UNIVERSITE DU BURUNDI

Faculté des Sciences

Département de Biologie

BP.2900, Bujumbura-Burundi

- **Classe : Master2 en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement (MSGIE2)**
- **Spécialité: Gestion des Ressources Naturelles et Génie de l'Environnement**
- **ECUE (Cours): Ecologie de la restauration**
- **Volume Horaire de l'ECUE (Cours): 45 Heures**

Syllabus du cours d'Ecologie de la restauration

Préparé par (Titulaire du Cours)

Dr.Ir.NIYOYITUNGIYE Lambert

Bujumbura, Août 2025

TABLE DES MATIERES

Table des matières.....i
0.FICHE SIGNALETIQUE DE LA DESCRIPTION DU COURS 1
I.INTRODUCTION 2
I.1. Contexte et justification du cours 2
I.2. Considérations générales sur l'écologie 3
I.2.1.Définition des concepts écologiques 3
I.2.2.Domaines d'intervention de l'Ecologie 4
II.EVOLUTION TEMPORELLE DES RESSOURCES NATURELLES ET L'EMPREINTE DE L'ACTIVITÉ HUMAINE 5
II.1. Evolution Temporelle des Ressources Naturelles 5
II.2. Empreinte de l'activité humaine sur les ressources naturelles 6
III.GRANDS COURANTS DE PRISE DE CONSCIENCE ET LEUR CHRONOLOGIE (PROTECTION, CONSERVATION, GESTION DURABLE, RESTAURATION, RÉHABILITATION ET RÉALLOCATION). 7
III.1.Ecologie de la restauration 8
III.1.1. Introduction 8
III.1.2. Analyse sémantique du concept de la restauration écologique 9
III.1.2.1.Restauration écologique vue par le Règlement de restauration 10
III.1.2.1.1. Définitions des termes connexes à la « restauration » 10
III.1.2.1.2.Analyse des définitions de la restauration retenues pour le Règlement de restauration 12
III.1.2.2. La restauration écologique selon la littérature 13
III.1.2.2.1. Méthode 13
III.1.2.2.2.Présentation et analyse de différentes définitions de la restauration 14
III.1.2.2.3.Définition de la restauration écologique retenue 20
III.1.2.3.Différentes stratégies d'intervention de restauration écologique 21
III.1.2.3.1.Analyse des catégories existantes pour qualifier les stratégies d'intervention 21
III.1.2.3.1.1. Restauration passive et restauration active 21
III.1.2.3.1.2. Critique de la catégorisation passif/actif 23
III.1.2.3.1.3.Propositions alternatives pour décrire les stratégies d'intervention de restauration 24
III.1.2.3.2. Etat de l'écosystème à restaurer et choix du niveau d'intervention 26
III.1.2.4. Restauration et concepts proches 27
III.1.2.4.1. Objectif de la restauration 27
III.1.2.4.2. Notion d'écosystème de référence 28
III.1.2.4.3. Non-détérioration 31
III.1.2.4.4. Remédiation 32
III.1.2.4.5. Réhabilitation 32
III.1.2.4.6. Seuil d'irréversibilité 33
III.1.2.4.7. Réaffectation ou Réallocation 34
III.1.2.4.8.Articulation entre restauration, réhabilitation et réaffectation selon le degré de dégradation de l'écosystème 35
III.1.2.4.9. Notion de Création 36

III.1.2.4.10. Remise en état d'un écosystème 38
III.1.2.4.11. Amélioration d'un écosystème 38
III.1.2.4.12. Mise en valeur d'un écosystème 39
III.1.2.4.13. Mesures d'atténuation 39
III.1.2.4.14.Trajectoire 39
III.1.2.4.15. La perturbation écologique 40
III.1.2.4.16.Notion de stabilité, de résistance et de résilience et d'un écosystème 42
III.1.2.4.17. Intégrité et Santé d'un écosystème 42
III.1.2.4.18.Effondrement d'un écosystème 43
III.1.2.4.18.1.Définition 43
III.1.2.4.18.2. Signes d'effondrement d'un écosystème 43
III.1.2.4.18.3. Causes principales de l'effondrement 43
III.1.2.4.18.4. Conséquences de l'éffondrement d'un écosystème 44
III.1.2.4.18.5.Restauration d'un écosystème effondré 44
III.1.2.4.19. Dégradation, Dommage et Transformation d'un écosystème 45
III.1.2.4.20.Différence entre les termes utilisés en écologie de la restauration 45
IV.INDICATEURS D'UN ÉCOSYSTÈME DÉGRADÉ 47
IV.1.Notion de dégradation en écologie de la restauration 47
IV.2. Indicateurs de dégradation d'un écosystème 47
IV.2.1. Perte de biodiversité 48
IV.3.2. Altération des sols 48
IV.3.3. Dégradation de la qualité de l'eau et pollution 48
IV.3.4. Perturbation des cycles naturels et Perte des fonctions écosystémiques. 48
IV.3.5. Diminution de la productivité biologique 49
IV.3.6. Fragmentation ou perte/Altération d'habitats naturels 49
IV.3.7. Changements climatiques locaux 49
IV.3.8. Présence de déchets ou de polluants 49
IV.3.9. Changements dans les populations d'espèces 49
IV.3.10. Tableau synthétique des indicateurs généraux de dégradation d'un écosystème 50
IV.3.11. Exemple concret : Forêt tropicale humide dégradée 51
IV.3.12.Fiche signalétique de restauration 51
V.ETAPES D'UN PROJET DE RESTAURATION 52
V.1. Fondements de l'écologie de la restauration 52
V.2. Étapes détaillées d'un projet de restauration écologique 52
V.3.Filtres à la restauration 60
V.3.1.Les filtres de dispersion 61
V.3.2.Les filtres abiotiques (environnementaux) 62
V.3.3.Les filtres biotiques (de coexistence) 62
V.4.Evaluation de la réussite d'un projet de restauration écologique 65
V.4.1. Attributs d'une restauration écologique réussie 65
V.4.2. Quantification de la réussite d'une restauration à l'aide d'indicateurs 66
V.5. Facteurs pris en compte lors de la conception d'un projet adéquat de restauration: 69
V.5.1. Expertise pertinente 69
V.5.2. Objectifs du Projet 69

2.1.Objectifs généraux....69
V.5.3. Localisation et choix du Site 70
3.1 Choix du bassin versant et fonctions écologiques 70
3.2 Contexte régional et local 70
3.3. Identification de sites potentiels et évaluation de leur pertinence 70
V.5.4.Description du site et diagnostic environnemental 71
4.1.Méthodologie utilisée pour la description du site et la caractérisation des milieux 71
4.2.Description des milieux où sont projetés les travaux 71
V.5.5. Ecosystème de Référence 72
V.5.6. Acceptabilité Sociale 72
V.5.7.Conception du projet et description des travaux 72
V.5.8. Minimisation 73
V.5.9. Suivi et indicateurs 73
9.1.Choix des indicateurs 73
9.2.Indicateurs des objectifs particuliers du projet....74
9.3.Suivi de l'évolution du site 74
V.5.10.Pérennisation des milieux restaurés ou crées 74
V.5.11.Echéancier des travaux et planification budgétaire 74
V.6. Étude de cas d'un projet de restauration écologique: Restauration écologique du bassin versant de la rivière Kanyaru (Burundi) 75
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 78

0. FICHE SIGNALETIQUE DE LA DESCRIPTION DU COURS

ECUE : ECOLOGIE DE LA RESTAURATION					
Volume horaire global des enseignements	CM=30	TD=5	TP=10	TPE=30	Crédit= 3

Objectifs de l'enseignement:

A la fin de l'ECUE, l'étudiant sera capable de :

- ✓ Distinguer les concepts de protection, conservation, gestion durable, Restauration, Réhabilitation et Réallocation,
- ✓ D'évaluer l'état de dégradation d'un écosystème
- ✓ De proposer les techniques de restauration de l'écosystème dégradée

Pré-requis : Ecologie et ses applications, Ecologie des populations et des Communautés, Ecosystèmes vulnérables, Dynamiques et diversité des paysages, Outils de prévision et de gestion de l'l'environnement, Outils de contrôle et de gestion, Cartographie

***Contenus* du programme :**

- Evolution dans le temps des ressources naturelles et l'empreinte de l'activité humaine,
- Grands courants de prise de conscience et leur chronologie (protection, conservation, gestion durable, Restauration, Réhabilitation et Réallocation),
- Indicateurs d'un écosystème dégradé
- Etapes d'un projet de restauration

Méthodes d'enseignement / d'apprentissage:

- Syllabus,
- Exposé magistral,
- Travaux en groupes,
- Exposés,
- travaux de terrain

Méthodes d'évaluation :

- 1ère session : Examen final écrit ou oral (60%) et Travaux en cours d'années (TD: 40%)
- 2ème Session : Examen final écrit et/ou oral (100%)

Résultats de l'apprentissage

L'étudiant sera capable de :

- ➢ Analyser la limnologie sous ses composantes biologique, chimique et physique ;
- ➢ Identifier les différents types de pêche ainsi que les rejets, réglementation, aspects économiques et impacts.
- ➢ Proposer les méthodes et outils de pêche et prédiction des stocks de poissons,
- ➢ Analyser et formuler les stratégies et les techniques d'élevage de poissons.

