inondations	Stockage des eaux de crue (m ³) (17)	Données non disponibles
Régulation de la qualité des sols	Qualité des sols (19)	Données non disponibles
Régulation de la qualité des eaux	Qualité des eaux (18)	Données non disponibles
Régulation du climat global	Stockage de gaz à effet de serre (tonnes de CO ₂) (20)	Données non disponibles
Pollinisation	Nombre de pollinisateurs (21)	Données non disponibles

Aucune donnée n'étant disponible, aucun test des indicateurs liés aux SE n'a pu être réalisé.

TESTS DES INDICATEURS SELECTIONNES

Malheureusement les données fournies ne permettent pas de tester les indicateurs proposés. Seules des listes d'espèces sont disponibles sans que l'on connaisse les modalités et les protocoles d'acquisition. Aucun relevé par placette ou transect dans un habitat donné n'est précisé. Dans ces conditions, il est difficile de tester les indicateurs basés sur des proportions d'espèces et des taux de recouvrement pour un milieu donné afin d'évaluer la pertinence de la réhabilitation pour les prairies par exemples ou les zones humides.

Néanmoins, nous avons tenté de voir sur la liste des odonates, par exemple, quel pourrait être le résultat, bien que l'on ne sache pas si tous les adultes observés se reproduisent sur le site.

On obtient ainsi 12 espèces relevées dont 6 de catégorie A tolérantes à la pollution, 5 de catégorie B, moyennement tolérantes et 1 seule de catégorie C peu tolérante (Tableau 15).

Tableau 15. Espèces d'odonates relevées sur le site de Vaires-sur-Marne et tolérance à la pollution (Indicateur - Odonates (40)).

Espèce	Catégorie
<i>Calopteryx splendens</i>	B
<i>Chalcolestes viridis</i>	A
<i>Platycnemis pennipes</i>	B
<i>Pyrrhosoma nymphula</i>	B
<i>Coenagrion puella</i>	B
<i>Aeshna cyanea</i>	A
<i>Anax imperator</i>	A
<i>Gomphus vulgatissimus</i>	C

³⁵ L'indicateur « Nombre de visites guidées (11) » évaluant le service écosystémique des activités éducatives n'est pas adapté à ce site qui participe à la sensibilisation à l'environnement à travers la réalisation des inventaires. Il serait possible de construire un indicateur « Temps dédié à l'éducation à l'environnement » dans lequel on comptabiliserait le temps de travail des salariés dédié à la sensibilisation.

Espèce	Catégorie
<i>Libellula depressa</i>	A
<i>Libellula quadrimaculata</i>	B
<i>Orthetrum cancellatum</i>	A
<i>Crocothemis erythraea</i>	A

Ce qui donne, sur la base des éléments fournis en annexe 1, un indice de qualité du site de $(6 \times 1 + 5 \times 2 + 1 \times 3) / 12 = 1,58$, correspondant à un niveau faible.

En 2013, deux nouvelles espèces sont venues compléter la liste : *Sympecma fusca* et *Cordulegaster boltonii*, considérées comme moyennement tolérantes, voire peu tolérante pour le Cordulégastre. Ce qui donne un indice légèrement meilleur de 1,64 à 1,71 selon le classement du Cordulégastre.

Sur cette base, l'hypothèse selon laquelle on observerait une réduction de l'eutrophisation peut être formulée. Néanmoins, il faudrait connaître l'origine du Cordulégastre (issu du site ou de l'extérieur du site ?). Il est par ailleurs important de souligner que l'arrivée de ces deux nouvelles espèces n'est que peu significative, bien qu'elle amorce peut-être une tendance positive sur l'eutrophisation du milieu.

On peut ainsi mesurer une évolution du milieu sur la base de cette simple liste à condition que les individus soient réellement issus du milieu, et que le mode opératoire soit identique pour ne pas biaiser la pression d'observation.

L'indicateur « odonates » gagnerait aussi en pertinence si l'on prenait en compte, sur des transects échantillon, le nombre d'individus observés. Ceci permettrait d'améliorer la précision de l'indice de qualité. En effet, on peut avoir un équilibre entre les espèces tolérantes et moyennement tolérantes comme ici, mais un déséquilibre si l'on compte les individus au profit d'un pôle (tolérance forte à la pollution) ou l'autre (tolérance modérée à la pollution).

De même, nous aurions pu tester l'indicateur « Lépidoptères » basé sur la couleur ou sur la présence des espèces, mais là encore la notion de quantité d'individus sur un pas de temps donné est importante à prendre en compte. Or seule la liste des espèces observées est actuellement disponible.

CONCLUSION ET LIMITES

Sur ce site, l'utilisation des indicateurs pourrait être pertinent pour vérifier l'évolution du milieu suite à la restauration. Néanmoins, il faudrait mettre en place des protocoles de relevés de terrain qui permettent non seulement de lister les espèces présentes sur une placette ou un transect donné, l'idéal dans les différents milieux, mais aussi de quantifier l'abondance, soit en indiquant les taux de recouvrement pour les espèces végétales selon la grille de Braun-blauquet ou des abaques, soit en dénombrant les individus observés pour les espèces animales.

4.3 Site de ArcelorMittal

PRESENTATION GENERALE DU SITE

Le site d'Arcelormittal se situe sur la commune de Châteauneuf, dans le département de la Loire (42), entre les communes de Saint-Etienne et Givors. Il est localisé au droit du crassier métallurgique appartenant à l'usine Industeel France. Cette usine sidérurgique est spécialisée dans le recyclage et la production d'aciers spéciaux et est occupé depuis la fin du 19^{ème} siècle. L'entreprise possède une décharge interne (« crassier ») de co-produits d'activité métallurgique répertoriée dans Basol et situé depuis toujours à l'extrémité Est du site. Il a été nivelé pour constituer la plate-forme sur laquelle ont été progressivement construites les diverses installations industrielles. Ainsi, les installations actuelles telles que l'aciérie, les voies ferrées, la halle d'expédition et le parc à ferraille sont sur la plate-forme constituée par l'ancien crassier qui s'est alors développé vers le Nord-Est au fur et à mesure de l'expansion de l'usine, jusqu'à sa position actuelle (Nord Est). Le crassier s'étend sur une surface d'une quinzaine d'hectares et a une épaisseur de 8 à 10 m avec un sol très particulier, de type « technosol », très peu développé, qui ne s'est pas formé à partir de la roche-mère, mais directement à partir des déchets de fonderie.



Plusieurs problématiques de recherche sont posées sur ce site atelier du réseau Safir vis-à-vis de la gestion des sols (source www.safir-network.com/) dont le transfert de contaminants métalliques vers les différents compartiments, air, eau, sol, vivant (végétal, animal, humain), les méthodes de protection et de remédiation des milieux ou les relations entre la friche industrielle et son territoire.

En 2010 ce site a fait partie des cas d'étude du programme Bioll (ADEME, 2009-2012) qui s'est intéressé à trois surfaces avoisinantes présentant 3 cas d'étude de revégétalisation spontanée, une absence de végétation, une végétalisation partielle (30%) et un couvert végétal plus dense (60-70%) nous permettant ainsi de disposer de beaucoup de données de bioindication dans le cadre de la présente étude. Plus récemment une partie du site a été soumise à des essais de phytostabilisation (projet PHYSAFIMM 2010-2014³⁶). Ce sont les suivis de ces essais de phytostabilisation et donc de restauration du site qui sont pris en compte ici.

Plus spécifiquement, 9 parcelles et lysimètres associés ont été mis en place afin de croiser 2 variables qui semblaient pertinentes pour la phytostabilisation (Tableau 16) : l'apport d'une matière organique (aucun apport, MIATE (Matière d'intérêt Agronomique Issue du Traitement des Eaux) et BRF (Bois Raméal fragmenté) et le type de semi (aucun apport ou semi spontané, mélange classique (M1) utilisé en revégétalisation et mélange optimisé (M2) associant des espèces végétales caractéristiques de friches métallurgiques).

³⁶ <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/physafimm-synthese-vf.pdf>

Tableau 16. Typologie des parcelles du site d'ArcelorMittal.

Apport/Semis	Semis classique M1	Semi optimisé M2	Semi spontané
BRF	P1	P4	P7
MIATE	P2	P5	P8
Sans apport	P3	P6	P9

DONNEES DISPONIBLES

Les données disponibles sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tableau 17).

Tableau 17. Présentation des ressources documentaires mises à dispositions sur le site d'ArcelorMittal.

Année	Nom de l'étude	Périmètre concerné	Données disponibles	Remarque complémentaires
2011	PROGRAMME ADEME BIOINDICATEUR – PHASE II Rapport intermédiaire de site - Campagne 2010 - Site atelier Industeel-Loire (ArcelorMittal)	Trois zones de 100 m ²	Flore (espèces dominantes par placette, accumulation foliaire des éléments traces, lipides foliaires), Analyse des sols, Accumulation des ETM dans des escargots, lombriques et mésofaune	Ce projet avait pour objectif de tester la sensibilité de bio-indicateurs vis-à-vis d'une pollution, les parcelles étudiées n'avaient pas fait l'objet d'une réhabilitation quelconque et les données ne peuvent être utilisés ici.
2009	Physafimm. La PhytoStabilisation: méthodologie Applicable aux Friches Industrielles Métallurgiques et Minières	-	-	Description du projet
2011	Tableur Excel	9 parcelles de 50 m ²	Flore (recouvrement, espèces présentes et abondance relative) Analyse de sols (pH, matière organique, N, C/N, CaCO ₃ , CEC, Na ₂ O, granulométrie) Géochimie (teneurs en métaux totaux et pour certains teneurs facilement disponibles, paramètres	Protocole visant à tester différentes modalités de phytostabilisation. Relevés permettant de tester certains indicateurs 'végétation'
2012				
2013				
2014	Physafimm. La PhytoStabilisation : méthodologie Applicable aux Friches Industrielles Métallurgiques et Minières. Rapport final	-	-	Rapport final à l'issu du projet de recherche.

CHOIX DES INDICATEURS A SUIVRE AU REGARD DES OBJECTIFS DE RESTAURATION

L'application de la grille de lecture à ce site permet d'obtenir les résultats suivants :

1	Type de dégradation
<p>Si dégradation physique, veuillez préciser la nature de cette dégradation :</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Dévégétalisation des sols (sols mis à nu)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Présence d'un technosol</p> <p>Si dégradation chimique, veuillez préciser la nature de cette dégradation :</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Contamination métallique (présence de métaux dans les sols)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Contamination organique</p> <p><input type="checkbox"/> Contamination minérale (N, P) / sols eutrophisés</p>	

→ Le crassier s'étend sur une surface d'une quinzaine d'ha et a une épaisseur de 8 à 10 m avec un sol très particulier, de type « technosol », très peu développé, qui ne s'est pas formé à partir de la roche-mère, mais directement à partir des déchets de fonderie. La dégradation du site est donc à la fois physique (technosol dévégétalisé) et chimique (possible contamination organique, contamination métallique notamment en Mn, Zn, Sn, Pb, Cr, Cu, Sn, Mo etc.).

2	Ecosystèmes visés par la restauration
<p><input type="checkbox"/> Milieux humides</p> <p style="margin-left: 150px;">Type de zone humide :</p> <p style="margin-left: 250px;"><input type="checkbox"/> Zone humide de type alluvial</p> <p style="margin-left: 250px;"><input type="checkbox"/> Zone humide en tête de bassin versant connectée au réseau hydrographique</p> <p style="margin-left: 250px;"><input type="checkbox"/> Autres types de zones humides (étendue d'eau, zones humides de plateau, zones humides dépressionnaires etc.)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Milieux non humides</p>	

→ En dépit de la proximité du site au cours d'eau « le Gier », les milieux observés sur le crassier sont non humides. On ne note en effet pas d'espèce hygrophile dans les listings des relevés, mais la nappe ne semble pas profonde, compte tenu des essences ligneuses liées aux ripisylves qui ont été relevées à savoir le Frêne élevé et le Peuplier noir.

3 Les usages sur le site et dans l'environnement du site		
<input type="checkbox"/> Usage agricole ou apicole	<input type="checkbox"/> Usage industriel (Prélèvement en eau)	<input type="checkbox"/> Site touristique
<input type="checkbox"/> Site ouvert au public (accessible librement)	<p>Si vous avez coché " Site ouvert au public", veuillez préciser le(s) type(s) d'usages :</p> <input type="checkbox"/> Le site accueille des visiteurs <input checked="" type="checkbox"/> Le site est le support d'activités de recherche <input type="checkbox"/> Le site est utilisé à des fins pédagogiques <input type="checkbox"/> Les chasseurs pratiquent leur activité sur le site <input type="checkbox"/> Les pêcheurs (de loisir) pratiquent leur activité sur le site <input type="checkbox"/> Des ressources médicinales y sont prélevées <input type="checkbox"/> Des habitants vivent à proximité du site (moins de 10 km)	
<input checked="" type="checkbox"/> Usages à l'extérieur du site	<p>Si vous avez coché "Usages à l'extérieur du site", veuillez préciser si :</p> <input type="checkbox"/> Des agriculteurs sont présents à proximité directe du site (2 km max) <input checked="" type="checkbox"/> Des agriculteurs, éleveurs, industries ou des habitants sont présents en aval du site	

→ Des projets de recherche sont en cours sur le site afin de développer des techniques de phytostabilisation et phytoaccumulation efficaces. Néanmoins, encore en activité, le site n'est pas ouvert librement au public.

D'après ces différents éléments, les **fonctions**, présentant un enjeu, incluent principalement (étape 4 de la grille de lecture) :

- Pour les fonctions hydrogéomorphologiques :
 - Stabilisation des sols (protection contre l'érosion) ;
- Pour les fonctions biogéochimiques :
 - Rétention, transformation et élimination des polluants ;
 - Restauration et maintien de la qualité des sols.

Pour chacun de ces fonctions, les indicateurs retenus sont listés dans le tableau ci-dessous (Tableau 18).

Tableau 18 : Fonctions et indicateurs pertinents pour évaluer le succès de la restauration du site d'ArcelorMittal.