1. **Références principales :**Robert Laugier (2012). De la restauration écologique au génie écologique, synthèse documentaire, 19 p.
2. Le Floc'h E., Aronson J., 1995. Ecologie de la restauration. Définition de quelques concepts de base. Nat. Sci. Soc. 3, 29-35.
3. Keenleyside, K.A., N. Dudley, S. Cairns, C.M. Hall, et S. Stolton (2013). Restauration écologique pour les aires protégées: Principes, lignes directrices et bonnes pratiques.120 p.
4. Voir autres dans la partie références bibliographiques de ce document

I. INTRODUCTION

I.1. Contexte et justification du cours

- Les perturbations d'un écosystème consiste en un (des) évènement(s) altérant dans le temps et dans l'espace les relations entre les organismes vivants et leurs habitats (Wali, 1987).
- Ces perturbations peuvent être d'amplitude et de nature diverses. Bien que nombre d'habitats soient intrinsèquement dynamiques (Burel et al., 1999) et subissent des perturbations naturelles, les actions humaines sont à présent à l'origine de la majeure partie des perturbations.
- La plupart des écosystèmes et des régions du monde (si pas tous) connaissent de tels phénomènes de perturbation d'origine anthropique (Godron et al., 1983 ; UNEP, 2007). Les activités perturbatrices vont de la déforestation au drainage des zones humides, en passant par l'introduction de polluants chimiques.
- Les impacts des modifications engendrées par les perturbations anthropiques sur la biodiversité ont été largement documentés. Parmi ceux-ci, la fragmentation et ses conséquences sont considérées comme des atteintes majeures à la biodiversité (Ouborg, 1993 ; Harrisson et al., 1999 ; Eriksson et al., 2001 ; Balmford et al., 2005).
- **La fragmentation** est la réduction d'un habitat continu de grande taille en fragments d'habitats plus petits et isolés les uns des autres. À l'échelle du paysage, ce processus se traduit par une réduction de la diversité en habitats ainsi que par une hétérogénéité plus importante des habitats.
- Par ailleurs, à l'échelle de l'espèce, la fragmentation peut résulter en une réduction de la taille des populations des fragments rémanents et une diminution du taux de colonisation des fragments d'habitat, du fait du manque de connectivité. La vulnérabilité de telles populations face aux modifications naturelles ou anthropiques s'en voit accrue (Sih et al., 2000 ;UNEP, 2007).
- L'importance de ces menaces sur la biodiversité n'a toutefois reçu une attention sérieuse de la part des décideurs que depuis les années 1990(Madgwick et al., 2002). Il est apparu que la seule protection et gestion des fragments rémanents de certains habitats naturels et semi-naturels peut ne pas garantir la conservation à long terme de tous les composants de la biodiversité (Bennett, 1997).
- Les surfaces protégées ne peuvent en réalité assumer leur fonction que si elles sont suffisamment grandes et connectées et si elles abritent un échantillon relativement complet de la biodiversité à l'échelle régionale (Soulé et al., 2001).
- Ainsi, outre un besoin de mesures de protection des habitats et des espèces, est né un besoin grandissant de restauration écologique visant à augmenter les surfaces des habitats menacés et créer un réseau écologique assurant la connectivité entre fragments.
- Ces restaurations font à présent l'objet de nombreux projets, plus ou moins ambitieux et … plus ou moins couteux. Il en résulte que, derrière une volonté de conservation et de préservation des écosystèmes, il existe une demande de la société quant à l'évaluation du succès des restaurations écologiques.
- Dans cette optique, le présent cours renseigne sur les notions générales liées à la restauration écologique d'une part, ainsi que sur les critères justifiant de la

réussite d'une restauration et les indicateurs permettant de quantifier cette réussite.

I.2. Considérations générales sur l'écologie

I.2.1. Définition des concepts écologiques

- **Le mot écologie** a été créé en 1866 par le biologiste allemand Ernest Haekel à partir de deux mots grecs ; ***oikos*** qui veut dire ; maison, habitat et ***logos*** qui signifie science.
- **L'écologie** apparait donc comme la science de l'habitat, étudiant les conditions d'existence des êtres vivants et les interactions de toute nature qui existent entre ces êtres vivants et leurs milieux. Il s'agit de comprendre les mécanismes qui permettent aux différentes espèces d'organismes de coexister en se partageant ou en se disputant les ressources disponibles (espace, temps, énergie, hydrologie, océanographie, la chimie, la géologie, la pédologie, la physiologie, la génétique, éthologie,…etc). Ce qui fait de l'écologie une science pluridisciplinaire.
- **L'écologie moderne** a été créé en 1950 par quatre fondateurs, à savoir : deux anglais (Tansley et Elton),un américain (Odum) et un australien (Andrewartha).Ses cibles sont les **unités écologiques** (la population, le peuplement et la biocénose) et les **systèmes écologiques** (Système population ou démo-système, Système peuplement, Système biocénose ou écosystème et Système biocénose totale ou biosphère).
  - **Les unités écologiques** sont des niveaux d'organisations des êtres vivants supérieurs à l'organisme et ayant les tailles et les complexités différentes les uns des autres.
  - **Les systèmes écologiques** sont des associations des unités écologiques avec leurs environnements respectifs.
  - **Un système écologique ou écosystème** fut défini par le botaniste anglais Arthur Tansely en 1935 comme un système, c'est-à-dire un ensemble d'éléments indissociables : la biocénose et le biotope. Il est donc possible de distinguer parmi les divers milieux et les innombrables êtres vivants qui peuplent la biosphère un ensemble d'unités fonctionnelles de nature écologique stables dans le temps dénommé «**écosystème**». Ce terme désignant l'association d'un environnement physico-chimique spécifique (Biotope) avec une communauté vivante (Biocénose). Partant de ces définitions, nous pourrions être tentés comme l'ont fait de nombreux auteurs depuis Transley (1935) de définir l'écosystème par l'équation suivante:

    Ecosystème = Biotope + Biocénose

    - **La biocénose** est l'ensemble des organismes qui vivent ensemble (zoocénose, phytocénose, micro biocénose, mytocénose,…….etc) en interaction ou en interdependance. C'est donc un groupement d'êtres vivants rassemblés par l'attraction qu'exercent sur eux les facteurs du milieu. Ce groupement est caractérisé par une composition spécifique qui détermine l'existence de phénomènes d'interdépendance; il occupe une espace appelé le biotope.

- **Le biotope** est un environnement ou milieu de vie défini par des caractéristiques physiques et chimiques relativement uniformes qui héberge un ensemble de formes de vie composant la biocénose : Flore, faune, champignons et des populations des micro-organismes. Le biotope se définit également comme étant l'ensemble des facteurs écologiques Abiotiques (substrat, sol, climat) qui caractérisent le milieu où vit une biocénose déterminée.

❖ **La biosphère** est la partie de l'écorce terrestre où la vie est possible. La biosphère Comprend une partie de lithosphère (partie solide de l'écorce terrestre), une partie de l'atmosphère (la couche gazeuse entourant la terre) et une partie de l'hydrosphère (partie du système terrestre constituée par l'eau). La biosphère désigne donc l'ensemble de ces milieux et tous les êtres vivants qui y vivent. Exemple ; une forêt, biocénose ; phytocénose, zoocénose.

I.2.2.Domaines d'intervention de l'Ecologie

➢ Les écologues s'intéressent surtout aux niveaux d'organisation biologique qui comprennent l'individu et/ou des niveaux supérieurs :

❖ **L'individu** est un spécimen d'une espèce donnée. Un individu biologique est soit une cellule vivante isolée (Organisme unicellulaire), soit un groupe de cellules vivantes attachées ensemble et provenant d'une même cellule-mère (Organisme pluricellulaire).

❖ **L'espèce** est l'ensemble d'individus interféconds et génétiquement isolés des autres ensembles équivalents du point de vue reproductif.

❖ **La population** est un groupe d'individus de la même espèce occupant un territoire particulier à une période donnée.

❖ **Le peuplement** est l'ensemble des individus appartenant à plusieurs espèces (Populations) qui coexistent dans un même milieu et forment des ensembles fonctionnels.

❖ **Une communauté (Biocénose)** est l'ensemble des peuplements d'un même milieu, c'est-à- dire le peuplement animal (Zoocénose) et/ou végétal (Phytocénose) qui vivent dans les mêmes conditions de milieu et au voisinage les uns des autres. **Ex.:** Communauté vivante d'une forêt (Animaux et végétaux).

❖ **Un écosystème** est l'ensemble de la communauté vivante **(Biocénose)** et de son milieu physico-chimique **(Biotope).** **Ecosystème=Biotope + Biocénose**

❖ **Un biome** est une grande région terrestre qui a un climat, un sol, des plantes et des animaux spécifiques. On peut citer : La toundra, la forêt boréale, la forêt tempérée, la forêt tropicale humide, la prairie, le désert …

❖ **La biosphère** est l'enveloppe de la Terre comprenant tous les organismes vivants. Elle est constituée d'une partie de :

- **l'atmosphère :** Enveloppe gazeuse qui entoure la Terre,
- **l'hydrosphère :** Compartiment «eau» de la Terre,
- **la lithosphère** : Sol et roche de la couche terrestre.

II. EVOLUTION TEMPORELLE DES RESSOURCES NATURELLES ET L'EMPREINTE DE L'ACTIVITÉ HUMAINE

II.1. Evolution Temporelle des Ressources Naturelles

Les ressources naturelles (eau, sol, forêts, minerais, etc.) sont indispensables à la vie humaine et au développement économique. Depuis des millénaires, l'activité humaine a profondément modifié ces ressources, parfois en les exploitant durablement, parfois en les surexploitant.

i. Avant la révolution industrielle (jusqu'au XVIII^{e} siècle)

- **Exploitation faible :** Les sociétés humaines principalement agricoles et pastorales à faible pression sur les ressources vivaient en grande partie en harmonie avec leur environnement. Les ressources naturelles (eau, bois, poissons, terres fertiles) étaient exploitées de manière artisanale et à petite échelle.
- **Impact localisé :** L'impact humain sur l'environnement restait limité et localisé à la déforestation locale, l'irrigation primitive, la chasse et la pêche de subsistance.
- **Ressources renouvelables:** la nature avait généralement le temps de se régénérer.

ii. Révolution industrielle (fin XVIII^{e} – XIX^{e} siècle)

- **Augmentation de l'exploitation:** l'apparition de la machine à vapeur, l'exploitation massive du charbon, puis du pétrole, l'extraction minière (fer) et la déforestation s'intensifient pour soutenir l'industrialisation. Début de la pollution de l'air, de l'eau et et des sols, urbanisation rapide, perte d'habitats naturels.

iii. XX^{e} Siècle : Croissance accélérée et mondialisation

- **Explosion démographique:** La population mondiale passe de 1,6 milliard (1900) à 6 milliards (2000).
- **Agriculture intensive:** Utilisation massive des engrais chimiques et des pesticides conduisant à la dégradation des sols.
- **Consommation exponentielle des ressources naturelles fossiles(**gaz, pétrole, charbon) et des métaux rares et eau douce.
- **Biodiversité en recul:** disparition d'espèces animales et végétales.
- Multiplication des barrages, déviation de rivières, fonte des glaciers.
- Pollution mondiale, changements climatiques perceptibles dès les années 1970.

iv. XXI^{e} Siècle: Prise de conscience environnementale

- **Développement durable:** volonté de concilier l'économie, l'environnement et la société.
- **Énergies renouvelables:** Les énergies solaires, éoliens, hydroélectriques en développement. Initiatives de reforestation, constitution des réserves naturelles et des lois environnementales.

- Naissance de mouvements écologistes et d'initiatives internationales (Accords de Paris, Objectifs de Développement Durable de l'ONU).
- Tensions géopolitiques autour de l'accès aux ressources (ex. : eau au Moyen-Orient, terres rares pour la technologie).

II.2. Empreinte de l'activité humaine sur les ressources naturelles

- L'empreinte humaine désigne l'ensemble des impacts des activités humaines sur l'environnement naturel comme l'extraction de ressources, la pollution, transformation des milieux, la perte de biodiversité et la contribution au changement climatique.
- Les ressources naturelles (eau, sol, forêts, minerais, etc.) sont indispensables à la vie humaine et au développement économique. Depuis des millénaires, l'activité humaine a profondément modifié ces ressources, parfois en les exploitants durablement, parfois en les surexploitant.
- L'humanité est aujourd'hui confrontée à un choix décisif : continuer sur un modèle destructeur ou bâtir un équilibre entre développement et préservation. La restauration écologique montre que l'homme peut aussi être un acteur positif pour la nature. Mais cela exige des changements profonds dans nos modes de vie, nos technologies et nos modèles économiques.

a) Les principaux effets induits par l'homme sur les ressources naturelles sont :

i. **Déforestation:** Perte massive de forêts (ex : Amazonie, Indonésie) suite à l'agriculture, l'exploitation forestière, l'urbanisation avec comme cconséquences : perte de biodiversité, Diminution de la capacité d'absorption du CO_2, changements climatiques, érosion des sols et perturbation du cycle de l'eau.

ii. **Pollution :** de l'Air(émissions de gaz à effet de serre comme le CO_2, le méthane, protoxyde d'azote issues des transports, des industries et et de l'agriculture), de l'Eau (déversements chimiques et plastiques dans les océans, rejets domestiques et industriels, ppollution des nappes phréatiques, CO_2 dans l'atmosphère), du Sol(contamination par les pesticides, déchets industriels, métaux lourds et hydrocarbures).

iii. **Surexploitation des ressources:** Pêche intensive mettant en danger l'équilibre marin (90% des stocks de poissons sont surexploités ou exploités au maximum), Surconsommation d'eau douce (fleuves asséchés, assèchement de nappes phréatiques), forêts tropicales détruites pour l'agriculture (soja, huile de

palme), exploitation intensive des ressources fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel.

iv. **Changement climatique:** Résultat de l'utilisation massive d'énergies fossiles, Fonte des glaciers, montée du niveau des mers, phénomènes météorologiques extrêmes.

v. **Artificialisation des sols :** Urbanisation (bétonisation, construction de routes, infrastructures industrielles) avec comme conséquences :Fragmentation des habitats naturels, Réduction des terres agricoles, Modification des régimes hydrologiques et disparition d'écosystèmes naturels.

b) Réactions et Solutions mises en place

- **Restauration écologique:** Reboisement, dépollution, reconversion industrielle.
- **Transition énergétique:**Réduire la dépendance aux énergies fossiles et développement des énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique).
- **Économie circulaire:** Recyclage, réutilisation pour limiter l'extraction, réduction des déchets, consommation responsable.
- **Politiques environnementales:** Lois sur la protection de la nature, taxes carbone, conventions internationales.
- **Développement durable:** Intégrer la gestion des ressources à long terme.
- **Conservation de la biodiversité:** Création d'aires protégées, restauration d'écosystèmes.

III. GRANDS COURANTS DE PRISE DE CONSCIENCE ET LEUR CHRONOLOGIE (PROTECTION, CONSERVATION, GESTION DURABLE, RESTAURATION, RÉHABILITATION ET RÉALLOCATION).

A. Protection de la nature (fin XIX^{e} – début XX^{e} siècle)

- **Contexte:** Révolution industrielle ⇒ dégradation visible des milieux naturels.
- **Objectif:** Mettre sous cloche certains espaces pour les préserver.
- **Actions:** Création des premiers parcs nationaux (ex:Yellowstone,1872), mouvements de protection des espèces menacées.
- **Idée principale:** La nature a une valeur intrinsèque.

B. Conservation (début – milieu XX^{e} siècle)

- **Contexte:** Besoin d'utiliser les ressources pour le développement tout en les préservant.
- **Objectif :** Utilisation rationnelle des ressources.
- **Actions :** Gestion durable des forêts, de la faune et de l'eau.
- **Création** de l'UICN (1948).
- **Idée principale :** Utiliser sans épuiser.

C. Gestion durable (fin XX^{e} siècle – années 1990)

- **Contexte :** Crises écologiques majeures.
- **Objectif:**Concilier développement économique et protection de l'environnement.

- **Actions :** Rapport Brundtland (1987).
- **Sommet de la Terre de Rio (1992).**
- **Idée principale:** Intégrer l'environnement dans toutes les politiques.

D. Restauration écologique (années 1990 – 2000)

- **Contexte:** Protection insuffisante pour contrer la dégradation.
- **Objectif:** Restaurer les écosystèmes naturels.
- **Actions:** Reforestation, renaturation de rivières.
- **Idée principale:** Réparer la nature.

E. Réhabilitation (depuis les années 2000)

- **Contexte:** Sites trop dégradés pour un retour complet à l'état naturel.
- **Objectif:** Améliorer pour un nouvel usage futur.
- **Actions:** Traitement des sols pollués.
- **Conversion de friches industrielles.**
- **Idée principale:** Chercher un compromis.

F. Réallocation écologique (années 2010 – aujourd'hui)

- **Contexte:** Changements climatiques rapides.
- **Objectif:** Adapter les activités humaines aux nouvelles réalités écologiques.
- **Actions :** Migration contrôlée des espèces.
- **Déplacement d'infrastructures.**
- **Idée principale:** S'adapter pour survivre.

III.1.Ecologie de la restauration

III.1.1. Introduction

- L'écologie de la restauration est une discipline scientifique qui étudie les principes et processus écologiques à appliquer pour concevoir, guider, évaluer et améliorer les projets de restauration des écosystèmes dégradés ou endommages. Elle définit le cadre conceptuel et théorique de la restauration écologique et en fournit également les fondements pratiques d'application grâce à un corpus d'études et d'expérimentations de plus en plus important.
- Les techniques de restauration écologique prennent racine au cours des XIXème et XXème siècles (Bradshaw, 1984). Elles se nourrissent de plusieurs disciplines scientifiques telles que l'écologie des communautés et fonctionnelle, ou encore l'écologie du paysage.
- Les connaissances tirées de ces champs disciplinaires permettent de mieux adapter et traduire les différents concepts écologiques en des protocoles pratiques de gestion des milieux.
- De part ses aspects pratiques, l'écologie de la restauration peut également être considérée comme un moyen de tester les concepts d'écologie théorique, tels que les règles d'assemblages des communautés, et permettre une meilleure appréhension des systèmes écologiques (Choi et al., 2008; Dobson et al., 1997; Temperton, 2004; Wainwright et al., 2018).
- La restauration écologique se base largement sur la théorie de la succession et la théorie de l'assemblage ("*assembly theory*"), en considérant la restauration comme initiant ou accélérant l'assemblage d'une série d'espèces.