Fonctions	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs pertinents spécifiquement dans le cadre du projet avec pour hypothèse budget moyen et niveau de complexité modéré (+ dire d'expert)	Indicateurs testés (données disponibles)
Rétention des eaux de ruissellement	Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Taux d'infiltration de l'eau dans les sols (28) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) (31) ; Index de la qualité des sols basé sur des	Taux d'infiltration de l'eau dans les sols (28) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Structure de la végétation (35)	Structure de la végétation (35) testé en partie sur les placettes de phytostabilisation et comparaison 2011 / 2013

Fonctions	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs pertinents spécifiquement dans le cadre du projet avec pour hypothèse budget moyen et niveau de complexité modéré (+ dire d'expert)	Indicateurs testés (données disponibles)
	propriétés physico-chimiques et biologiques (34) ; Structure de la végétation (35)		
Stabilisation des sols (protection contre l'érosion)	Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) (31) ; Index de la qualité des sols basé sur des propriétés physico-chimiques et biologiques (34) ; Structure de la végétation (35)	Structure de la végétation (35) Indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) (31) ; Index de la qualité des sols basé sur des propriétés physico-chimiques et biologiques (34)	Structure de la végétation (35) testé en partie sur les placettes de phytostabilisation et comparaison 2011 / 2013
Restauration et maintien de la qualité des sols	Biologie du sol : Densité et biodiversité des vers de terre (1); Nématofaune :Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI), de maturité (IM), des nématodes phytophages (PPI) et indice des voies de décomposition (IVD) (3) ; Les microarthropodes du sol (4) ; Activités enzymatiques (9) ;Respirométrie (Oxitop®) (10) ; Biomasse moléculaire microbienne (11) ; Empreinte moléculaire des communautés microbiennes (bactéries et champignons) (12) ; Diversité taxonomique microbienne (13) ; Diversité métabolique potentielle (14) ; Gènes de fonction (15) ; Biodiversité des sols (21) ; Activités biologiques du sol (22) ; Index d'altération des sols basé sur des activités enzymatiques (32) ; Index d'altération des sols basé sur l'analyse des PFLA (33) Physico-chimie du sol : Episolum humifère en surface (16) ; Fertilité des sols (20) ; Propriétés physico-chimiques du sol (23) ; Stock de carbone des sols (27) ; Taux d'infiltration de l'eau dans les sols (28) ; Indice de la qualité chimique du sol (29) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) (31) ; Index de la qualité des sols basé sur des propriétés physico-chimiques et biologiques (34)	Biologie du sol : Nématofaune : Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI), de maturité (IM), des nématodes phytophages (PPI) et indice des voies de décomposition (IVD) Activités enzymatiques (9) ou Index d'altération des sols basé sur des activités enzymatiques (32) Biomasse moléculaire microbienne (11) Physico-chimie du sol : Index d'altération des sols (32) Indice de la qualité chimique du sol (29) ; Capacité de rétention d'eau du sol et réserve utile (30) ; Indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) (31) ; Index de la qualité des sols basé sur des propriétés physico-chimiques et biologiques (34)	Seuls des données physico-chimiques sont disponibles pour le site et ont permis le calcul de l'indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) (31).
Rétention, transformation	Biologie du sol Densité et biodiversité des vers de terre (1) ; Indice SET escargots (2)	Indicateur - Lépidoptères (41), Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie	Indicateur floristique de fertilité des sols

Fonctions	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs pertinents spécifiquement dans le cadre du projet avec pour hypothèse budget moyen et niveau de complexité modéré (+ dire d'expert)	Indicateurs testés (données disponibles)
et élimination des polluants (pollution organique et métallique)	<p>; Nématofaune : Indices d'enrichissement (EI), de structure (SI), de maturité (IM), des nématodes phytophages (PPI) et indice des voies de décomposition (IVD) (3) ; Les microarthropodes du sol (4) ; Expression génique de la métallothionine (MT) par les vers de terre (5) ; Activités enzymatiques (9) ; Respirométrie (Oxitop®) (10) ; Biomasse moléculaire microbienne (11) ; Empreinte moléculaire des communautés microbiennes (bactéries et champignons) (12) ; Diversité taxonomique microbienne (13) ; Diversité métabolique potentielle (14) ; Gènes de fonction (15) ;</p> <p>Physico-chimie du sol Contaminants totaux (24) ; Contaminants disponibles (25) ;</p> <p>Indicateurs Faune/flore Indice CMT végétaux (6) ; Bioaccumulation des éléments métalliques par les micromammifères (7) ; Indice Omega 3 (8) ; Indicateur - Lépidoptères (41), Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie (42)</p>	<p>(42)</p> <p>Indice CMT végétaux (6)</p> <p>Indice Omega 3 (8)</p> <p>Indice SET escargots (2)</p> <p>Contaminants disponibles (25) ; Contaminants totaux (24)</p>	<p>ou d'eutrophilie (42) testé à partir des données disponibles de relevés sur les placettes de phytostabilisation et comparaison 2011 / 2013</p> <p>Teneurs en métaux totaux et lixiviables qui donnent une idée de la réussite de la phytostabilisation en termes de ralentissement de la lixiviation des polluants.</p>

Concernant les **services écosystémiques**, les enjeux concernent principalement (étape 5 de la grille de lecture) :

- Pour les services culturels :
 - Les activités éducatives, sensibilisation à l'environnement
- Pour les services de régulation :
 - La protection contre les inondations
 - La régulation de la qualité de l'eau
 - La régulation du climat global
 - La protection contre l'érosion

Pour chacun de ces services écosystémiques, les indicateurs retenus sont listés dans le tableau ci-dessous (Tableau 19).

Tableau 19 : Services écosystémiques et indicateurs pertinents pour évaluer le succès de la restauration du site d'ArcelorMittal.

Service écosystémique	Indicateurs proposés par la grille de lecture	Indicateurs testés (données disponibles)
Intérêt scientifique	Nombre de projets de recherche (11)	<i>Données non disponibles</i>
Protection contre les inondations	Stockage des eaux de crue (m ³) (17)	<i>Données non disponibles</i>
Régulation de la qualité des eaux	Qualité des eaux (18)	<i>Données non disponibles</i>
Régulation du climat global	Stockage de gaz à effet de serre (tonnes de CO ₂) (20)	<i>Données non disponibles</i>
Protection contre l'érosion	Rétention des eaux de ruissellement (m ³) (15) ; Risque d'érosion du sol (16)	<i>Données non disponibles</i>

Aucune donnée n'étant disponible, aucun test des indicateurs liés aux SE n'a pu être réalisé.

TESTS DES INDICATEURS FLORISTIQUES SELECTIONNES

Sur le jeu de données des trois années de suivis pour étudier la stabilisation des sols par la végétation (phytostabilisation), quelques relevés dans des conditions différentes ont permis de tester l'indicateur d'eutrophilie (42) sur les listes de présence / absence. Des compléments (recouvrement et diversité/richeesse spécifique) issus du rapport Physafimm ont été ajoutés afin d'enrichir l'analyse et conclure quant au traitement le plus favorable pour les différentes fonctions ciblées.

Trois placettes ont été choisies :

- La P6 sans amendement et avec un ensemencement par un assemblage optimisé ;
- La P2 avec un amendement par Matériaux d'Intérêt Agronomique issus du Traitement des Eaux (MIATE) et un assemblage classique,
- Et la P8 avec MIATE et un ensemencement spontané.

Ces trois conditions nous semblaient suffisamment différentes et intéressantes pour tester des conditions *a priori* plus ou moins eutrophes et plus ou moins dynamisées par des semis.

Pour chacune, nous avons établi le spectre d'eutrophilie de 2011 et 2013 pour regarder si des tendances de trajectoire pouvaient être décelées.

Sur la **parcelle P6**, on constate en 2011, une richesse spécifique de 15 espèces dont 21% sont considérées comme eutrophes et 21,4% méso-eutrophes (Figure 21). Selon la grille d'évaluation proposée (annexe 1), on est d'ores et déjà dans un état relativement correct sur cette parcelle qui n'a pas reçu d'amendement.

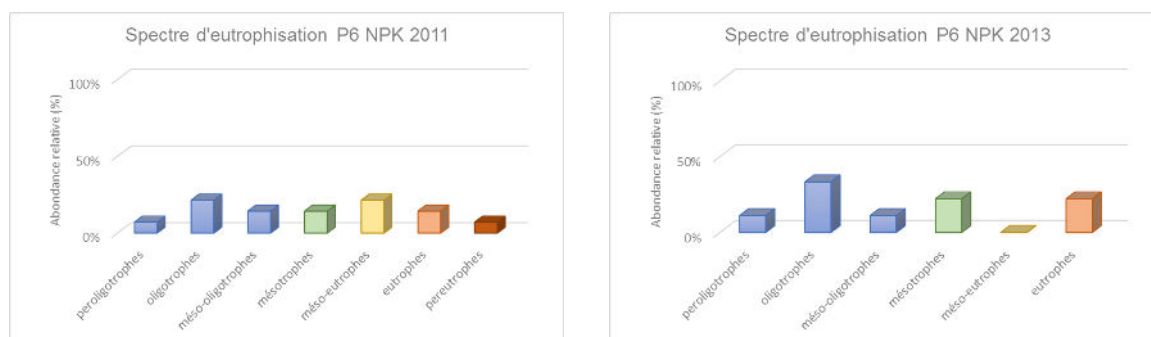


Figure 21 : Graphiques en histogrammes montrant les pourcentages d'espèces par catégories d'eutrophisation, résultats issus des relevés 2011 et 2013 sur la parcelle P6 du programme Physafimm.

En 2013, la diversité diminue avec une disparition logique d'espèces pionnières annuelles ou bisannuelles (Figure 22 et 23).

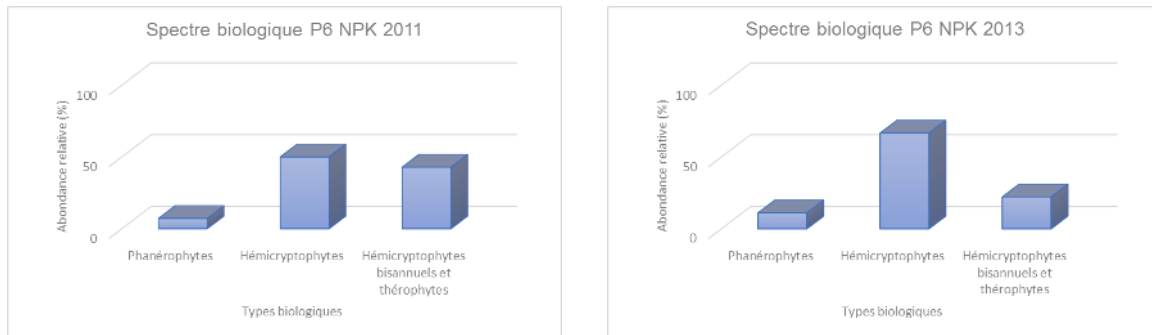


Figure 22 : Graphiques en histogrammes montrant le nombre d'espèces par type biologique, résultats issus des relevés 2011 et 2013 sur la parcelle P6 du programme Physafimm.

On passe ainsi à 9 espèces avec 21,4 plantes eutrophes, mais une disparition des méso-eutrophes et péreutrophes. La trophie moyenne du milieu a donc légèrement diminué.

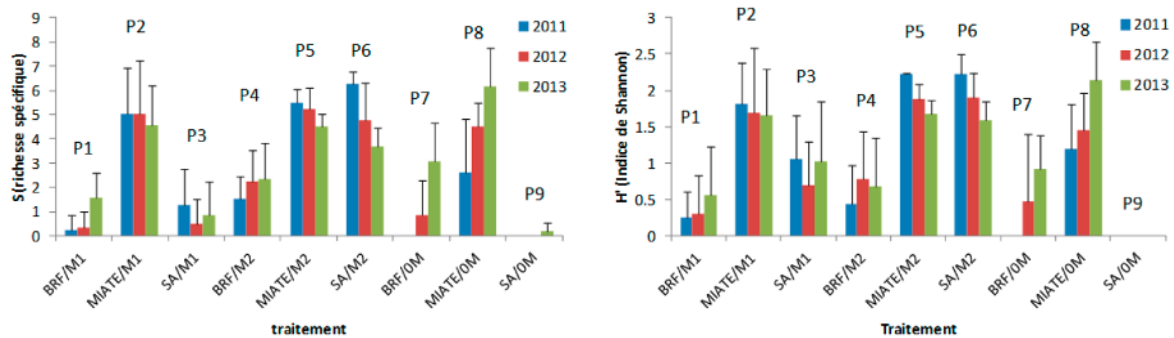


Figure 23. Evolution de la richesse spécifique (S) et de la diversité spécifique (H') entre 2011 et 2013 pour la végétation des parcelles du programme Physafimm.

Le recouvrement moyen est relativement élevé comme l'indique la figure suivante (Figure 24).

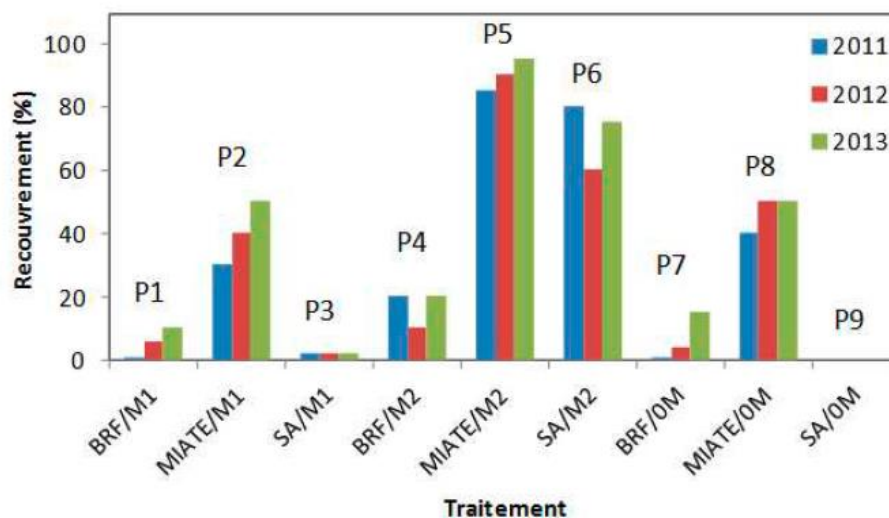


Figure 24. Evolution du taux de recouvrement de neuf parcelles du programme Physafimm de 2011 à 2013.