- La théorie des assemblages, en étudiant les ensembles de règles gouvernant l'assemblage des espèces, des communautés et des écosystèmes et leur sélection parmi un pool d'espèces plus large (Weiher et al., 1999),possède la capacité de déterminer les stratégies de gestion les plus pertinentes, permettant ainsi de diriger la succession vers l'état désiré.
- Toutefois, Chase (2003) suggère que, dans des environnements sujets à des perturbations de grande ampleur et ayant une faible connectivité, l'assemblage des communautés peut aboutir à des états d'équilibre multiples. De tels états stables, alternatifs (Hobbs et al., 1996 ; Temperton et al., 2004) peuvent représenter un challenge pour les responsables de restaurations écologiques.
- Enfin, contrairement à la biologie de la conservation généralement centrée sur une (ou quelques) espèce(s) cible(s), la restauration vise l'échelle de l'écosystème et la reconstruction des fonctions et processus de l'écosystème. Ce sont les communautés d'espèces, voire les écosystèmes entiers, qui font l'objet principal et central des études en écologie de la restauration.

III.1.2. Analyse sémantique du concept de la restauration écologique

La restauration écologique étant une discipline relativement jeune (Jones *et al*. 2018), des variations de sémantique peuvent exister selon les acteurs de la restauration. Or, le consensus sur la terminologie employée dans un domaine est une condition importante à la cohérence entre la recherche sur ce domaine, la mise en oeuvre pratique de la discipline et les politiques publiques qui s'y réfèrent (Atkinson & Bonser 2020).

- Dans un premier temps, on s'intéresse aux définitions proposées par le Règlement de restauration (CE 2022 a ; CE 2024).
- Dans un second temps, on analyse plusieurs définitions établies par des organismes de référence en Ecologie ou issues de publications scientifiques dédiées à la question de la restauration. L'analyse de ces définitions s'axe autour de la question de :
  i. **l'objet :** A quoi s'intéresse la restauration (Quel est «l'objet» qu'on restaure) ?
  ii. **l'objectif :** Quelle est «la cible» de la restauration (Que cherche-t-on à obtenir à l'issue de la restauration) ?
  iii. **la méthode :** En quoi consiste la restauration (Qu'est-ce qui est mis en œuvre) ?

III.1.2.1.Restauration écologique vue par le Règlement de restauration

III.1.2.1.1. Définitions des termes connexes à la « restauration »

La définition de la « restauration » donnée dans le Règlement de restauration (art. 3) est accompagnée par la définition de termes spécifiques aux objectifs du Règlement et aux entités écologiques auxquels il s'intéresse. Deux versions de ces définitions sont évoquées: (i) celles issues du texte initial de la proposition de Règlement de restauration par la Commission Européenne (CE, 2022a), et (ii) celles issues de la version du texte adoptée en plénière par le Parlement en février 2024 (CE,2024).

Tableau 1:Définitions de la restauration écologique selon le Règlement de restauration de la Commission Européenne.

Termes employés dans le Règlement	**Définitions d'après la proposition de la CE (CE 2022 a)**	**Définitions amendées retenues début 2024 (CE 2024) *(Les amendements par rapport au texte initial de la CE sont identifiés en gras)***
Ecosystème	**Écosystème:** C'est un complexe dynamique formé de communautés de plantes, d'animaux et de micro-organismes et de leur environnement non vivant qui, par leur interaction, forment une unité fonctionnelle, et qui comprend des types d'habitats, des habitats d'espèces et des populations d'espèces	**Écosystème:** C'est un complexe dynamique formé de communautés de plantes, d'animaux*, de champignons* et de micro-organismes et de leur environnement non vivant qui, par leur interaction, forment une unité fonctionnelle, et qui comprend des types d'habitats, des habitats d'espèces et des populations d'espèces »
Bon état	**Bon état:** L'état dans lequel les caractéristiques essentielles d'un écosystème, à savoir son état physique, chimique, structurel et fonctionnel et sa composition, de même que les caractéristiques de ses paysages terrestres et marins, traduisent le niveau élevé d'intégrité écologique, de stabilité et de résilience nécessaire pour assurer son maintien à long terme »	**Bon état**: en ce qui concerne une zone d'un type d'habitat, l'état dans lequel ses caractéristiques clés, en particulier sa structure et ses fonctions, ainsi que ses espèces typiques ou sa composition typique en espèces, traduisent le niveau élevé d'intégrité écologique, de stabilité et de résilience nécessaire pour assurer son maintien à long terme et contribuent ainsi à atteindre ou à maintenir un état de conservation favorable pour un habitat, lorsque le type d'habitat concerné figure sur la liste de l'annexe I de la directive 92/43/CEE et, dans les écosystèmes marins, contribuent à atteindre ou à maintenir un bon état écologique »
Surface de référence favorable	**Superficie de référence favorable**: La superficie totale d'un type d'habitat dans une région biogéographique ou une région marine donnée au niveau national qui est considérée comme le minimum nécessaire pour assurer la	**Surface de référence favorable:** La surface totale d'un type d'habitat dans une région biogéographique ou marine donnée au niveau national qui est considérée comme le minimum nécessaire pour assurer la viabilité à long terme d'un type d'habitat et de ses espèces typiques ou de sa composition typique en espèces, y compris toutes les variations écologiques significatives de ce type d'habitat dans

	viabilité à long terme de ce type d'habitat et des espèces qui y sont présentes, y compris toutes ses variations écologiques significatives au sein de son aire de répartition naturelle, et qui comprend la superficie du type d'habitat et, si celle-ci n'est pas suffisante, la superficie nécessaire au rétablissement de ce type d'habitat;	son aire de répartition naturelle, et qui comprend la surface actuelle du type d'habitat et, si celle-ci n'est pas suffisante pour la viabilité à long terme du type d'habitat et de ses espèces typiques ou de sa composition typique en espèces, la surface supplémentaire nécessaire au rétablissement du type d'habitat; lorsque le type d'habitat concerné figure sur la liste de l'annexe I de la directive 92/43/CEE, un tel rétablissement contribue à atteindre un état de conservation favorable pour un habitat et, dans les écosystèmes marins, un tel rétablissement contribue à atteindre ou à maintenir un bon état écologique
Habitat d'une espèce	**Habitat d'une espèce:** Le milieu défini par des facteurs abiotiques et biotiques spécifiques où vit l'espèce à l'un des stades de son cycle biologique	**Habitat d'une espèce:** l'habitat d'une espèce tel qu'il est défini à l'article 1er, point f), de la directive 92/43/CEE
Qualité suffisante (d'un habitat d'espèce)	**Qualité suffisante d'un habitat:** La qualité de l'habitat d'une espèce qui permet de satisfaire aux exigences écologiques de cette espèce à tout stade de son cycle biologique de façon à ce qu'elle se maintienne sur le long terme en tant que composante viable de son habitat dans son aire de répartition naturelle;	**Qualité suffisante d'un habitat:** La qualité de l'habitat d'une espèce qui permet de satisfaire aux exigences écologiques de cette espèce à tout stade de son cycle biologique de façon à ce qu'elle se maintienne sur le long terme en tant que composante viable de son habitat dans son aire de répartition naturelle, contribuant à atteindre ou à maintenir un état de conservation favorable pour une espèce qui figure sur la liste de l'annexe II, IV ou V de la directive 92/43/CEE et à préserver les populations des espèces d'oiseaux sauvages couvertes par la directive 2009/147/CE et, en outre, dans les écosystèmes marins, contribuant à atteindre ou à maintenir un bon état écologique
Quantité suffisante (d'un habitat d'espèce)	**Quantité suffisante d'un habitat:** La quantité de l'habitat d'une espèce qui permet de satisfaire aux exigences écologiques de cette espèce à tout stade de son cycle biologique de façon à ce qu'elle se maintienne sur le long terme en tant que composante viable de son habitat dans son aire de répartition naturelle;	**Quantité suffisante d'un habitat:** La quantité de l'habitat d'une espèce qui permet de satisfaire aux exigences écologiques de cette espèce à tout stade de son cycle biologique de façon à ce qu'elle se maintienne sur le long terme en tant que composante viable de son habitat dans son aire de répartition naturelle, contribuant à atteindre ou à maintenir un état de conservation favorable pour une espèce qui figure sur la liste de l'annexe II, IV ou V de la directive 92/43/CEE et à préserver les populations des espèces d'oiseaux sauvages couvertes par la directive 2009/147/CE et, en outre, dans les écosystèmes marins, contribuant à atteindre ou à maintenir un bon état écologique

III.1.2.1.2.Analyse des définitions de la restauration retenues pour le Règlement de restauration

Dans l'article3 du Règlement de restauration (CE 2022 a), la Commission européenne présente la définition de la restauration qu'elle propose. Cette définition a évolué pour aboutir à la version adoptée en février 2024 et vouée à être la version définitive (CE 2024). Nous présentons ici ces deux versions de définition puis analysons ce qu'elles identifient comme objets, objectifs et méthodes de la restauration.

Tableau 2 : Définition de la restauration présentée par la Commission européenne en article 3 de sa proposition de texte de Règlement restauration (CE 2022 a) :

Définition de la restauration présentée par la Commission européenne en article 3 de sa proposition de texte de Règlement restauration (CE 2022 a): Restauration	**La restauration** désigne le processus consistant à aider activement ou passivement à la récupération d'un écosystème vers un bon état ou jusqu'à un bon état, d'un type d'habitat vers le niveau de condition le plus élevé atteignable et vers sa zone de référence favorable, d'un habitat d'une espèce vers une qualité et une quantité suffisantes, ou des populations d'espèces vers des niveaux satisfaisants, en tant que moyen de conservation ou d'amélioration de la biodiversité et de la résilience des écosystèmes

- **Objet**: S'intéresse aux écosystèmes par le biais des habitats, habitats d'espèces et populations d'espèces.
- **Objectif (Cible)** :
  i. Le bon état de l'écosystème ;
  ii. Le meilleur état possible et la superficie de référence favorable des habitats ;
  iii. Les niveaux suffisants de qualité et quantité des habitats d'espèce ;
  iv. Les niveaux satisfaisants des populations d'espèces.
- **Méthode**: Consiste en des interventions pour assister la récupération des écosystèmes. Ce qui est entendu par contribuer activement ou passivement n'est pas explicité dans la définition.

Définition de la restauration retenue pour la version finale du Règlement restauration (CE 2024) : La restauration désigne le processus consistant à aider activement ou passivement à la récupération d'un écosystème afin d'en améliorer la structure et les fonctions, dans le but de conserver ou de renforcer la biodiversité et la résilience des écosystèmes. Cela passe par l'amélioration d'une zone appartenant à un type d'habitat afin qu'elle atteigne un bon état, la réhabilitation d'une zone de référence favorable, ainsi que l'amélioration de l'habitat d'une espèce afin qu'il atteigne une qualité et une quantité suffisantes, conformément aux articles 4(1), (2) et (3) et 5(1), (2) et (3), et en atteignant les objectifs et en respectant les obligations prévues aux articles 8 à 12, y compris l'atteinte de niveaux satisfaisants pour les indicateurs mentionnés dans ces mêmes articles.

- **Objet** : S'intéresse aux écosystèmes, en particulier leurs structures et fonctions, leur biodiversité et leur résilience. Il est précisé que, dans le cadre du Règlement restauration, les unités de travail qui seront l'objet de la restauration sont notamment les habitats et habitats d'espèces.

- **Objectif** : L'objectif de la restauration est la récupération de l'écosystème considéré, en particulier de ses structures et fonctions. Dans le cadre du Règlement restauration, cet objectif se décline plus particulièrement par :
  - **i.** Tendre vers le bon état des habitats là où ils sont déjà présents,
  - **ii.** Rétablir ces habitats pour tendre vers leurs surfaces de référence favorable
  - **iii.** Atteindre une qualité et quantité suffisante des habitats d'espèce et
  - **iv.** Respecter les cibles spécifiques à certains écosystèmes (rivières, urbains, agricoles, forestiers, pollinisateurs) y compris atteindre les niveaux satisfaisants des indicateurs. L'atteinte de ces objectifs est également considérée comme devant contribuer plus globalement à conserver ou à améliorer la biodiversité et la résilience des écosystèmes en Europe.
- **Méthode**: Consiste en des interventions pour assister la récupération de l'écosystème. Ce qui est entendu par contribuer activement ou passivement n'est pas explicité dans la définition.

III.1.2.2. La restauration écologique selon la littérature

Cette partie porte sur les définitions de la restauration présentes dans la littérature ainsi que les catégories définies pour qualifier les stratégies d'intervention en restauration. Les concepts et définitions étudiés sont issus de publications d'instituts de référence en écologie et d'articles scientifiques dédiés à la question de la restauration.

III.1.2.2.1. Méthode

- Pour agréger diverses définitions de la restauration, on traite au même titre les définitions se référant à la « restauration écologique » et la « restauration des écosystèmes ».
- On choisit de ne pas distinguer ces expressions car elles semblent être l'une et l'autre utilisées par les acteurs de la restauration sans systématiquement servir à différencier des concepts distincts.
- On considère que le terme de « restauration des écosystèmes » sous-entend qu'on s'intéresse à la « restauration écologique des écosystèmes ».
- Les définitions étudiées sont issues de documents et de publications s'intéressant au concept et aux stratégies de restauration ou à la mise en oeuvre de mesures de restauration à large échelle (internationale et/ou multi-milieux).
- Les documents sources sont des publications scientifiques et publications de littérature grise produites par des organismes internationaux ou des groupes thématiques d'experts. Ils sont donc le fruit de recherches ou de consensus scientifiques entre experts référents.
- Cette analyse bibliographique n'est pas exhaustive et les définitions sélectionnées sont celles apparaissant les plus représentatives du panel d'interprétation existant autour du concept de restauration, ainsi que les définitions faisant référence de façon récurrente dans la littérature (telle que la définition issue de la SER, 2004).

III.1.2.2.2.Présentation et analyse de différentes définitions de la restauration

Tableau 3: Capitalisation et analyse de définitions provenant de divers acteurs de la restauration (publications scientifiques, communications d'organismes publiques, européens ou associations d'acteurs de la restauration)

Source de la définition	Définition de la restauration	Points importants retenus sur la définition générale de la restauration	Interprétation de ce qu'implique la définition sur les stratégies d'intervention
Lake P.S. (2001) « Sur la maturation de la restauration : relier la recherche écologique et la restauration »	❖ **La restauration** est le processus consistant à induire et à aider les composantes abiotiques et biotiques d'un environnement à retrouver l'état dans lequel elles se trouvaient à l'origine ou dans un état non altéré (Bradshaw, 1997). ❖ La restauration peut être réalisée de manière passive (lorsque les forces de dégradation sont réduites ou supprimées, permettant ainsi aux processus naturels de guider la restauration) ou de manière active (lorsque non seulement les forces de dégradation sont réduites ou stoppées, mais où le processus de restauration est, dans une certaine mesure, dirigé par des interventions telles que la réintroduction de processus dynamiques, l'élimination d'espèces exotiques ou la réintroduction d'espèces).	**Objet :** S'intéresse aux composantes biotiques et abiotiques d'un environnement. **Objectif :** Cible la récupération de l'écosystème vers un état intact ou d'origine, antérieur à une dégradation, qui est pris comme référence. **Méthode :** Consiste en une intervention pour amorcer ou assister la récupération de l'écosystème.	Souligne la possibilité de mener une restauration passive ou active : ❖ ***Restauration passive*:** réduire ou supprimer les sources de dégradation pour permettre la récupération naturelle de l'écosystème. ❖ ***Restauration active* :** la première étape reste la réduction ou suppression des sources de dégradation mais elle est suivie d'interventions humaines guidant ou menant la récupération du milieu.
SER, Society for EcologicaL Restoration (2004) « Guide international de la SER sur la restauration écologique »	**Définition synthétique retenue par la SER :** ❖ La restauration écologique est le processus consistant à aider à la récupération d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit. Cette définition est détaillée par le paragraphe suivant : ✓ La restauration écologique est une activité intentionnelle qui initie ou accélère la récupération d'un écosystème en ce qui concerne	**Objet:** S'intéresse aux écosystèmes (sa santé, son intégrité et sa capacité à se maintenir). **Objectif:** Cible le rétablissement d'un écosystème ayant été dégradé (voir transformé ou détruit) afin que celui-ci retrouve sa trajectoire	Pas de catégorisation de différentes stratégies de restauration. La SER souligne que selon les spécificités locales, une variété d'approches de la restauration est possible. Selon les circonstances les interventions peuvent consister à :

	sa santé, son intégrité et sa durabilité. Très souvent, l'écosystème nécessitant une restauration a été dégradé, endommagé, transformé ou totalement détruit à la suite d'activités humaines, de manière directe ou indirecte. ✓ La restauration vise à remettre un écosystème sur sa trajectoire historique. L'écosystème restauré ne retrouvera pas nécessairement son état antérieur, car les contraintes et conditions actuelles peuvent l'amener à évoluer selon une trajectoire modifiée. ✓ Les interventions mises en œuvre dans le cadre de la restauration varient considérablement d'un projet à l'autre, en fonction de l'ampleur et de la durée des perturbations passées. ✓ Dans les situations les plus simples, la restauration consiste à éliminer ou à modifier une perturbation spécifique, permettant ainsi aux processus écologiques d'engendrer une récupération autonome. ✓ Dans des situations plus complexes, la restauration peut aussi nécessiter la réintroduction délibérée d'espèces indigènes disparues, ainsi que l'élimination ou le contrôle, dans la mesure du possible, d'espèces exotiques envahissantes et nuisibles.	historique, laquelle ne signifie pas nécessairement un retour à un état antérieur (qui peut ne plus être possible en raison d'évolution des conditions du milieu). **Méthode :** Consiste en une intervention pour assister (initier ou accélérer) le rétablissement. Ceci peut se traduire par une variété d'interventions (dépendantes du degré de dégradation) allant d'actions uniquement sur les causes de dégradations, à des interventions sur les cortèges d'espèces de l'écosystème.	❖ agir sur une cause spécifique de perturbation (permettant ainsi un rétablissement autonome de l'écosystème) ❖ aller jusqu'à intervenir sur le cortège biologique en réintroduisant des espèces natives ou en contrôlant voire éliminant des espèces exotiques.