Sur la **parcelle P2/L2**, sur laquelle a été incorporé un amendement de MIATE, on passe de 15 espèces en 2011 à 21 espèces en 2013, avec un gain d'espèces eutrophes, surtout des méso-eutrophes liées aux milieux de friche (Figure 25). Mais si l'on tient compte de l'équilibre global en pourcentage, le taux de recouvrement d'espèces eutrophes évolue de 40% d'espèces véritablement eutrophes à 33%. De prochains relevés pourraient montrer si la tendance s'inverse avec une meilleure stabilisation du substrat par la dominance des espèces vivaces et une réduction des annuelles et bisannuelles, voire une disparition, ainsi qu'un glissement du spectre d'eutrophisation au profit des espèces mésotrophes et méso-eutrophes, en passant en dessous des 30%.

Le recouvrement total apparaît par ailleurs modéré (plus faible que P6, Figure 24).

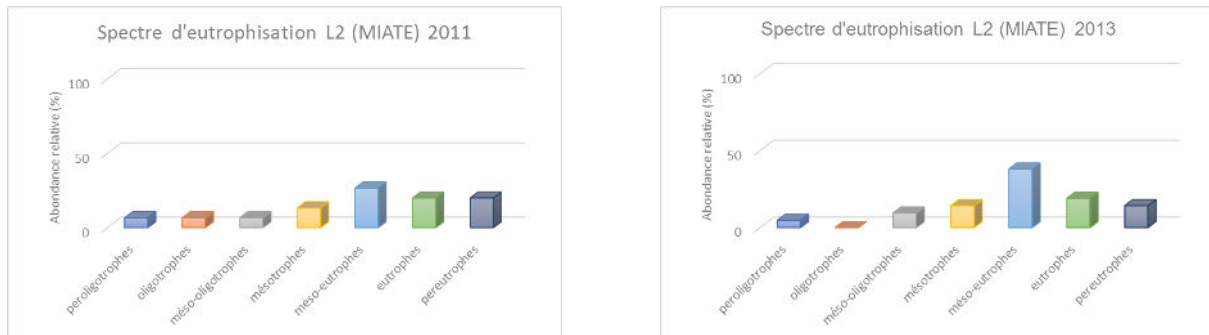


Figure 25 : Graphiques en histogrammes montrant les pourcentages d'espèces par catégories d'eutrophisation, résultats issus des relevés 2011 et 2013 sur la parcelle P2 du programme Physafimm.

Sur la **parcelle P8/L8**, enfin, également amendée avec des MIATE, on observe une relative stabilité du nombre d'espèces issues d'un ensemencement spontané, mais seulement 7 espèces en commun entre 2011 et 2013. L'agencement a donc évolué, mais aussi l'eutrophilie qui en 2011 montrait 40% d'espèces eutrophes contre 28,5% en 2013, passant donc à un niveau jugé correct. On note également une augmentation significative des espèces méso-oligotrophes qui constituent des stades pionniers de pelouse comme *Vulpia ciliata* dont le recouvrement est important (40%), ce qui est un bon facteur de changement du milieu avec une trajectoire correcte de résorption de la pollution minérale.

Enfin, le recouvrement apparaît modéré (au même niveau que P2, Figure 24) et la diversité en forte augmentation sur les trois années pour atteindre un niveau comparable à celui de P6 la première année (Figure 23).

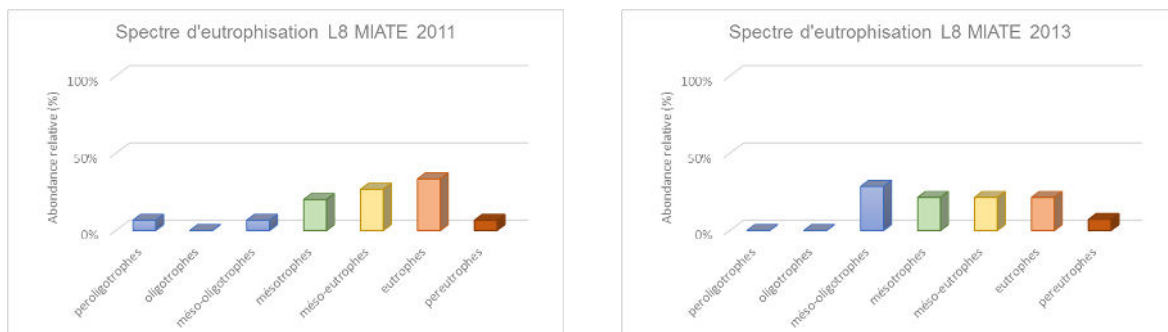


Figure 26 : Graphiques en histogrammes montrant les pourcentages d'espèces par catégories d'eutrophisation, résultats issus des relevés 2011 et 2013 sur la parcelle L8/P8 du programme Physafimm.

Les différents indicateurs présentés ici soulignent l'influence favorable du MIATE sur le recouvrement par la végétation et donc sur les fonctions de stabilisation des sols et de rétention, transformation et élimination des polluants. Les parcelles ayant reçu du MIATE sont par ailleurs celles qui présentent la richesse et diversité spécifique la plus importante, notamment en absence de semis (diversité moindre pour les assemblages optimisés et classiques). Ce résultat associé aux résultats sur la trophie indique que l'absence de semis est vraisemblablement préférable aux ensemencements de diverses compositions. En effet, même si le recouvrement à court terme apparaît plus important avec semis, la qualité de résorption n'est peut-être pas la même, et surtout la mise en place durable d'une végétation de type pelouse semble plus efficace/pérenne à long-terme. Cela serait en outre probablement plus favorable à la faune locale. Sur ce point il serait alors intéressant d'étudier aussi l'indicateur « Lépidoptères » qui pourrait compléter de manière intéressante les indicateurs de végétation.

TESTS DES INDICATEURS DE LA QUALITE DES SOLS SELECTIONNES

Les indicateurs jugés pertinents pour cette étude avec pour hypothèse un budget moyen et un niveau de complexité modéré (Tableau 18) ont été sélectionnés pour être réalistes en lien avec des données potentiellement disponibles mais aussi leur pertinence pour l'étude, leur coût, leur accessibilité et l'existence de référentiels. A ce jour, il n'existe que peu de référentiels existants sur les paramètres microbiologiques du sol qui puissent être interprétés vis-à-vis de témoins ou de situations différentes. Ceci tendra à être de moins en moins vrai avec une application plus répandue de ce type d'indicateurs.

Des paramètres pédologiques et géochimiques ont été suivis pendant les essais de phytostabilisation. Les données fournies sous format de tableau Excel et l'ensemble des données ont été traités et discutés dans le rapport final du projet Physafimm. Il ne semble pas utile ici de représenter l'ensemble de ces données cependant plusieurs conclusions de l'étude sont intéressantes du point de vue du risque de transfert des éléments métalliques. En premier lieu, le constat que le pH n'a pas été affecté par les traitements (autour de 9) et qu'en dépit de ce pH, la phytostabilisation reste élevée permet de présager une bonne stabilité des transferts de métaux vers le sous-sol³⁷.

Au vu des indicateurs ou indices identifiés dans le présent travail et permettant d'apporter un complément à l'analyse des données réalisée par l'équipe du projet Physafimm et au regard des données disponibles, nous avons calculé l'indice de la qualité physico-chimique du sol (RSQI) proposé par Wang et Gong en 1998. Bien qu'initialement développé pour des sols subtropicaux en Chine, cet indicateur se base sur 12 paramètres du sol liés à des propriétés physico-chimiques permettant un développement végétal adéquat : la profondeur du sol, sa texture, son inclinaison, la teneur en matière organique, en N, P et K total et disponible, son CEC ainsi que son pH. Ces 12 paramètres ont été pondérés selon leur importance vis-à-vis de la qualité des sols et leurs valeurs classées dans 4 classes selon qu'ils soient très favorables, favorables, moyennement favorables ou peu favorable à la croissance végétale. Le calcul de l'indice consiste alors à sommer les produits des poids des paramètres selon leur classe. Ce calcul a été appliqué sur l'ensemble des parcelles du projet Physafimm pour les années 2011 et 2013 (Figure 27).

³⁷ Les métaux sont plus adsorbés à des pH élevés (basiques) qu'acides.

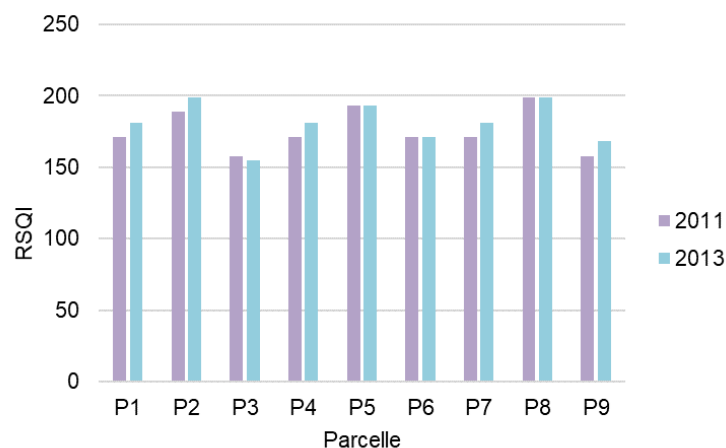


Figure 27. Indice de la qualité physico-chimique des sols (RSQI) sur l'ensemble des parcelles d'ArcelorMittal en 2011 et 2013.

Ce graphique montre que selon l'indice RSQI la qualité des sols s'est améliorée dans la plupart des parcelles sauf dans la p5, p6 et p8 où elle n'a pas varié et p3 où elle a légèrement baissé. Cette amélioration est due à l'augmentation du CEC des sols entre 2011 et 2013. Par ailleurs nous pouvons constater que c'est dans les parcelles ayant reçu du MIATE que l'indice est le plus élevé, lié aux teneurs plus importantes en azote dans ces sols. Il présente par ailleurs la valeur la plus faible dans les traitements n'ayant pas reçu d'apport organique. Ces résultats mettent en avant la capacité de cet indice à différencier les différents traitements du sol et corroborent les indicateurs floristiques sur l'effet positif de l'apport de MIATE.

CONCLUSION ET LIMITES

Les indicateurs sur la structure et l'eutrophilie de la végétation sont pertinents pour évaluer l'évolution des parcelles sur le degré de stabilisation et surtout de résorption de la matière polluante par mise en place progressive de groupements spontanés de type « pelouse » méso-eutrophe. Bien que le nombre d'espèces soient assez faibles pour rendre très significatives les tendances, les réponses semblent rapides et assez fines. Ces indicateurs complètent aussi bien l'approche précédente qui estimait les taux globaux de recouvrement de la végétation et confirment que l'absence d'ensemencement en privilégiant la colonisation naturelle s'avère plus efficace.

La poursuite des relevés tels qu'ils ont été pratiqués sur les parcelles expérimentales est donc à recommander sur plusieurs décennies (par ex., 3, 6, 9, 15, 20 ans) car ils sont suffisants pour pouvoir utiliser correctement les indicateurs proposés donnant de bons résultats d'appréciation. L'évolution de la composition floristique et le calcul subséquent des indicateurs adéquats devrait en outre permettre de sélectionner le mode de gestion le plus adéquat possible pour obtenir une trajectoire de résilience qui concilie diminution de la richesse trophique polluante et augmentation de la qualité biologique des milieux obtenus (voir annexe 1).

5- Conclusions et perspectives

Cette étude avait pour objectif d'identifier une méthodologie permettant de suivre l'incidence des actions de restauration sur les différentes composantes de l'écosystème (biodiversité, fonctions et services écosystémiques) et ce, dans le contexte des sites pollués et dégradés. En effet, bien que ces dernières années de nombreux essais de réhabilitation aient été réalisés, il n'existe pas d'approche adaptée à l'évaluation de leur réussite en termes de biodiversité.

Un premier travail d'analyse de la réglementation a permis de mettre en évidence l'absence de dispositifs juridiques contraignants concernant les sols que ce soit à l'échelle internationale ou européenne. En effet, si la charte mondiale des sols, la convention sur le développement durable de Rio (2012) ou encore la charte européenne sur la protection et la gestion durable des sols affirment un certain nombre de principes fondamentaux et recommandent la mise en place d'actions fortes de protection de ces sols, aucun de ces dispositifs n'est pour autant contraignant. En France spécifiquement, la loi 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages a pour ambition 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. Néanmoins, malgré ces avancées notables, 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, la politique agricole et forestière etc. Dans le cadre de la réglementation liée aux sites et sols pollués, les dernières modifications des textes de loi sont toutefois favorables à la prise en compte de la biodiversité lors des réhabilitations de sites et à la préservation des sols.

Au-delà des aspects réglementaires, l'évaluation de la réussite d'une opération de restauration de site dégradé (pollué ou non) reste encore difficile à appréhender. Ce verrou a fait l'objet de la partie centrale de cette étude qui a abouti à une synthèse des indicateurs de mesure de la biodiversité et de la fonctionnalité des milieux ainsi que des indicateurs des services écosystémiques attendus dans les environnements ciblés, à savoir la restauration de milieux humides ou de prairies et pelouses sèches.