Keenleyside *et al*. (2013) «Restauration écologique pour les aires protégées : Principes, lignes directrices et bonnes pratiques »	**<u>Reprennent la définition de la SER (2004) à laquelle ils ajoutent notamment :</u>** ❖ Une restauration écologique peut se limiter à la réduction de certaines pressions pour permettre un rétablissement naturel, ou au contraire impliquer des interventions importantes comme des plantations, le rétablissement d'espèces localement éteintes ou l'enlèvement délibéré d'espèces exotiques envahissantes. ❖ Les raisons de mettre en œuvre des projets de restauration varient et peuvent inclure, par exemple, le rétablissement d'espèces particulières, la consolidation d'une fonction écosystémique ou d'une connectivité à l'échelle d'un paysage terrestre ou marin, l'amélioration des possibilités d'expériences touristiques ou encore le rétablissement ou l'amélioration de divers services écosystémiques. ❖ Une restauration peut contribuer à l'adaptation aux changements climatiques en renforçant la résilience face aux changements et en fournissant des services écosystémiques. » **<u>Evocation des termes "passif/actif" :</u>** ❖ La restauration surtout passive (c.à.d. à une régénération naturelle). Il faut étudier les aspects suivants: Si une restauration active est nécessaire (ex. voir si le simple fait de supprimer une pression résulterait en un rétablissement naturel) »	Mêmes points que pour la définition de la SER ci-dessus avec cependant des compléments impliquant que la restauration : **<u>Objet</u>:** peut s'intéresser à une caractéristique spécifique du milieu (et pas forcément à l'écosystème dans son ensemble). **<u>Objectif</u> :** peut être motivée par des objectifs écologiques spécifiques mais également sociaux-économiques en allant jusqu'à viser l'amélioration de services rendus par le milieu considéré.	Distinction entre différents niveaux de restauration : ❖ Une intervention de gestion des activités humaines dans un but de levée/réduction des pressions pour permettre un rétablissement naturel. ❖ Une intervention directe sur une composante biologique de l'écosystème pour favoriser et accélérer la récupération. Plus tard dans le document, les termes de restauration passive et active sont utilisés sans qu'une définition soit directement proposée, pour autant il ressort : ✓ ***Restauration passive*** **:** suppression des pressions pour permettre le rétablissement naturel. ✓ ***Restauration active :*** va au-delà de la suppression de pression en agissant sur les composantes de l'écosystème. Elle n'intervient que si la suppression des pressions est estimée insuffisante pour permettre le rétablissement.

Gann et al. (2019) « Principes et normes internationaux pour la pratique de la restauration écologique » pour le journal de la SER NB : Cette publication s'inscrit dans la continuité du « Guide international d'introduction à la restauration écologique » (SER 2004)	**Reprennent la définition de la SER (2004) qu'ils développent ensuite comme suit :** ❖ La restauration écologique vise à orienter un écosystème dégradé vers une trajectoire de rétablissement qui permette son adaptation aux changements locaux et globaux, ainsi que la persistance et l'évolution de ses espèces constitutives. ❖ Le terme de restauration écologique est couramment utilisé pour désigner à la fois le processus et le résultat recherché pour un écosystème, mais les normes réservent le terme restauration à l'activité entreprise et celui de rétablissement au résultat visé ou atteint. ❖ Les Normes définissent la restauration écologique comme toute activité ayant pour objectif d'atteindre un rétablissement substantiel de l'écosystème par rapport à un modèle de référence approprié, indépendamment du temps nécessaire pour atteindre ce rétablissement.	**Objet:** S'intéresse aux écosystèmes dégradés. **Objectif :** Cible la récupération substantielle de l'écosystème par rapport à un modèle de référence (inspiré des écosystèmes indigènes). **Méthode :** Consiste en toute activité visant l'objectif ci-dessus quel que soit le pas de temps nécessaire pour atteindre la récupération complète. **NB :** Les auteurs mettent en garde sur la fréquente confusion sous le terme de "restauration" entre le processus de la restauration et le résultat de la restauration pour l'écosystème. Ils précisent que pour eux la restauration désigne l'activité/le processus tandis que la récupération substantielle de l'écosystème est le résultat/l'objectif de la restauration.	**NB :** Les stratégies d'intervention possibles ne sont pas présentées dès la définition de la restauration. Elles sont pour autant étudiées et approfondies dans la partie dédiée aux stratégies d'interventions

Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE, 2021) « Devenir la génération de la restauration : Restaurer les écosystèmes pour les populations, la nature et le climat.	❖ **Restauration des écosystèmes :** Processus consistant à stopper et inverser la dégradation des écosystèmes, entraînant une amélioration des services écosystémiques et un rétablissement de la biodiversité. ❖ La restauration des écosystèmes englobe un large éventail de pratiques, en fonction des conditions locales et des choix de société.	**Objet :** S'intéresse aux écosystèmes. **Objectif :** Cible l'amélioration des services écosystémiques et le rétablissement de la biodiversité. **Méthode :** Consiste en l'arrêt des dégradations et la réparation de leurs effets en passant par une variété de pratiques adaptées aux spécificités locales.	Evocation d'un large continuum de pratiques.
FAO, UICN CEM & SER (2021) : Principes pour la restauration des écosystèmes afin de guider la Décennie des Nations Unies 2021–2030	**Reprennent la définition générale de la restauration par l'UNEP (cf ci-dessus) et précisent certains principes à la base de la restauration des écosystèmes, notamment :** La restauration des écosystèmes englobe un large éventail d'activités visant à réparer des écosystèmes dégradés de toutes sortes. Les principales catégories d'activités de restauration comprennent : 1. la réduction des impacts environnementaux et sociétaux négatifs, tels que la pollution et l'utilisation ainsi que la gestion non durables des ressources ; 2. l'élimination des contaminants, des polluants et d'autres menaces, souvent désignée sous le terme de remédiation ;	La restauration des écosystèmes est caractérisée par : **Objet :** S'intéresse aux écosystèmes. **Objectif :** Cible la réparation des écosystèmes ayant subi des dégradations. **Méthode :** Consiste en une variété d'activités allant de la gestion des pollutions et des usages à la réhabilitation de fonctions/services écosystémiques.	Evocation d'un large continuum d'activités de restauration d'écosystème catégorisé comme suit : ✓ **Réduction des sources de pressions** (telles que la pollution et les usages non-durables de ressources). ✓ **Retrait d'un facteur de dégradation** désormais interne au site (e.g. dépollution) (concept rapproché du terme "remédiation").

	3. la réhabilitation des fonctions et services des écosystèmes dans des zones fortement modifiées, comme les anciens sites miniers et les systèmes de production dégradés ; 4. la restauration écologique, qui vise à éliminer la dégradation et à aider l'écosystème à retrouver la trajectoire qu'il aurait suivie si la dégradation n'avait pas eu lieu, tout en tenant compte des changements environnementaux.	❖ **La restauration écologique :** est ici considérée comme une catégorie d'action de restauration d'écosystème. Elle est caractérisée par : **Objet :** S'intéresse aux écosystèmes. **Objectif :** Cible le retour de l'écosystème sur sa trajectoire pré-détérioration tout en prenant en compte les changements environnementaux. **Méthode :** Consiste en la suppression des dégradations et l'assistance au rétablissement de l'écosystème.	✓ **Réhabilitation** des fonctionnalités de l'écosystème et des services écosystémiques d'un site fortement modifiés (par les anciens usages). ✓ **Restauration écologique** d'un écosystème dégradé en stoppant les dégradations et en assistant la récupération.

On constate un certain nombre de variations dans la définition de la restauration. D'une définition à l'autre, la restauration est un concept plus ou moins large, défini par des objets, objectifs et méthodes plus ou moins spécifiques :

- Selon les sources, **l'objet de la restauration** est l'écosystème dans son ensemble ou une partie seulement de ses composantes.
- **L'objectif de la restauration reste** cependant axé autour d'une notion de réparation d'écosystèmes ayant subi des dégradations. La restauration cible pour certaines sources à rétablir des écosystèmes fonctionnels, pour d'autres à ramener les écosystèmes sur leurs trajectoires historiques d'évolution, ou à tendre vers un état antérieur aux détériorations (considéré comme intact ou d'origine). L'écosystème dégradé est ainsi caractérisé par son éloignement d'un **état souhaitable** qui est pris comme **référence** et vers lequel la restauration doit le faire tendre. Certains auteurs approfondissent la question de l'objectif de la restauration en développant la notion de « référence ».

En termes de méthode, les définitions étudiées s'accordent globalement pour indiquer que la restauration consiste en des interventions pour amorcer ou assister la récupération des écosystèmes. Plusieurs définitions citées ci-dessus précisent la méthode de restauration en déclinant les formes de **stratégies d'interventions** que la restauration peut prendre. La plupart s'accordent sur le fond pour dire que la mise en oeuvre de la restauration peut se traduire par une intervention uniquement sur les causes de dégradation pour permettre la récupération naturelle, ou aller également jusqu'à des interventions sur les composantes de l'écosystème pour assister la réparation des effets des dégradations.

Lorsque des variations existent entre les définitions étudiées, on tranche en faveur des éléments cohérents avec le Règlement restauration ou avec l'interprétation de la SER (source prise comme référence par plusieurs auteurs).