Un premier travail a permis d'identifier une méthodologie à appliquer, basée sur la littérature et les cadres conceptuels existants. Elle prend en compte trois aspects de l'écosystème : la régénération de l'écosystème endommagé, la restauration des fonctions écologiques de cet écosystème et le rétablissement des services écosystémiques associés à cet écosystème. La méthode retenue, présentée sous le forme d'une « grille de lecture », a pour vocation d'identifier les spécificités des sites afin de sélectionner les indicateurs les mieux adaptés (46 indicateurs de fonction qualifiant le compartiment souterrain et aérien et 21 indicateurs liés aux services écosystémiques). Ces indicateurs visent en priorité à évaluer la réussite d'une réhabilitation ou d'une restauration en caractérisant différentes fonctions (fonctions hydrogéomorphologiques, biogéochimiques et biologiques) et services écosystémiques qui en découlent (biens produits par les écosystèmes, services culturels, services de régulation).

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 : une installation de stockage de déchets, un crassier métallurgique phytostabilisé et une ancienne carrière restaurée en milieu humide (bassin d'écrêtage des crues). Le test réalisé sur le site de Villeneuve-sur-Verberie souligne la pertinence des actions mises en œuvre pour restaurer les fonctions biogéochimiques et hydrogéomorphologiques visées. En revanche, il semblerait que la qualité des milieux prairiaux tende à se dégrader sensiblement avec probablement une réduction de l'entretien (apparition d'espèces envahissantes, tendance à la fermeture du milieu etc.). L'analyse des données du site d'ArcelorMittal (crassier métallurgique phytostabilisé) 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. Les résultats obtenus convergent avec ceux obtenus par l'équipe scientifique en charge du projet PHYSAFIMM, à savoir la pertinence d'un traitement associant MIATE³⁸ et ensemencement naturel pour favoriser la phytostabilisation des sols. Enfin, concernant le site de Vaires-sur-Marne, 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 montre 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. Egalement, 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.

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 réhabilitation 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 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.

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 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.

³⁸ Matériaux d'Intérêt Agronomique issus du Traitement des Eaux.

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 bienfondé des projets de restauration, ce qui peut s'avérer utile pour justifier les coûts financiers de ces projets et favoriser leur acceptabilité.

6- Bibliographie

- Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011.** Zones humides : évaluation économique des services rendus - Analyse sur sept sites tests du bassin Loire-Bretagne.
- ADEME, ADERA-LEB Aquitaine Transfert, ELISOL, Mines Saint-Etienne, EODD Ingénieurs Conseils. 2017.** APPOLINE : Applicabilité à l'étude des sites pollués du biomarqueur lipidique des végétaux et du bio-indicateur nématofaune, 187 p.
- ADEME. 2015.** Les sols portent notre avenir. Connaître pour agir Réf. 8387. 16 p.
- ADEME. 2014.** Biodiversité et reconversion des friches urbaines polluées. *Collection Connaître pour agir.* 19 p.
- ADEME. 2011.** La gestion intégrée des sols, des eaux souterraines et des sédiments pollués, feuille de route stratégique. 35 p. <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe-feuille-de-route-sols-pollues-fr-web.pdf>
- AFES. 2008.** Référentiel pédologique, éditions Quæ.
- Agence de l'eau Loire-Bretagne. 2011.** Zones humides : évaluation économique des services rendus - Analyse sur sept sites tests du bassin Loire-Bretagne.
- Amiaud, B. et Carrère, P., 2012.** La multifonctionnalité de la prairie pour la fourniture de services écosystémiques. *Fourrages.* 211. 229-238
- Aronson, J., 2010.** Restauration, réhabilitation, réaffectation : ce que cachent les mots. *Espaces naturels n°29.*
- Aronson J, Floret C, Floc'h E, Ovale C, Pontanier R. 1993.** Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands. I. A View from the South. *Restoration ecology* 1: 8–17.
- ASTM E2893-16e1. 2016.** Standard Guide for Greener Cleanups, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bazin P, Barnaud G. 2002.** Du suivi à l'évaluation : à la recherche d'indicateurs opérationnels en écologie de la restauration. *Rev. Ecol. (Terre Vie) Supplément 9:* 201–224.
- Benayas JMR, Newton AC, Diaz A, Bullock JM. 2009.** Enhancement of Biodiversity and Ecosystem Services by Ecological Restoration: A Meta-Analysis. *Science* 325: 1121.
- Billé, R. et al. 2012.** Valuation without action? On the use of economic valuations of ecosystem services. *IDDRI. n°07/12*
- Binet T. et al. 2012.** Services écologiques des écosystèmes du Parc national de Guadeloupe : identification et évaluation économique. Module 331 – Etude « Approche des éléments de valeur du Parc national de la Guadeloupe ». Saint-Claude, Guadeloupe. 78 p.
- Bouagal F. 2012.** La dépense de réhabilitation des sites et sols pollués en France. *Observations et Statistiques - Commissariat Général au Développement Durable. N° 142.* 4 p.
- Brahic et Terreaux, 2009.** Évaluation économique de la biodiversité : Méthodes et exemples pour les forêts tempérées.
- Bruxelles environnement. 2016.** *Indicateur : Etat chimique des eaux souterraines.*
http://www.environnement.brussels/sites/default/files/user_files/ree1114_fm_gw_chemistry_fr.pdf
- Bünemann, E.K. et al. 2018.** Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry,* 120, 105-125.

- Carchini, G., V. D Bella, A. G. Solimini, et M. Bazzanti. 2007.** Relationships between the presence of odonate species and environmental characteristics in lowland ponds of central Italy. *Annales de limnologie* **43 (2)**:81-87.
- CGDD, 2011.** La monétarisation de l'environnement. Bibliographies du CGDD.
- Centre d'Analyse Stratégique (CAS). 2006.** Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes Contribution à la décision publique. Rapport du groupe de travail présidé par Bernard Chevassus-au-Louis. 378 p.
- Chapman, S. K., J. A. Langley, S. C. Hart, and G. W. Koch. 2006.** Plants actively control nitrogen cycling: uncorking the microbial bottleneck. *New Phytologist* **169**:27-34.
- Clec'h, S.L., Oszwald, J., Decaens, T., Desjardins, T., Dufour, S., Grimaldi, M., Jegou, N., Lavelle, P. 2016.** Mapping multiple ecosystem services indicators: Toward an objective-oriented approach. *Ecological Indicators*, **69**(Supplement C), 508-521.
- Code de l'environnement**, Version consolidée au 1 décembre 2017 [Legifrance.fr](http://www.legifrance.fr)
- 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.
- Cristofoli S, Mahy G. 2010.** Restauration écologique : contexte, contraintes et indicateurs de suivi. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **14(1)**: 203–211.
- DEFRA. 2009.** Safeguarding our Soils . A Strategy for England. <https://www.gov.uk/government/publications/safeguarding-our-soils-a-strategy-for-england>
- Delzons O, Gourdain P, Siblet JP, Tourout J, Herard K, Poncet L. 2013.** L'IQE : un indicateur de biodiversité multi-usages pour les sites aménagés ou à aménager. *Rev. Ecol. (Terre Vie)*, (68) :105-119.
- Doran, J.W., Parkin, T.B. 1996.** Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America, Special Publication 49, Madison, WI, pp. 25-37.
- DSS, 2010.** Technical Report : Valuation of ecological goods and services in Canada's natural resources sectors. *Environnement Canada*. **43 p.**
- EPA/100/F15/005. 2016.** Generic Ecological Assessment Endpoints (GEAEs) For Ecological Risk Assessment: Second Edition With Generic Ecosystem Services Endpoints Added https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-08/documents/geae_2nd_edition.pdf
- EPA. 2017.** Engineering Forum Issue Paper <https://semspub.epa.gov/work/HQ/100000459.pdf>.
- Erkossa, T., Itanna, F., Stahr, K. 2007.** Indexing soil quality: a new paradigm in soil science research. *Soil Research*. **45(2)**: 129-137.
- Europa.** Portail Environnement en ligne http://ec.europa.eu/environment/soil/index_en.htm
- France Nature Environnement. 2017.** Directive habitats – Faune – Flore : 25 ans d'action. La protection Européenne de la biodiversité, une dynamique à relancer.22 p. https://ged.fne.asso.fr/silverpeas/LinkFile/Key/fffd985b-32d4-4497-afdb-718e24702fe5/20170619_DP%2025%20ANS%20DHFF.pdf
- Frauenstein J. 2009.** Current State and Future Prospects of Remedial Soil Protection - Background paper. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4041.pdf>.

- Gaston K.J., 1996.** Spatial covariance in the species richness of higher taxa. In: Hochberg M.E., Clobert J., Barbault R. Aspects of the genesis and maintenance of biological diversity. Oxford, UK: Oxford University Press, 221-242.
- Gayet G. et al. 2016.** La méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humide. <http://www.onema.fr/node/3981> .
- Gillet, F., Foucault, B. de Julve, Ph. 1991.** La phytosociologie synusiale intégrée : objets et concepts. *Candollea*. **46** : 315-340
- Godard, O., 2015.** Les conditions d'une gestion économique de la biodiversité : un parallèle avec le changement climatique. Cahier du CECO. Paris, Ecole polytechnique.
- Gouvernement du Canada. 2016.** Indicateur d'érosion du sol. *Agriculture et Agroalimentaire Canada*.
- Grimaldi, M., Oszwald, J., Dolédec, S., Hurtado, M.d.P., de Souza Miranda, I., Arnaud de Sartre, X., Assis, W.S.d., Castañeda, E., Desjardins, T., Dubs, F., Guevara, E., Gond, V., Lima, T.T.S., Marichal, R., Michelotti, F., Mitja, D., Noronha, N.C., Delgado Oliveira, M.N., Ramirez, B., Rodriguez, G., Sarrazin, M., Silva, M.L.d., Costa, L.G.S., Souza, S.L.d., Veiga, I., Velasquez, E., Lavelle, P. 2014.** Ecosystem services of regulation and support in Amazonian pioneer fronts: searching for landscape drivers. *Landscape Ecology*. **29(2)**:311-328.
- Hérault B, Honnay O. 2005.** The relative importance of local, regional and historical factors determining the distribution of plants in fragmented riverine forests: an emergent group approach. *Journal of Biogeography* **32**: 2069–2081.
- IMBE, 2015.** Evaluation des services écosystémiques potentiellement rendus par les zones humides des territoires du SAGE Scarpe aval et du Parc naturel régional Scarpe-Escaut
- IUSS Working Group WRB. 2015.** « World Reference Base for Soil Resources 2014 – International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.
- Jaulin S., 2009.** Etude des orthoptères des sites expérimentaux du LIFE Basses Corbières. Synthèse des 4 années de prospections. Rapport d'étude de l'OPIE, Perpignan. 51p.
- Jaunatre R, Buisson E, Muller I, Morlon H, Mesléard F, Dutoit T. 2013.** New synthetic indicators to assess community resilience and restoration success. *Ecological indicators* **29**: 468–477.
- Julve Ph. 1998.** Baseflor. Index botanique, écologique et chorologique de la Flore de France. Version [2016]. Programme Catminat. <http://perso.wanadoo.fr/philippe.julve/catminat.htm>
- INRA. 2017.** *Les services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFESE. Résumé de l'étude.*
- Krauss J, Steffan-Dewenter I, Tscharrntke T. 2003.** How does landscape context contribute to effects of habitat fragmentation on diversity and population density of butterflies? *Journal of Biogeography* **30**: 889–900.
- Lambeck RJ. 1997.** Focal species: a multi-species umbrella for nature conservation. *Conservation biology* **11**: 849–856.
- Laugier R. 2012.** *De la restauration écologique au génie écologique : synthèse documentaire.* Centre de ressource documentaire Aménagement, Logement, Nature.
- Lavilla, I., G Rodríguez-Liñares, J. Garrido, et C. Bendicho. 2010.** A biogeochemical approach to understanding the accumulation patterns of trace elements in three species of dragonfly larvae: evaluation as biomonitors. *Journal of Environmental Monitoring* **12 (3)**:724–730.
- Lavorel S, McIntyre S, Landsberg J, Forbes TDA. 1997.** Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends in Ecology & Evolution* **12**: 474–478.

- Lenfant et al. 2015.** Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée – Orientations et principes. 93p.
- Le Floc'h E, Aronson J. 1995.** L'Ecologie de la restauration. Définition de quelques concepts de base. *Natures Sciences Sociétés* **3**: 29–35.
- Lespez, L., Germaine, M.-A., Barraud, R. 2016.** L'évaluation par les services écosystémiques des rivières ordinaires est-elle durable ? *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* **Hors-série**.
- Lévêque C, Mounolou J.C. 2001.** Biodiversité. Dynamique biologique et conservation. Masson Sciences. Dunod, Paris.
- Maciejewski L., Seytre L., Van Es J., Dupont P. 2015.** État de conservation des habitats agropastoraux d'intérêt communautaire, Méthode d'évaluation à l'échelle du site. Guide d'application. Version 3. Avril 2015. Rapport SPN 2015-43. Service du patrimoine naturel, muséum national d'Histoire naturelle, Paris. 194 p.
- Maes J. et al. 2016.** An indicator framework for assessing ecosystem services in support of the EU Biodiversity Strategy to 2020. *Elsevier*.
- Masselot G, Nel A. 2003.** Les Odonates sont-ils des taxons bio-indicateurs ? *Martinia*. n° **19**:7-40.
- Mauchamp, L. 2014.** Biodiversité et gestion des écosystèmes prairiaux en Franche-Comté. Sciences agricoles. Université de Franche-Comté.
- Maurer K, Durka W, Stöcklin J. 2003.** Frequency of plant species in remnants of calcareous grassland and their dispersal and persistence characteristics. *Basic and Applied Ecology* **4**: 307–316.
- Millenium Ecosystem Assessment (MEA). 2005.** *Ecosystem and human well-being: wetlands and water - Synthesis*.
- MEEM. 2017.** Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. *Direction générale de la Prévention des Risques – B3S*. 128 p.
- MTES. 2017a.** Biodiversité et présentation des enjeux. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biodiversite-presentation-et-enjeux>
- MTES. 2017b.** La biodiversité s'explique. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/10004_brochure-32p_Biodiversite-s-explique_web_planches.pdf
- MEDDE. 2012.** *Stratégie nationale pour la biodiversité 2011-2020*. 60 p.
- MEDDE, MAAF. 2015.** Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols. Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols. *Rapport CGEDD n°010068-01 et CGAAER n°14135*. http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/cgaaer_14135_cgedd_010068-01_2015_rapport.pdf
- Ministère de l'Environnement. 2000.** Gestion des sites (potentiellement) pollués – version 2. *BRGM Edition*.
- Morvan, X., Saby, N.P.A., Arrouays, D., Le Bas, C., Jones, R.J.A., Verheijen, F.G.A., Bellamy, P.H., Stephens, M., Kibblewhite, M.G. 2008.** Soil monitoring in Europe: A review of existing systems and requirements for harmonisation. *Science of The Total Environment*. **391(1)** : 1-12.
- Natagora. 2015.** Les prairies permanentes pourvoyeuses de nombreux services. Projet LIFE Prairies bocagères.
- Nations Unies. 1992.** **Convention sur la diversité biologique.**

- Office fédéral de l'environnement. 2011.** Indicateurs pour les biens et services écosystémiques. Systématique, méthodologie et recommandations relatives aux informations sur l'environnement liées au bien-être. Berne.
- Obriot, F., Stauffer, M., Goubard, Y., Cheviron, N., Peres, G., Eden, M., Revallier, A., Vieublé-Gonod, L., Houot, S. 2016.** Multi-criteria indices to evaluate the effects of repeated organic amendment applications on soil and crop quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. **232**:165-178.
- Puglisi, E., Del Re, A.A.M., Rao, M.A., Gianfreda, L. 2006.** Development and validation of numerical indexes integrating enzyme activities of soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(7), 1673-1681.
- Puglisi, E., Nicelli, M., Capri, E., Trevisan, M., Del Re, A.A.M. 2005.** A soil alteration index based on phospholipid fatty acids. *Chemosphere*. **61(11)**: 1548-1557.
- Puydarrieux, P. et Devaux, J. 2013.** Quelle évaluation économique pour les services écosystémiques rendus par les prairies en France métropolitaine ? *Alim'agri*
- 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.
- Reveret, J.P., 2011.** Faut-il donner une valeur monétaire à la nature ? Communication orale. Congrès annuel de l'Association des biologistes du Québec. Boucherville.
- Rutgers, M., van Wijnen, H.J., Schouten, A.J., Mulder, C., Kuiten, A.M.P., Brussaard, L., Breure, A.M. 2012.** A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. *Science of The Total Environment*. 415.39-48.
- Society for Ecological Restoration Science & Policy Working Group. 2004.** The SER international Primer on Ecological Restoration. www.ser.org/
- Scher, O., et A. Thiery. 2005.** Odonata, amphibia and environmental characteristics in motorway stormwater retention ponds (Southern France). *Hydrobiologia* **551 (1)**: 237–251.
- Schimel J.P., Bennett J. 2004.** Nitrogen mineralization: Challenges of a changing paradigm. *Ecology* **85**:591-602.
- Seybold, C.A., Herrick, J.E., Brejda, J.J. 1999.** Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Science*. **164(4)**. 224-234.
- Somda, J. et Aboubacar, A. 2013.** Evaluation économique des fonctions et services écologiques des écosystèmes naturels. Guide d'utilisation de méthodes simples. UICN.
- Sy, M. 2006.** Evaluation des services écosystémiques et de l'intégrité écologique des systèmes lagunaires dans un processus de restauration écologique - Projet de thèse. CNRS - Observatoires Hommes-Milieus - Investissements d'avenir.
- TEEB. 2010.** *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations.*, Pushpam Kumar. ed. Earthscan, London and Washington.
- Tollett, V. D., E. L. Benvenuto, L. A. Deer, et T. M. Rice. 2009.** Differential Toxicity to Cd, Pb, and Cu in Dragonfly Larvae (Insecta: Odonata). *Archives of environmental contamination and toxicology* **56 (1)** 77–84.
- Tscharntke T, Steffan-Dewenter I, Kruess A, Thies C. 2002.** Characteristics of insect populations on habitat fragments: a mini review. *Ecological research* **17**: 229–239.
- UK NEA, n. d.** Synthesis of the Key Findings. Information Press. Oxford.

- U.S. EPA. 2009.** Valuing the Protection of Ecological Systems and Services. EPA-SAB-09-012. [https://yosemite.epa.gov/sab%5Csabproduct.nsf/F3DB1F5C6EF90EE1852575C500589157/\\$File/EPA-SAB-09-012unsigned.pdf](https://yosemite.epa.gov/sab%5Csabproduct.nsf/F3DB1F5C6EF90EE1852575C500589157/$File/EPA-SAB-09-012unsigned.pdf)
- U.S. EPA Risk Assessment Forum. 2016.** Generic Ecological Assessment Endpoints (GEAEs) for Ecological Risk Assessment: Second Edition with Generic Ecosystem Services Endpoints Added. EPA/100/F15/005. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-08/documents/geae_2nd_edition.p
- Vashalde, D. 2014.** Services écologiques rendus par les zones humides en matière d'adaptation au changement climatique - Etat des lieux des connaissances et évaluation économique.
- Walter et al. 2015.** *Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation. Cahier - Club Demeter (15)*, 51-68
- Wang, X. and Gong, Z. 1998.** Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. *Geoderma*. **81(3)**, 339-355.
- Zaninetti JM. 2008.** Les Etats-Unis face au développement durable. Un défi pour la nouvelle présidence américaine. *Population & Avenir*, 690 :4-9.

7- Annexes

Annexe 1. Présentation des protocoles pour l'analyse des communautés végétales et animales (compartiment aérien).

Les protocoles présentés ci-après ont été définis et choisis en fonction d'un compromis entre le coût et l'efficacité des indicateurs et méthodes proposés à savoir la facilité de mise en œuvre, la reproductibilité par différents opérateurs, la faisabilité dans un temps limité etc.

STRUCTURE DE LA VEGETATION ET RECOUVREMENT (35)

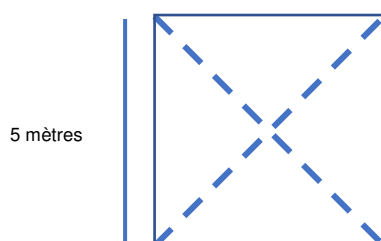
Il s'agit de s'inspirer des protocoles simples mis en œuvre pour évaluer des états de conservation par exemple ou évaluer si la trajectoire d'un milieu suit ou s'écarte trop des objectifs fixés.

Deux types d'indicateurs et de protocoles peuvent être envisagés :

- L'un structurel pour étudier si le milieu géré après perturbation / pollution évolue bien dans le sens prévu au niveau de l'assemblage et l'organisation dans l'espace des différentes strates de végétation : on évalue dans une placette le pourcentage de recouvrement du sol, des annuelles, des vivaces herbacées basses, hautes, petits chaméphytes (arbrisseaux), grands chaméphytes, arbustes, et arbres jeunes, âgés etc ;
- L'autre pour étudier la composition floristique en relevant les différentes espèces dans un quadrat ou le long d'une ligne transect. Cela permet d'avoir plusieurs indicateurs (diversité spécifique globale avec indices de Shannon et équitabilité) si l'on prend en compte l'abondance ou le recouvrement en plus, et l'assemblage de différents cortèges d'espèces qui partagent l'espace à un instant t en fonction de l'évolution du milieu, notamment la richesse trophique et l'équilibre du sol. La composition en pourcentage de différents cortèges peut être un bon indicateur de la trajectoire dynamique concernant le niveau trophique par exemple.

Choix des placettes échantillon

Dans les milieux herbacés pour tester l'évolution vers des pelouses ou friches sur des sites ayant subi des perturbations par pollution / dépôts de déchets, on peut réaliser 2 à 3 placettes de 5 x 5 mètres, ou faire des transects en ligne le long de deux cordes de 5 à 10 mètres disposées en croix et graduées tous les mètres, dans une zone relativement homogène.



Protocoles de relevés

Les relevés structurels demandent à utiliser des « abaques » pour estimer en % les taux des recouvrements dans la placette des composantes suivantes : Sol nu, annuelles (thérophytes), strate herbacée des espèces vivaces basse (<15-30 cm selon pelouse ou prairie), strate herbacée haute, chaméphytes bas (<40 cm), chaméphytes haut, arbres (>2,5 m.).

Le spectre biologique peut également être réalisé en utilisant un logiciel comme Phytobase (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00558605/document>) qui restitue un graphique par histogrammes du recouvrement cumulé des différentes formes biologiques, toutes strates confondues. Le calcul est réalisé à partir des relevés d'espèces avec indication de recouvrement selon les classes du code de dominance de Braun-Blanquet :

- r : individus rares, recouvrement négligeable,
- + : petit nombre d'individus, recouvrement négligeable,
- 1 : individus peu abondants ou abondants, recouvrement < 5%,

- 2 : individus abondants, recouvrement entre 5% et 25%,
- 3 : individus abondants ou très abondants, recouvrement entre 25% et 50%,
- 4 : individus, en nombre variable, recouvrent entre 50% et 75% de la surface,
- 5 : individus, en nombre variable, recouvrent plus de 75% de la surface.

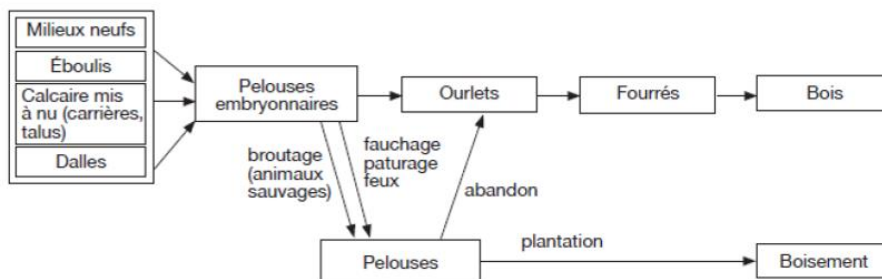
Le second type de relevé consiste à lister les espèces présentes dans la placette échantillon ou le long des cordes. Il s'agit aussi d'estimer le pourcentage de recouvrement, en utilisant pour les placettes la nomenclature de Braun-Blanquet présentée ci-dessus.

Pour se rapprocher de l'exhaustivité dans les relevés, l'idéal est de passer deux fois à des dates différentes pour lister les espèces précoces en avril et celles qui sont visibles plus tardivement en mai/juin. Cela nécessite de bien matérialiser l'emplacement des placettes et d'en récupérer les coordonnées avec un GPS.

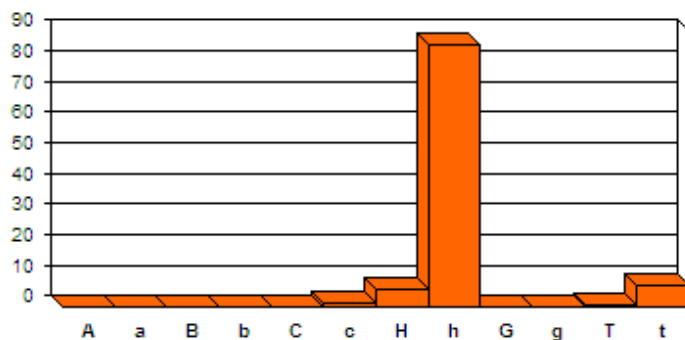
Interprétation des résultats

Les relevés structurels permettent de définir la trajectoire dynamique d'évolution de l'écosystème herbacé entre les stades pionniers perturbés et les premiers stades de fermeture du milieu en l'absence de gestion.

Le spectre biologique reflète ainsi de l'état du milieu et son stade évolutif. A titre d'exemple, si un cortège se compose d'un faible recouvrement végétal, d'une forte proportion de petites plantes herbacées annuelles ou bisannuelles et de quelques espèces vivaces à faible recouvrement, il sera considéré comme jeune et pionnier. Lorsque la proportion et le recouvrement d'herbacées vivaces augmente et la part des annuelles diminue, le cortège est en cours d'évolution vers un stade de pelouse ou de prairie (cf. graphique ci-dessous).



Dynamique des végétations calcicoles d'Europe occidentale (modifié d'après Maubert et al., 1995 in Piqueray et Mahy, 2010 dans Maciejewski et al. 2015).



Voici dans la figure ci-contre, un exemple des résultats qui peuvent être obtenus à un temps t :

A, a* : arbres

B, b : arbustes

C, c : arbrisseaux (chaméphytes)

H, h : hémicryptophytes

G, g : géophytes

T, t : thérophytes

*Majuscules : grande taille ; Minuscules : petite taille

Recouvrement (en %) des différents groupes d'espèces au sein de la placette échantillonnée.

On peut ainsi considérer pour les sites pollués ou dégradés faisant l'objet de mesures de restauration ou de réhabilitation, avec un objectif à atteindre d'un bon recouvrement végétal et d'une structure se rapprochant des pelouses méso à mésoxérophiles ou des prairies, l'interprétation suivante :

- Bon état : spectre équilibré avec une dominance des herbacés vivaces basses et hautes (>50% d'hémicryptophytes et géophytes), 10-20% de thérophytes, et moins de 5% de petits chaméphytes ;
- Etat pionnier ou rudéral : trop grande proportion de sol nu, thérophytes et hémicryptophytes bisannuelles (>30%) ;
- Gestion (fauche ou pâturage) trop réduite et fermeture du milieu : % recouvrement ligneux >10%.

La présence de géophytes (orchidées, *Allium*, *Narcissus*...), peut également être un bon indicateur d'une trajectoire écologique équilibrée au stade pelouse / prairie.

Cependant, les friches peuvent évoluer vers des stades à fort recouvrement en espèces vivaces hautes se rapprochant alors des structures prairiales, et ce premier indicateur doit être accompagné des indicateurs suivants sur la nature des cortèges, notamment **l'évaluation de la richesse trophique du milieu et de la proportion en espèces « type » des groupements** qui caractérisent les pelouses ou prairies.