Tableau 4: Synthèse de la caractérisation de la restauration sous le prisme objet-objectif-méthodes

Objet de la restauration	Ensemble des différentes composantes d'un écosystème ayant subi des dégradations
Objectif de la restauration	Récupération de l'écosystème (l'ensemble des composantes) en prenant comme référence un état qu'on souhaite rétablir ou atteindre. Cette référence se fonde sur un modèle d'écosystème intègre et fonctionnel dont on s'est éloigné en raison des dégradations.
Méthode de la restauration	Processus réparateur se traduisant par des interventions pour amorcer ou assister la récupération de l'écosystème (allant d'interventions pour limiter les pressions à un niveau suffisant pour permettre la récupération spontanée de l'écosystème, à des actions sur les composantes de l'écosystème pour assister sa récupération)

III.1.2.2.3.Définition de la restauration écologique retenue

- On constate des variations d'interprétation et de définition autour du concept de «restauration écologique».
- L'entrée en vigueur du Règlement de restauration invite donc à clarifier ce qu'est la restauration écologique afin d'éviter des erreurs ou incohérences dans l'interprétation des objectifs du Règlement et par conséquent dans sa mise en application.
- On propose de retenir une définition détaillée de la restauration qui soit:
  - **i.** En cohérence avec les principes posés dans le Règlement de restauration sans être spécifique à celui-ci dans le vocabulaire employé,
  - **ii.** En accord avec l'analyse de la littérature (Tableau n).

Au regard de ces éléments, on retient la définition suivante:

La **restauration écologique/restauration des écosystèmes :** est un processus intentionnel visant à permettre la récupération d'un écosystème ayant subi des dégradations et ciblant un état de référence. Cette référence, que l'on souhaite rétablir ou atteindre, est définie par un état approprié de l'ensemble des composantes de l'écosystème (biotiques, abiotiques et fonctionnelles) garantissant son intégrité à long terme.

L'écologie de la restauration est donc le processus scientifique qui consiste à stopper la dégradation et remette un écosystème dégradé sur sa **trajectoire** dynamique, en fonction de la capacité de **résilience** de l'écosystème.

La restauration d'un écosystème endommagé nécessite une bonne connaissance de l'écologie fonctionnelle et évolutive des écosystèmes ciblés, de l'histoire de la dégradation anthropique et, enfin, le choix d'un écosystème de référence pour guider la planification, la réalisation, le suivi et l'évaluation du projet de restauration. Un continuum d'interventions peut être mené selon le niveau de dégradation et ses causes :

a. les pressions ayant mené aux dégradations sont levées ou atténuées à un niveau permettant la récupération naturelle de l'écosystème, et
b. (ii) si l'intervention sur les pressions en cause ne suffit pas au regard de l'objectif de restauration, des interventions sur les composantes de l'écosystème dégradé peuvent être envisagées pour assister voire accélérer sa récupération.

III.1.2.3.Différentes stratégies d'intervention de restauration écologique

III.1.2.3.1.Analyse des catégories existantes pour qualifier les stratégies d'intervention

III.1.2.3.1.1. Restauration passive et restauration active

- Historiquement, la catégorisation des stratégies d'intervention de la restauration a été dominée par une dichotomie entre des stratégies de restauration dite « passive » ou « active » (Jones *et al*. 2018 ; Atkinson & Bonser 2020 ; Krishnan & Osuri 2023).
- Certaines des définitions étudiées en partie 2.2.2 (Tableau 4) font effectivement référence à ces catégories, voire en donnent des éléments de définition.
- Les définitions de la restauration proposées dans le cadre du Règlement restauration précisent également que le processus de la restauration peut consister à « activement ou passivement assister la récupération ».
- Pour définir la restauration passive (parfois appelée «récupération passive») et active, on s'appuit sur ces éléments ainsi que sur les méta-analyses suivantes, qui s'intéressent en particulier aux catégorisations des stratégies de restauration.

Tableau 5: Analyse des définitions des stratégies d'intervention de restauration passive et active provenant de publications scientifiques sur la restauration écologique (méta-analyses)

Source (méta-analyses)	**Extrait explicitant les stratégies de restauration passive et active**	**Eléments de définition retenus de l'extrait présenté**
Jones et al. (2018) :**«**Restauration et réparation des écosystèmes endommagés de la Terre **»**	« Des actions visant à mettre fin à la perturbation, que nous définissons comme une **récupération passive**, et des [actions] visant à **accroître la vitesse et l'ampleur de la récupération** des écosystèmes dégradés une fois la perturbation terminée, que nous appelons **restauration active**. »	▪ **Récupération passive :** actions pour mettre fin aux perturbations. ▪ **Restauration active :** après que les perturbations ont cessé, actions pour augmenter la vitesse et l'étendue de la récupération de l'écosystème.
Krishnan & Osuri (2023) : « Au-delà de la dichotomie passive–active : aligner la recherche sur le cadre de continuum d'intervention en restauration écologique »	« La restauration écologique a traditionnellement été présentée comme une **dichotomie : passive ou active**. La **restauration passive** fait référence à des stratégies reposant principalement sur la récupération naturelle des écosystèmes après le retrait ou l'atténuation des sources de dégradation, avec **une intervention humaine directe minimale** (Chazdon & Uriarte, 2016 ; Atkinson & Bonser, 2020). En revanche, la **restauration active** utilise diverses **interventions directes**, impliquant la gestion des habitats et/ou **l'introduction (ou l'élimination) d'espèces**, dans le but de surmonter les obstacles et d'**accélérer la récupération naturelle** (Holl & Aide, 2011). »	▪ **Restauration passive :** suppression ou limitation des sources de dégradation puis récupération naturelle de l'écosystème. Les interventions humaines directes (sur l'écosystème) sont minimales. ▪ **Restauration active :** intervention directe sur l'écosystème pour accélérer ou permettre la récupération. **NB:** Il est à noter que Krishnan & Osuri redéfinissent la restauration passive et active pour mieux critiquer cette dichotomie.

En reprenant ces principes communs, on retient les définitions suivantes de ces deux catégories de stratégies :

i. **La restauration passive:** C'est une stratégie d'intervention consistant à réduire ou supprimer les sources de dégradation en agissant sur les activités engendrant les pressions, puis à laisser l'écosystème évoluer spontanément vers la récupération. Cette stratégie se base sur la capacité de l'écosystème dégradé à exprimer sa résilience une fois que les pressions à l'origine des dégradations ont été levées ou diminuées.
   - ✓ **Le terme passif** renvoie au fait de laisser l'écosystème se rétablir naturellement une fois les pressions levées.

ii. **La restauration active:** C'est une stratégie d'intervention consistant à réduire ou supprimer les sources de dégradation en agissant sur les activités engendrant les pressions, puis à intervenir directement sur l'écosystème dégradé pour assister sa récupération. Cette stratégie implique ainsi des interventions sur les composantes de l'écosystème pour guider voire accélérer la récupération de leurs fonctionnalités une fois que les pressions à l'origine des dégradations ont été levées ou diminuées. Ces interventions portent sur les composantes de l'écosystème dégradé.
   - ✓ **Le terme actif** renvoie au fait d'assister le rétablissement de l'écosystème une fois les pressions levées.

Dans les deux cas, des actions sont mises en oeuvre (au minimum des actions de gestion avec suppression ou mitigation des pressions), la distinction se réfère donc au fait d'intervenir ou non sur le processus de récupération de l'écosystème.