QUALITE DE LA VEGETATION (36)

Référence bibliographique :

http://spn.mnhn.fr/spn_rapports/archivage_rapports/2015/SPN%202015%20-%2043%20-%20EvalEChabagroV3_guideappli_Maciejewski_etal_2015.pdf

L'indicateur phytocénotique dit « qualité de la végétation », teste la **proportion d'espèces du relevé qui est caractéristique du mode de gestion pratiqué ou du milieu souhaité**. Il s'agit encore une fois au préalable de lister les espèces typiques des groupements de prairies mésotrophiles, hygrophiles, fauchées et/ou pâturée, et pelouses acidophiles ou basophiles méso-xérophiles des alentours du site ou de la région considérée.

Exemples d'espèces types considérées comme caractéristiques :

Type de prairies	Liste d'espèces caractéristiques
Prairies pâturées mésophiles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Cynosurus cristatus</i> ▪ <i>Achillea millefolium</i> ▪ <i>Ajuga reptans</i> ▪ <i>Bellis perennis</i> ▪ <i>Cerastium fontanum</i> ▪ <i>Leucanthemum vulgare</i> ▪ <i>Lolium perenne</i> ▪ <i>Medicago lupulina</i> ▪ <i>Plantago media</i> ▪ <i>Prunella vulgaris</i> ▪ <i>Ranunculus acris</i> ▪ <i>Ranunculus bulbosus</i> ▪ <i>Taraxacum spp.</i> ▪ <i>Trifolium repens</i> ▪ <i>Trifolium pratense</i> ▪ <i>Trifolium campestre</i>
Prairies fauchées mésophiles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Arrhenatherum elatius</i> ▪ <i>Centaurea gr. jacea</i> ▪ <i>Cerastium arvense</i> ▪ <i>Colchicum autumnale</i> ▪ <i>Crepis biennis</i> ▪ <i>Daucus carota</i> ▪ <i>Galium molugo</i> ▪ <i>Geranium columbinum</i> ▪ <i>Heracleum sphondylium</i> (dans ce cas à ne pas faire figurer dans la liste d'espèces eutrophiles) ▪ <i>Knautia arvensis</i> ▪ <i>Lathyrus spp.</i> ▪ <i>Linum bienne</i> ▪ <i>Lychnis flos-cuculi</i> ▪ <i>Medicago spp.</i> ▪ <i>Rhinanthus minor</i> ▪ <i>Salvia pratensis</i> ▪ <i>Silene vulgaris</i> ▪ <i>Tragopogon pratensis</i> ▪ <i>Trisetum flavescens</i> ▪ <i>Vicia spp.</i>
Prairies hygrophiles (en plus des espèces précédentes)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Achillea ptarmica</i>, ▪ <i>Agrostis stolonifera</i> ▪ <i>Bromus racemosus</i> ▪ <i>Cardamine pratensis</i> ▪ <i>Carex cuprina / vulpina</i> ▪ <i>Festuca arundinacea</i> ▪ <i>Holcus lanatus</i> ▪ <i>Juncus spp.</i> ▪ <i>Lychnis flos-cuculi</i> ▪ <i>Mentha spp.</i> ▪ <i>Molinia caerulea</i> ▪ <i>Myosotis scorpioides</i> ▪ <i>Oenanthe fistulosa</i> ▪ <i>Polygonum bistorta</i> ▪ <i>Sanguisorba officinalis</i> ▪ <i>Senecio erraticus</i> ▪ <i>Silaum silaus</i> ▪ <i>Succisa pratensis</i>
Pour les pelouses basophiles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Anthyllis vulneraria</i> ▪ <i>Anthericum ramosum</i> ▪ <i>Anthericum liliago</i> ▪ <i>Arabis hirsuta</i> ▪ <i>Bromopsis erecta</i>, ▪ <i>Campanula glomerata</i> ▪ <i>Carex humilis</i> ▪ <i>Carlina vulgaris</i> ▪ <i>Centaurea scabiosa</i> ▪ <i>Festuca gr. ovina</i> ▪ <i>Gentianella spp.</i> ▪ <i>Helianthemum nummularium</i> ▪ <i>Hippocrepis comosa</i> ▪ <i>Koeleria vallesiana</i> ▪ <i>Linum tenuifolium</i> ▪ <i>Lotus gr. corniculatus</i> ▪ <i>Orchidées (Orchis, Ophrys, Anacamptis...)</i> ▪ <i>Ononis natrix</i> ▪ <i>Ononis spinosa</i> ▪ <i>Polygala spp.</i> ▪ <i>Pulsatilla vulgaris</i> ▪ <i>Seseli montanum</i> ▪ <i>Teucrium chamaedrys</i> ▪ <i>Teucrium montanum</i> ▪ <i>Veronica teucrium</i>
Pour les pelouses acidophiles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Anacamptis morio</i> ▪ <i>Antennaria dioica</i> ▪ <i>Anthoxanthum odoratum</i> ▪ <i>Briza media</i> ▪ <i>Danthonia decumbens</i> ▪ <i>Dianthus deltoides</i> ▪ <i>Festuca gr. ovina</i> ▪ <i>Festuca gr. rubra</i> ▪ <i>Hypochaeris glabra</i> ▪ <i>Jasione montana</i> ▪ <i>Luzula campestris</i> ▪ <i>Nardus stricta</i> ▪ <i>Polygala serpyllifolia</i> ▪ <i>Potentilla argentea</i> ▪ <i>Saxifraga granulata</i> ▪ <i>Senecio adonitifolius</i> ▪ <i>Trifolium arvense</i>

Sur la base de ces listes d'espèces, on peut ainsi obtenir la grille d'évaluation suivante :

- Trajectoire mauvaise, niveau trophique encore trop important ou conditions écologiques du terrain et de la gestion non adéquates : moins de 20 % d'espèces caractéristiques des pelouses pâturées ou prairies ;
- Trajectoire correcte, mais encore écartée des stades à atteindre : 20 à 40% d'espèces caractéristiques ;
- Bonne trajectoire et objectif de restauration / réhabilitation atteints : plus de 40 % d'espèces caractéristiques, et présence de géophytes.

FERMETURE DU MILIEU (37)

Référence bibliographique :

http://spn.mnhn.fr/spn_rapports/archivage_rapports/2015/SPN%202015%20-%2043%20-%20EvalEChabagroV3_guideappli_Maciejewski_etal_2015.pdf

Il existe d'autres types d'indicateurs phytocénotique pour mesurer un niveau de pression suffisant ou non pour la gestion par fauche ou pâturage en testant la proportion des **espèces indicatrices de fermeture du milieu** en plus de l'indicateur « graminées » (voir ci-après).

Pour les pelouses et prairies, on listera les espèces ligneuses et les espèces dites d'ourlets et de lisière qui apparaissent quand la pression s'estompe ou s'arrête. C'est les cas par exemple de *Brachypodium pinnatum* / *rupestre* pour les pelouses basophiles, ou des plantes de mégaphorbiaies pour les prairies humides et de lisières et clairières forestières comme *Geranium sylvaticum* pour les prairies.

On peut aussi lister les espèces suivantes : *Anemone sylvestris*, *Agrimonia eupatoria*, *Campanula rapunculus*, *Conopodium majus*, *Geranium sanguineum*, *Hieracium spp.*, *Holcus mollis*, *Lathyrus niger*, *Lithospermum officinale*, *Melampyrum cristatum*, *Melampyrum pratense*, *Orchis mascula*, *Origanum vulgare*, *Primula veris*, *Ranunculus ficaria*, *Veronica chamaedrys*...

Si leur présence et celle de ligneux pré-forestiers atteint 15% du cortège ou que le recouvrement devient >30%, alors la trajectoire par rapport à un objectif de maintien de la diversité et des caractéristiques des pelouses ou prairie pourra être jugée mauvaise.

A contrario, les **excès de pâturage** peuvent être mis en évidence en listant les espèces refus ou signe de surpâturage et leur niveau d'abondance ou de recouvrement. En effet, en cas de très forte pression, il peut apparaître des plages de sol nu, et une nette abondance d'espèces que le bétail ne consomme pas à savoir les composées épineuses telles que les chardons, les ligneux comme le Prunellier ou encore les plantes toxiques comme les euphorbes. Parmi celles qui peuvent ainsi dominer, on peut lister : *Cirsium spp.*, *Carduus spp.*, *Carlina*, *Eryngium campestre*, *Euphorbia spp.*, *Ranunculus acris*, certaines Apiacées, *Rumex spp.* Etc.

Lorsque des plages de sol nu apparaissent (>10%) avec plus de 10% aussi de recouvrement en espèces refus, alors on peut considérer que le pâturage devient excessif, surtout si celui-ci est accompagné d'une augmentation du nombre d'espèces nitrophiles et rudérales. Cela peut être dû à un enrichissement du milieu lorsque les animaux sont nourris en complément à l'extérieur des parcelles gérées ou par affouragement. Ce qui introduit dans le système des surplus d'azote.

INDICATEUR ODONATES (40)

Références bibliographiques :

<http://rhomeo-bao.fr/?q=indicateurs>

<http://odonates.pnaopie.fr/wp-content/uploads/2010/12/protocole-odonates-2011.pdf>

Les protocoles proposés ici sont inspirés de ceux de Rhoméo, mais leur interprétation sera différente, car on cherchera avant tout à ne pas évaluer la tendance d'un optimum de qualité, mais la qualité d'une trajectoire de réhabilitation ou de gestion d'un site initialement très perturbé.

Ils consistent à pratiquer des observations sur points fixe ou transects pour réaliser l'inventaire des adultes présents sur un site ou habitat donné par des prospections à vue, complétées par captures au filet pour les espèces difficiles à déterminer à distance. Cet inventaire de diversité peut être assorti aussi de la récolte régulière d'exuvies se retrouvant sur les végétaux de bord des berges d'un point d'eau le long de transects d'une distance donnée (25, 50 ou 100 mètres), ce qui permet d'obtenir une quantification du nombre par espèce par mètre linéaire et de suivre cet indicateur dans le temps. Les lots d'exuvies récoltées peuvent être analysés à n'importe quel moment et stockés.

Ces inventaires pour être suffisamment complets sont à réaliser plusieurs fois dans l'année, 2 à minima (mai/juin et juillet/août), sinon 3 fois (avril, mai/juin, juillet/août) ou une fois par mois d'avril à août, selon contexte et moyens. Les conditions météorologiques devront être « bonnes » le jour du relevé ainsi que la veille de celui-ci.

Pour l'interprétation des résultats, de plus en plus d'études révèlent des seuils de tolérance divers en fonction des cortèges de libellules, notamment aux eaux polluées (bassins de rétention) ou à divers polluants comme les métaux-lourds (Masselot et Nel, 2003 ; Scher et al., 2005 ; Tollett et al., 2009 ; Lavilla et al., 2010). D'après Carchini et al. (2003), la diversité des espèces décroît avec l'augmentation des concentrations en nitrates, phosphates et ammonium.

Le pourcentage d'espèces de 3 cortèges, en prenant en compte l'abondance des exuvies, peut servir d'indicateur de suivi pour la qualité des milieux humides du site avec :

- Le groupe des espèces tolérantes (cortège A) aux niveaux de pollution élevés (eutrophisation, métaux lourds...), dont la liste serait à définir en fonction des espèces locales.

Mais pourraient être inclus : *Ischnura pumilio*, *Ischnura elegans*, *Erythromma viridulum*, *Erythromma lindenii*, *Enallagma cyathigerum*, *Sympetrum striolatum*, *Lestes barbarus*, *Chalcolestes viridis*, *Anax imperator*, *Libellula depressa*, *Aeshna mixta*, *Aeshna cyanea*, *Orthetrum cancellatum*, *Crocothemis erythraea*

- Le groupes des espèces moyennement tolérantes (cortège B) : *Libellula quadrimaculata*, *Orthetrum coerulescens*, *Coenagrion pulchellum*, *Coenagrion puella*, *Sympecma fusca*, *Pyrrhosoma nymphula*, *Platycnemis pennipes* (apparemment sensible aux pollutions Cadmium).
- Le groupe des espèces jugées sensibles à l'eutrophisation ou à diverses pollutions (cortège C) : *Coenagrion mercuriale*, certains gomphidés (*Gomphus* spp., *Onychogomphus* spp.), Cordulidés, *Brachytron pratense*, *Aeshna isoceles*.

A partir des listes d'espèces par sites, transect échantillon (bord mare, étang, fossé, prairie humide...), établies avec les observations d'adultes et d'exuvies, et les niveaux d'abondance, il est possible de calculer :

- La diversité spécifique avec un indice de Shannon et d'équitabilité pour évaluer l'équilibre de l'assemblage des odonates ;
- Un indice de qualité du milieu : en notant 1 pour les espèce tolérantes, 2 pour le cortège B, 3 pour le cortège C. On aura ainsi :

$$\left[\sum_{i=1}^{nA} (1 \times Ai) + \sum_{i=1}^{nB} (2 \times Bi) + \sum_{i=1}^{nC} (3 \times Ci) \right] \div \left[\sum_{i=1}^n (Ai + Bi + Ci) \right]$$

Où nA = nombre d'espèces du cortège A, nB = nombre d'espèces du cortège B, nC = nombre d'espèces du cortège C, et Ai, Bi, Ci = Abondance (nombre d'adultes observés au cours du transect + nombre d'exuvies récoltées) des différentes espèces i des cortèges A, B, C.

Ceci donne une valeur d'indice de qualité allant de 1 faible, 2 moyen, jusqu'au maximum de 3 très fort.

Les données peuvent aussi être analysées dans le temps pour estimer si les objectifs de gestion conservatoire sont atteints ou si la trajectoire évolutive du milieu s'écarte et n'indique pas d'amélioration de la qualité. On peut ainsi obtenir une grille très simple suivante qui prend en compte l'évolution de la diversité et des espèces indicatrices de pollution par rapport aux espèces sensibles :

- Mauvaise trajectoire : persistance des espèces indicatrices, diversité stable et faible ;
- Trajectoire encourageante : Evolution avec persistance des espèces tolérantes, mais diminution en nombre + apparition d'espèces des autres cortèges plus sensibles (B, voire C) ;
- Bonne trajectoire et atteinte des objectifs : diminution de l'abondance et du nombre d'espèces indicatrices de pollution, augmentation des autres espèces et augmentation du nombre et/ou de l'abondance des espèces sensibles.

INDICATEUR LEPIDOPTERES (RHOPALOCERES) (41)

Référence bibliographique :

http://spn.mnhn.fr/spn_rapports/archivage_rapports/2015/SPN%202015%20-%2043%20-%20EvalEChabagroV3_guideappli_Maciejewski_etal_2015.pdf

Les indicateurs sur les papillons sont souvent utilisés pour évaluer la qualité et la biodiversité des milieux herbacés. Ils font également l'objet de suivis temporels menés par le Museum (projet Vigie Nature) pour évaluer les tendances évolutives des populations. Ils font partie de l'un des 26 indicateurs retenus par l'Agence Européenne de l'Environnement dans le cadre du programme de « rationalisation des indicateurs européens de la biodiversité pour 2010 ».

A l'échelle d'une placette, la diversité des espèces peut renseigner sur la diversité floristique du site et des milieux alentours, et donner une bonne indication de la qualité du milieu obtenu. Les milieux enrichis favoriseront certaines espèces liées aux plantes nitrophiles, alors que des milieux mésotrophes de type pelouse ou prairie seront plus favorables aux espèces liées aux graminées ou aux espèces plus spécialisées et spécifiques des genres de plante caractéristiques. Les papillons peuvent également donner des indications sur la pression de fauche ou de pâturage par diminution de certaines espèces sensibles.

Les protocoles à mettre en place peuvent être de deux ordres et sont décrits par Maciejewski et al. (2015), tout comme les évaluations et leur interprétation.

Un protocole simple est basé sur les relevés des couleurs des papillons adultes car elles peuvent indiquer les grandes familles de papillon. Celle des piérides, de couleur blanche, est en général associée aux milieux anthropisés ou rudéraux. L'absence d'une diversité de couleur rend compte essentiellement d'une eutrophisation importante.

Pour évaluer les trajectoires de milieux pollués en cours de restauration ou de réhabilitation, cet indicateur « couleur » de papillon peut suffire et est facile à mettre en œuvre. Pour une finesse plus élevée dans l'interprétation des données, on préférera choisir l'indicateur « espèce » qui permet d'étudier l'évolution de la diversité spécifique et des cortèges selon quatre catégories allant des espèces généralistes et ubiquistes aux espèces très spécialisées. Il nécessite aussi de faire un lien avec la présence des plantes hôtes dans le site et éventuellement le développement des chenilles. Cet indicateur demande donc plus d'expériences et de temps puisqu'il s'agit de se rapprocher de l'exhaustivité en réalisant plusieurs passages par placette au cours de l'année.

Cas particulier du genre *Maculinea* :

Cet indicateur sur un genre très spécialisé et sensible n'a de sens que s'il est présent sur un site, ou dans les alentours et que les plantes hôtes sont présentes sur le site étudié. Voir les protocoles ici : <http://maculinea.pnaopie.fr/wp-content/uploads/2017/04/Rapport-EC-Azure-des-mouilleres-PNRVA-vol1.pdf>.

INDICATEUR FLORISTIQUE DE FERTILITE DES SOLS OU D'EUTROPHILIE (42)

Références bibliographiques :

<http://rhomeo-bao.fr/?q=indicateurs>

Attention : indicateur disponible pour le bassin Rhône-Méditerranée.

http://spn.mnhn.fr/spn_rapports/archivage_rapports/2015/SPN%202015%20-%2043%20-%20EvalEChabagroV3_guideappli_Maciejewski_etal_2015.pdf

L'évaluation de la richesse trophique du milieu se base sur une estimation de la proportion des espèces jugées « nitrophiles » ou « eutrophiles » sur l'ensemble des espèces :

$$\frac{\text{Nb Espèces eutrophiles}}{\text{Nb espèces total}}$$

Plus un milieu herbacé évolue avec une bonne minéralisation de la matière organique morte, une soustraction de la charge azotée et phosphorée, notamment par la fauche avec export des produits de coupe, un bon développement végétal, **plus le milieu passe de eutrophe à mésotrophe, voire oligotrophe pour certaines prairies tourbeuses**. C'est le cas pour les friches post-culturelles ou industrielles dont l'enrichissement du sol profite aux espèces rudérales et eutrophiles dans un premier temps. Lorsque la charge diminue avec un export (végétal, animal et/ou mécanique) supérieur aux intrants, alors la proportion des espèces eutrophiles se réduit au profit des espèces plus sensibles aux excès minéraux et organiques. C'est le cas des pelouses sèches qui se développent en général sur des sols pauvres, ou des prairies sur des sols mésotrophes.

On peut alors avoir la grille d'évaluation suivante :

- Bonne trajectoire ou bon état : moins de 30 % d'espèces eutrophiles ;
- Trajectoire correcte, mais encore écartée des stades à atteindre : 30 à 50% d'espèces eutrophiles, ou moins de 30%, mais entre 30 et 50% si l'on rajoute les espèces méso à eutrophiles ;
- Trajectoire mauvaise, équivalente aux milieux pollués et trop riches : plus de 50 % d'espèces eutrophiles.

Cet indicateur est plus simple à utiliser que d'établir un diagnostic phytosociologique du groupement pour le classer en friches annuelles, vivaces, ourlet, prairie ou pelouse, mais le principe reste le même.

Concernant le second indicateur, la liste d'**espèces eutrophiles** capables de mettre en évidence la dynamique trophique peut être élaborée à partir des valeurs d'Ellenberg (Hill et al., 1999) concernant la nitrophilie, complétées à partir des informations contenues dans la baseflor de P. Julve (version 2014 et plus).

A partir de la liste d'espèces potentiellement présentes sur le site ou dans la région naturelle, on établit la liste d'espèces eutrophiles en choisissant les espèces dont les valeurs de nitrophilie sont les plus fortes (≥ 7). Des valeurs de 5 et 6 peuvent être sélectionnées si l'on souhaite avoir deux niveaux d'eutrophilie : milieu hyper eutrophe ou milieu méso à eutrophe.

On peut avoir ainsi suivant les territoires les espèces eutrophiles suivantes : *Amaranthus retroflexus*, *Anthriscus sylvestris*, *Arctium lappa*, *Ballota nigra*, *Brassica nigra*, *Chaerophyllum aureum*, *Chenopodium album*, *Chenopodium bonus-henricus*, *Cirsium vulgare*, *Elytrigia repens*, *Fumaria officinalis*, *Heracleum sphondylium*, *Hordeum murinum*, *Lamium album*, *Lamium purpureum*, *Malva sylvestris*, *Marrubium vulgare*, *Mercurialis annua*, *Onopordum acanthium*, *Poa annua*, *Raphanus sativus*, *Rumex crispus*, *Rumex obtusifolius*, *Senecio vulgaris*, *Sinapis alba*, *Sonchus spp.*, *Stellaria media*, *Taraxacum campylodes*, *Urtica dioica* etc.

Un autre type de calcul peut utiliser les données de recouvrement / abondance des espèces et donner un indice de « fertilité » comme celui proposé par le programme RhoMéO.

INDICATEUR – GRAMINEES (43)

L'indicateur à tester ici sur des milieux dont la finalité de gestion est l'obtention d'un milieu herbacé de type pelouse ou prairie ayant un certain équilibre dynamique et une bonne richesse en espèce florale préservée. Lorsque la pression de pâturage ou de fauche diminue ou s'arrête, les graminées vigoureuses et vivaces ont tendance, avant l'apparition des plantes d'ourlet et de fermeture de milieux, à s'exprimer fortement pour atteindre de forts pourcentages de recouvrement ou de dominance. La diversité spécifique s'appauvrit et ces graminées deviennent alors dominante en nombre par rapport aux espèces à floraison « visible » des espèces ayant des fleurs à pétales. L'équilibre entre strate graminéenne basse, haute, et espèces non graminéennes peut alors être un bon indicateur de gestion favorable du milieu herbacé.

Dans le cas des pelouses, on peut ainsi lister les espèces à suivre comme proposé dans le tableau ci-dessous.

Type de pelouses	Liste d'espèces caractéristiques
Pelouses calcicoles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Bromus erectus</i> (= <i>Bromopsis erecta</i>) ▪ essentiellement ▪ <i>Dactylis glomerata</i> ▪ <i>Avenula pubescens</i> ▪ <i>Brachypodium pinnatum / rupestre</i> ▪ <i>Brachypodium phoenicoides</i>
Pelouses acidophiles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Agrostis capillaris</i> ▪ <i>Antoxantum odoratum</i> ▪ <i>Danthonia decumbens</i> ▪ <i>Festuca rubra</i> ▪ <i>Festuca spp.</i> ▪ <i>Luzula campestris</i> ▪ <i>Nardus stricta</i> ▪ <i>Poa spp.</i> ▪ <i>Holcus lanatus</i>

Les indicateurs pour ces pelouses peuvent être les suivants :

- Pelouse mésoxérophile basophile de type « mesobromion » :
 - Si le recouvrement en graminées hautes (> 20-30 cm), notamment *Bromus erectus*, dépasse les 50% ou si les graminées représentent plus des 2/3 de la diversité spécifique, l'objectif de gestion favorable peut être considéré comme non atteint, sauf si l'objectif de production pastorale est envisagé. Le seuil peut alors être porté à 70% ;
 - Entre 30 et 50%, avec une diversité équilibrée entre graminéennes (luzules, carex inclus) et familles à fleur : état ou trajectoire satisfaisant ;
 - < 30 % recouvrement, diversité élevée et en faveur des espèces florales : à voir d'autres indicateurs pour déceler un surpâturage ou un état optimal de conservation.
- Pelouse mésoxérophile acidophile à Nard
 - Si le recouvrement en graminées hautes (> 30 cm) plutôt liées aux zones enrichies ou aux prairies, notamment *Agrostis*, *Antoxantum*, *Festuca*, *Holcus*, *Poa*... dépasse les 50% ou si les graminées représentent plus des 2/3 de la diversité spécifique, l'objectif de gestion favorable peut être considéré comme non atteint. ;
 - Entre 30 et 50%, avec une diversité équilibrée entre graminéennes (luzules, carex inclus) et familles à fleur : état ou trajectoire satisfaisant ;
 - < 30 % recouvrement, diversité élevée et en faveur des espèces florales : à voir d'autres indicateurs pour déceler un surpâturage ou un état optimal de conservation.

Dans le cas des prairies, les espèces à suivre sont par exemple les suivantes :

Type de prairies	Liste d'espèces caractéristiques
Prairies pâturées mésophiles	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Cynosurus cristatus</i> - <i>Poa spp.</i>, - <i>Dactylis glomerata</i> - <i>Holcus lanatus</i> - <i>Festuca spp.</i> - <i>Lolium perenne</i> - <i>Juncus effusus</i>
Prairies fauchées mésophiles	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Arrhenatherum elatius</i>, - <i>Trisetum flavescens</i> - <i>Gaudinia fragilis</i> - <i>Bromus hordeaceus</i> - <i>Bromus spp. (grande taille type inermis)</i> - <i>Poa spp.</i>, - <i>Elytrigia spp.</i> - <i>Festuca pratensis</i> - <i>Phleum pratense</i>
Prairies humides ³⁹	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Agrostis stolonifera</i>, - <i>Agrostis gigantea</i> - <i>Alopecurus pratensis</i> - <i>Bromus racemosus</i> - <i>Festuca arundinacea</i> - <i>Elytrigia spp.</i> - <i>Holcus lanatus</i> - <i>Molinia caerulea (selon contexte)</i> - <i>Juncus articulatus</i> - <i>Juncus inflexus</i> - <i>Poa trivialis</i> - <i>Phalaris arundinacea</i>

Les indicateurs sont :

- Prairies pâturées à *Cynosurus* :
 - Si le recouvrement en graminées hautes (> 30 cm), notamment *Cynosurus*, *Poa*, *Festuca*, *Dactylis*, *Lolium*, dépasse les 75% et ne représente quasiment que la seule strate, ou si les graminées représentent plus des 2/3 de la diversité spécifique, l'objectif de gestion favorable peut être considéré comme non atteint ;
 - Entre 50 et 75%, avec une diversité équilibrée entre graminoides (joncs inclus) et familles à fleur : état ou trajectoire satisfaisant ;
 - < 50 % recouvrement, diversité élevée et en faveur des espèces florales : à voir d'autres indicateurs pour déceler un surpâturage ou un état optimal de conservation.
- Prairies de fauche à *Fromental* ou prairies humides :
 - Si le recouvrement en graminées hautes (> 40 cm), notamment *Arrhenatherum*, *Agrostis*, *Bromus*, *Poa*, *Festuca*, *Trisetum*, et joncs (ou Molinie) pour les prairies humides..., dépasse les 75% et ne représente quasiment que la seule strate, ou si les graminées représentent plus des 2/3 de la diversité spécifique, l'objectif de gestion favorable peut être considéré comme non atteint ;
 - Entre 50 et 75%, avec une diversité équilibrée entre graminoides (joncs inclus) et familles à fleur : état ou trajectoire satisfaisant ;
 - < 50 % recouvrement, diversité élevée et en faveur des espèces florales : à voir d'autres indicateurs pour déceler un état optimal de conservation.

Ce type d'indicateur est dans l'esprit celui proposé pour les agriculteurs afin de diagnostiquer l'état de leur parcelles prairiales : l'indicateur « prairies fleuries ».

Le principe est similaire, mais le test se base non pas sur la couverture et la dominance des graminées, mais sur la richesse en espèces « florifère » issue d'une liste nationale (voir Maciejewski, et al. 2015). Plus la diversité est élevée, plus on a d'espèces de la liste, moins les graminées sont dominantes, et plus la prairie est considérée en bon équilibre et peu eutrophe.

³⁹ Les espèces des groupements mésophiles précédents peuvent aussi être concernées.

PRESENCE D'ESPECES VEGETALES EXOTIQUES ENVAHISSANTES (44)

Références bibliographiques :

<http://www.onema.fr/node/3981>

http://spn.mnhn.fr/spn_rapports/archivage_rapports/2015/SPN%202015%20-%2043%20-%20EvalEChabagroV3_guideappli_Maciejewski_etal_2015.pdf

Un autre indicateur est de lister les **espèces exotiques ou allochtones** présentes car il apparaît que les perturbations soient un facteur favorable aux invasions biologiques, en raison notamment de l'anthropisation des milieux et de leur eutrophisation. Il s'agit par exemple d'évaluer leur niveau de recouvrement avec la grille suivante (voir également les autres protocoles proposés) :

- Bonne état de restauration / réhabilitation : Absence totale d'espèces allochtone ;
- Trajectoire correcte si le pourcentage après mesures reste inférieur à l'état initial et si la dynamique est à la diminution : < 30% de recouvrement ;
- Mauvais état du milieu et trajectoire à corriger : >30% de recouvrement.

INDICATEUR HUMIDITE DU MILIEU - ORTHOPTERES (46)

Référence bibliographique :

<http://rhomeo-bao.fr/?q=indicateurs>

Attention : indicateur disponible pour le bassin Rhône-Méditerranée.

Pour les prairies humides, le protocole sera celui établi par le programme Rhomeo (109) qui propose un indicateur rendant compte du degré d'humidité moyen d'une zone humide (humidité stationnelle) au niveau du sol et de la strate herbacée, à partir des peuplements d'orthoptères.

Un indicateur « orthoptères » pourrait aussi être décliné comme l'indicateur « Lépidoptères » en étudiant 3 ou 4 catégories de cortèges en fonction de la structure végétale et de sa diversité : pourcentage de recouvrement du sol nu, de la végétation herbacée basse, haute, ligneuse bas, ligneuse haute etc.

Certaines études montrent en effet que différents cortèges d'orthoptères sont assez liés à la diversité végétale et structurelle d'un habitat qui comporterait un bon équilibre entre les différentes strates, signe d'une trajectoire écologique favorable au maintien des pelouses et prairies. La nature du milieu influence en effet la richesse spécifique et le nombre d'individus de façon relativement corrélée. Jaulin (2009) a pu constater sur des pelouses des Basses Corbières que plus le recouvrement herbacé diminue au dépend du recouvrement arbustif et arboré, plus la richesse diminue. Mais également, plus le recouvrement herbacé diminue au dépend de la surface de sol nu, plus la richesse diminue.

Les suivis de type Indice Linéaire d'Abondance, en parcourant des transects de 20 à 50 mètres sur 5 m. de large, pourraient ainsi donner des indices de diversité et des indices de qualité du milieu prenant en compte les cortèges et les abondances, de la même manière que les odonates ou que la méthode de calcul pour les suivis orthoptères « zone humide », tout en définissant d'autres classes ou cortèges :

- Espèces pionnières ou rudérales affectionnant les sols nus ;
- Espèces à large amplitude et ubiquistes ;
- Espèces liées à une strate herbacée dense et haute ;
- Espèces liées à une strate herbacée basse ;
- Espèces liées aux lisières et arbustes.

Les grillons pourraient aussi être associés et donner des indications supplémentaires.

Ce type d'étude des cortèges en fonction de la structure de végétation a pu être évalué par plusieurs auteurs (Defaut B., Boitier E., Jaulin S., Barataud J. entre autres).

Annexe 2 : Liste des SE des milieux prairiaux et bénéficiaires associés

Type de SE	SE	Description du SE	Bénéficiaires potentiels	Sources
Approvisionnement (quantitatif)	Produits de l'élevage	Production de fourrage et de protéines végétales	Eleveurs	(Puydarrieux et Devaux, 2013)
	Produits de la cueillette	Production de fleurs, baies, champignons.	Population locale	(Puydarrieux et Devaux, 2013)
Approvisionnement (qualitatif)	Quantité et stabilité de la production végétale	Lien positif entre stabilité de la production végétale et richesse spécifique à l'échelle de la communauté.	Eleveurs	(Mauchamp, L., 2014)
	Qualité du fourrage	Les prairies diversifiées présentent une plus grande stabilité de la valeur nutritive au cours du temps.	Eleveurs	(Mauchamp, L., 2014)
	Qualité des produits dérivés	Le maintien d'une diversité biologique peut améliorer les qualités organoleptiques des produits dérivés (ex : fromage, beurre, etc.)	Eleveurs	(Mauchamp, L., 2014) ; (Puydarrieux et Devaux, 2013)
	Santé des animaux domestiques	Résistance aux maladies et parasites et limitation de la toxicité alimentaire grâce à la diversité végétale	Eleveurs	(Amiaud et Carrère, 2012)
Régulation	Régulation du climat	Fixation et stockage du carbone (ou autres gaz atmosphériques)	Population mondiale	(Mauchamp, L., 2014) ; Natagora, 2015 ; (Amiaud et Carrère, 2012); (Puydarrieux et Devaux, 2013)
	Limitation de l'érosion	Le ruissellement des eaux pluviales est freiné par le couvert végétal dont les racines favorisent l'infiltration progressive de l'eau.	Eleveurs et agriculteurs, population en aval, Etat (coûts d'entretiens et de dépollution dus aux ruissellements évités)	(Mauchamp, L., 2014) ; Natagora, 2015 ; (Puydarrieux et Devaux, 2013)
	Régulation des inondations	Rétention et freins des débits, étalement du débit des eaux de ruissellement : atténuation des crues	Population en aval, agriculteurs et éleveurs, Etat (coûts évités des dommages potentiels)	(Natagora, 2015) ; (Puydarrieux et Devaux, 2013)
	Régulation de la qualité des eaux	Séquestration et transformation des éléments nutritifs, particules fines et certains polluants	Population alimentée en eau, Etat (coûts de dépollution évités)	(Natagora, 2015) ; (Amiaud et Carrère, 2012)
	Régulation de la quantité d'eau	Collecte et diffusion de la pluviométrie vers les nappes souterraines et les eaux de	Agriculteurs, éleveurs et population locale	(Puydarrieux et Devaux, 2013)

		surface		
	Pollinisation	Maintien de la reproduction des plantes angiospermes et gymnospermes. Contribution à la fourniture des ressources et au maintien des supports physicochimiques.	Agriculteurs, population locale productrice de fruits et légumes	(Natagora, 2015)
	Contrôle des bioagresseurs	La prairie apporte aux insectes utiles (auxiliaires) des ressources alimentaires et un habitat et renforce ainsi le contrôle biologique des cultures environnantes.	Agriculteurs, Etat (coûts évités dans la lutte contre les ravageurs)	(Natagora, 2015) ; (Amiaud, B. and Carrère, P., 2012)
Culturels	Aménités paysagères	Contribution à la qualité des paysages (valeur esthétique et culturelle)	Population locale	(Natagora, 2015) ; (Puydarrieux et Devaux, 2013)
	Intérêt récréatif	Rôle joué par le paysage, la faune et la flore dans le développement des activités touristiques (balades, villégiature, randonnées, etc.)	Population locale, touristes	(Natagora, 2015) ; (Puydarrieux et Devaux, 2013)
	Intérêt didactique	Rôle des écosystèmes dans la constitution d'un support pédagogique	Population locale (adultes et enfants)	(Natagora, 2015) ; (Puydarrieux et Devaux, 2013)
	Intérêt scientifique	Rôle des écosystèmes dans la constitution d'un support scientifique	Chercheurs, population nationale (ou mondiale)	(Natagora, 2015) ; (Puydarrieux et Devaux, 2013)
	Chasse	Intérêt cynégétique offert par les prairies	Chasseurs	(Puydarrieux et Devaux, 2013)
Support	Conservation des sols : Maintien de la stabilité structurale	Renouvellement continu de la matière organique permet de préserver les qualités structurales des sols : porosité, agrégation des éléments constitutifs, etc.	Pas de bénéficiaires directs, support aux autres services	(Natagora, 2015) ; (Amiaud et Carrère, 2012)
	Conservation des sols : Maintien de la fertilité	Décomposition et minéralisation progressive de la matière organique, transformation des éléments, solubilisation, etc.	Pas de bénéficiaires directs, support aux autres services	(Natagora, 2015) ; (Amiaud et Carrère, 2012)
	Conservation en espèces : biodiversité ordinaire	Maintien de la diversité des espèces et limitation de leur fragmentation	Pas de bénéficiaires directs, support aux autres services	(Amiaud et Carrère, 2012) ; (Puydarrieux et Devaux, 2013)
	Conservation en espèces : biodiversité patrimoniale	Maintien des espèces rares et protégées et limitation de leur fragmentation	Pas de bénéficiaires directs, support aux autres services	(Amiaud, B. and Carrère, P., 2012) ; (Puydarrieux et Devaux, 2013)

Annexe 3. Liste des SE des milieux humides et bénéficiaires associés

Type de SE	SE	Description du SE	Bénéficiaires potentiels	Sources
Approvisionnement	Production d'aliments	ZH intérieures ou côtières : production de poissons, fruits, céréales, etc.	Agriculteurs, éleveurs, pêcheurs	(Vashalde, D., 2014) ; (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011) ; (IMBE, 2015) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005)
	Produits de la cueillette	Production de fleurs, baies, champignons.	Population locale	(Vashalde, D., 2014) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005)
	Alimentation en eau douce	Production et stockage d'eau pour l'irrigation et la consommation	Agriculteurs, éleveurs et population locale	(Vashalde, D., 2014) ; (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011) ; (IMBE, 2015) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005) ; (Somda et Aboubacar, 2013)
	Production de fibres, combustibles et autres matières premières	Production de bois d'œuvre, bois de feu, de tourbe, de fourrages	Sylviculteurs, population locale	(Vashalde, D., 2014) ; (IMBE, 2015) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005)
	Production de ressources médicinales	Production de ressources médicinales	Population locale	(Vashalde, D., 2014) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005)
	Matériel génétique	Gènes de résistance aux agents pathogènes des plantes, espèces ornementales, etc.	Agriculteurs, population locale	(Vashalde, D., 2014) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005)
Régulation	Régulation du climat	Régulation des GES, de la température, des précipitations et autres processus climatiques	Population mondiale	(Vashalde, D., 2014) ; (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011) ; (IMBE, 2015) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005)
	Régulation biologique	Résistance aux espèces invasives	Agriculteurs, Etat (coûts évités dans la lutte contre les espèces invasives)	(Vashalde, D., 2014) ; (IMBE, 2015)
	Soutien d'étiage	Recharge des nappes et stockage de l'eau	Agriculteurs, éleveurs et population locale	(Vashalde, D., 2014) ; (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011) ; (IMBE, 2015) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005) ; (Somda et Aboubacar, 2013)
	Régulation de la qualité de l'eau	Rétention et élimination des matières nutritives et des polluants en excès	Population alimentée en eau, Etat (coûts de dépollution évités)	(Vashalde, D., 2014) ; (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011) ; (IMBE, 2015) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005) ; (Somda et Aboubacar, 2013)
	Protection contre l'érosion	Rétention des sols et des sédiments	Eleveurs et agriculteurs, population en aval, Etat (coûts	(Vashalde, D., 2014) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005)

			d'entretiens et de dépollution dus aux ruissellements évités)	
	Régulation des inondations	Rétention et freins des débits, étalement du débit des eaux de ruissellement	Population en aval, agriculteurs et éleveurs, Etat (coûts évités des dommages potentiels)	(Vashalde, D., 2014) ; (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005) ; (Somda et Aboubacar, 2013)
	Pollinisation	Maintien de la reproduction des plantes angiospermes et gymnospermes. Contribution à la fourniture des ressources et au maintien des supports physicochimiques.	Agriculteurs, population locale productrice de fruits et légumes	(IMBE, 2015); (Millenium Ecosystem Assessment, 2005)
Culturels	Inspiration artistique et spirituelle	Sentiments personnels et bien-être	Population locale, touristes	(Vashalde, D., 2014) ; (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011) ; (IMBE, 2015) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005)
	Intérêt récréatif	Opportunités pour le tourisme et les loisirs	Population locale, touristes	(Vashalde, D., 2014) ; (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011) ; (IMBE, 2015) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005) ; (Somda, J. and Aboubacar, A., 2013)
	Intérêt éducationnel	Opportunités pour l'éducation et la formation	Population locale (adultes et enfants)	(Vashalde, D., 2014) ; (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011) ; (IMBE, 2015) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005)
	Intérêt scientifique	Rôle des écosystèmes dans la constitution d'un support scientifique	Chercheurs, population nationale (ou mondiale)	(Vashalde, D., 2014) ; (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011) ; (IMBE, 2015)
	Chasse	Intérêt cynégétique offert par les ZH	Chasseurs	(Vashalde, D., 2014); (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011)
	Aménités paysagères	Appréciation de la nature	Population locale	(Vashalde, D., 2014); (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011) ; (Millenium Ecosystem Assessment, 2005)
Support	Offre d'habitats		Pas de bénéficiaires directs, support aux autres services	(Millenium Ecosystem Assessment, 2005) ; (Somda et Aboubacar, 2013)
	Formation des sols	Rétention des sédiments et accumulation de la matière organique	Pas de bénéficiaires directs, support aux autres services	(Millenium Ecosystem Assessment, 2005) ; (Somda et Aboubacar, 2013)

	Cycle des nutriments	Stockage, recyclage, traitement et acquisition de nutriments	Pas de bénéficiaires directs, support aux autres services	(Millenium Ecosystem Assessment, 2005) ; (Somda et Aboubacar, 2013)
	Cycle de l'eau		Pas de bénéficiaires directs, support aux autres services	(Somda et Aboubacar, 2013)
	Production primaire		Pas de bénéficiaires directs, support aux autres services	(Somda et Aboubacar, 2013)
	Production de biomasse		Pas de bénéficiaires directs, support aux autres services	(Somda et Aboubacar, 2013)
	Stabilisation des flux de masse		Pas de bénéficiaires directs, support aux autres services	(IMBE, 2015)