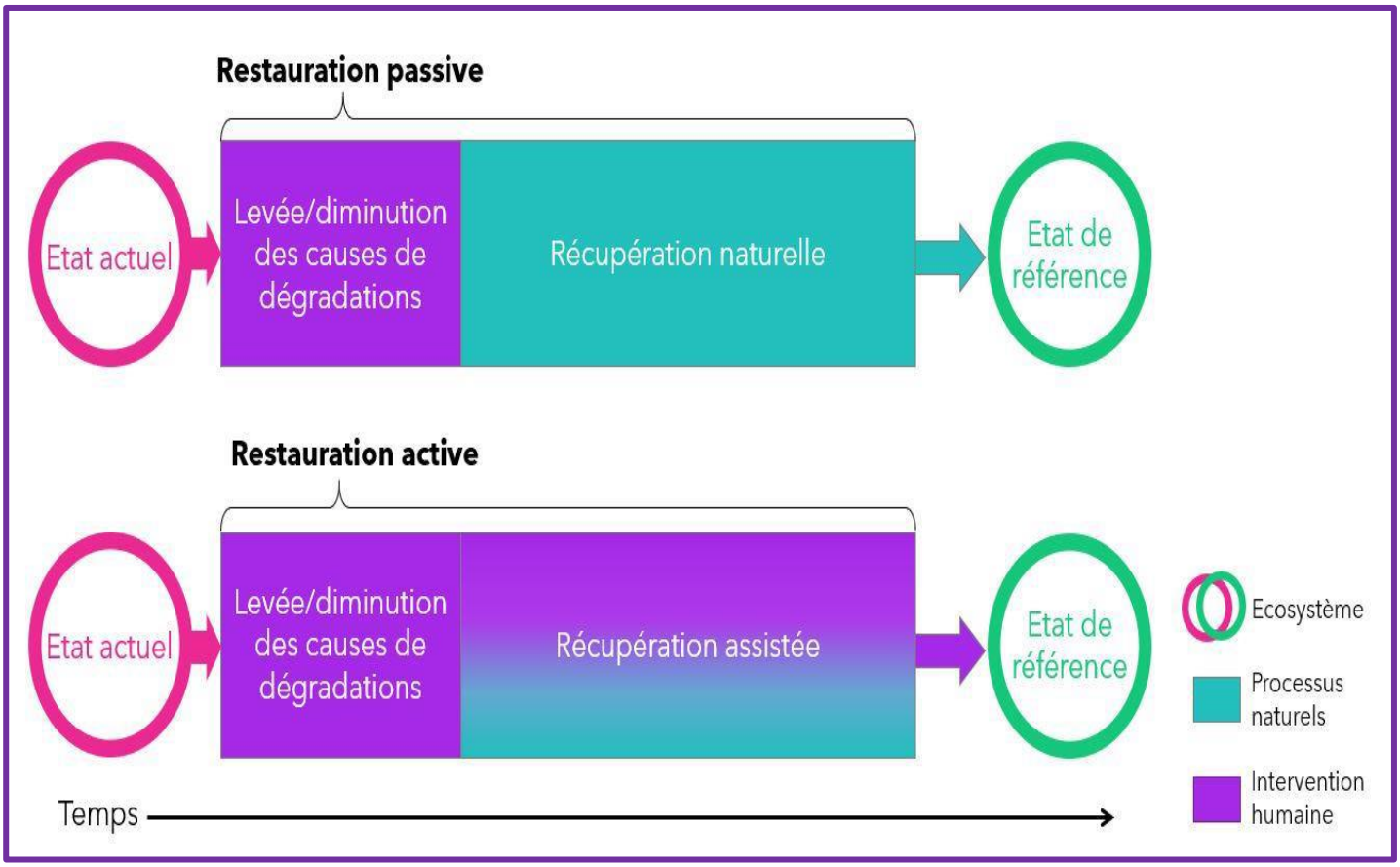


Figure 1: Comparaison des processus de restauration impliqués selon le choix d'une stratégie d'intervention de restauration passive ou active

III.1.2.3.1.2. Critique de la catégorisation passif/actif

- Bien que les catégories passif/actif soient encore couramment utilisées, elles ne font pas l'unanimité et sont remises en question par certains auteurs (Atkinson & Bonser 2020 ; Chazdon *et al.* 2021. ; Krishnan & Osuri 2023).
- Les critiques s'articulent autour de la non-représentativité de la diversité des stratégies de restauration et sur l'influence de la tournure dichotomique de ces catégories (binarité entre les termes opposés « passif » et « actif »).

- Plusieurs auteurs estiment que cette catégorisation est mal définie, porte à confusion et semble opposer des stratégies de restauration incompatibles alors que celles-ci devraient être complémentaires (Atkinson & Bonser 2020 ; Chazdon *et al.* 2021; Krishnan & Osuri 2023).
- L'appellation de « restauration passive » pose particulièrement problème car le terme de « passif » peut être perçu péjorativement comme « ne rien faire », alors même que la restauration passive doit impliquer des prises de décision et actions de gestion ou politiques effectives pour agir sur les causes de dégradation. Le terme de «restauration naturelle» est alors considéré comme plus adapté à ce qu'on cherche à décrire (Chazdon *et al.* 2021).
- Le risque engendré par la dichotomie est celui d'une focalisation sur ce qui serait qualifié de «restauration active» aux dépens de la considération de la restauration «passive». En effet, au-delà même de la connotation des termes passif/actif, il est plus valorisé d'intervenir pour «réparer» l'écosystème que pour stopper sa dégradation ou les obstacles à son rétablissement spontané (Chazdon *et al.* 2021).

III.1.2.3.1.3.Propositions alternatives pour décrire les stratégies d'intervention de restauration

Différentes publications soulignent l'intérêt de dépasser cette distinction passif-actif et d'y préférer des catégories de stratégies d'intervention, ou un «cadre de continuum» de stratégies, qui soient plus adaptées pour décrire les mesures de restauration selon l'intensité de l'intervention (Atkinson & Bonser 2020 ; Chazdon *et al.* 2021 ; Krishnan & Osuri 2023). Des alternatives sont proposées :

i. Restauration naturelle, assistée et reconstructive

Une proposition alternative pour catégoriser les stratégies d'intervention consiste en la déclinaison de trois catégories de restauration. Pour qualifier ces approches, Gann *et al.* (2019) emploient les termes de « régénération naturelle, régénération assistée et reconstruction » ce qu'Atkinson & Bonser (2020) reprennent en les nommant « restauration naturelle, assistée, reconstructive ». Pour souligner qu'il s'agit bien ici de stratégies d'intervention de restauration écologique, on favorise la nomenclature d'Atkinson & Bonser (2020). Ces trois stratégies se distinguent par un niveau d'intervention croissant :

- **La restauration naturelle (ou régénération naturelle)**: C'est une stratégie d'intervention consistant à réduire ou supprimer les sources de dégradation en agissant sur les activités engendrant les pressions puis à laisser l'écosystème récupérer spontanément.
- **La restauration assistée (ou régénération assistée):** C'est une stratégie d'intervention consistant à réduire ou supprimer les sources de dégradation en agissant sur les activités engendrant les pressions et à intervenir sur les composantes abiotiques et biotiques de l'écosystème.
- **La restauration reconstructive (ou reconstruction)**:C'est une stratégie d'intervention consistant à réduire ou supprimer les sources de dégradation en agissant sur les activités engendrant les pressions et à intervenir sur les composantes abiotiques et biotiques de l'écosystème en ayant recours à la

réintroduction d'une proportion importante des cortèges d'espèces (du biote) (Gann *et al.* 2019 et Atkinson & Bonser, 2020).

ii. Continuum de pratiques allant du rétablissement naturel au rétablissement intensément assisté (Chazdon et al.,2021)

Chazdon *et al*. (2021) considèrent que la description des stratégies d'intervention par un continuum serait plus adaptée car chaque stratégie est propre à l'écosystème considéré, celui-ci présentant des processus de dégradation et une résilience lui étant spécifiques. Les auteurs proposent de jalonner ce continuum par les catégories suivantes:**restauration naturelle/non-assistée, restauration légèrement assistée, restauration modérément assistée, restauration intensément assistée**. Les auteurs rapprochent la « restauration naturelle/non-assistée » du concept de « restauration passive », la « restauration légèrement assistée » de la « restauration assistée », et les stratégies de restauration « modérément assistée » et « intensément assistée » du concept de « restauration active ». Ils précisent également que ces stratégies ne sont pas mutuellement exclusives.

- **La restauration naturelle ou non-assistée (ou récupération naturelle /non-assistée)**:C'est un niveau d'intervention impliquant la réduction ou suppression des sources de dégradation en agissant sur les activités engendrant les pressions et s'accompagnant d'une surveillance de la trajectoire de restauration.
- **La restauration légèrement assistée (ou récupération légèrement assistée):** C'est un niveau d'intervention impliquant d'agir sur les cortèges d'espèces : actions pour protéger l'écosystème contre les espèces empêchant sa récupération ou actions pour assister la colonisation d'espèces structurantes (par exemple pour enrichir la population ou favoriser la dispersion).
- **La restauration modérément assistée (ou récupération modérément assistée):** C'est un niveau d'intervention impliquant par exemple des plantations avec gestion du substrat, un transfert de semences récoltées, l'implantation du biote désiré, l'enlèvement de cortèges d'espèces modifiant la structure de l'écosystème de référence, le contrôle des espèces invasives ou non-indigènes, la restauration de l'hydrologie appropriée, la suppression ou modification des ouvrages en dur entravant le milieu ou la continuité du milieu.
- **La restauration intensément assistée (ou récupération intensément assistée):** C'est un niveau d'intervention impliquant des actions majeures : sur le substrat, hydrologiques, de migration assistée, translocation de substrat ou de biote, préparation intensive d'un site.

III.1.2.3.2. Etat de l'écosystème à restaurer et choix du niveau d'intervention

- Si la restauration vise le retour de l'écosystème à un état de référence, l'état actuel dans lequel se trouve l'écosystème dégradé que l'on souhaite restaurer (et donc sa distance à l'état de référence) doit lui aussi être pris en compte dans le projet de restauration.
- Selon son état, un écosystème sera plus ou moins résilient face à des pressions. De plus, si l'intensité des pressions est trop élevée, que la proportion de l'écosystème impactée est trop importante ou que ces perturbations sont trop fréquentes, l'écosystème peut dépasser un seuil de dégradation entrainant sa transformation et la perte de ses capacités de récupération naturelle (seuil d'irréversibilité). Il ne pourra alors pas revenir à sa trajectoire d'évolution antérieure même si les pressions sont levées car ses mécanismes naturels de récupération ne s'expriment plus (Keenleyside *et al*. 2013 ; Lenfant *et al*. 2015).
- Le passage d'un tel « seuil de non-retour », qualifié de transition catastrophique est caractérisé par le basculement brutal de l'écosystème dans un état alternatif stable, différant souvent drastiquement de l'écosystème initial tant en termes de structure que de fonctions.
- La difficulté à inverser cette transition (pour revenir à l'ancien état d'équilibre) malgré un retour à des conditions environnementales même très favorables est un phénomène qualifié d'hystérésis (Kéfi 2012 ; Jones *et al.* 2018).

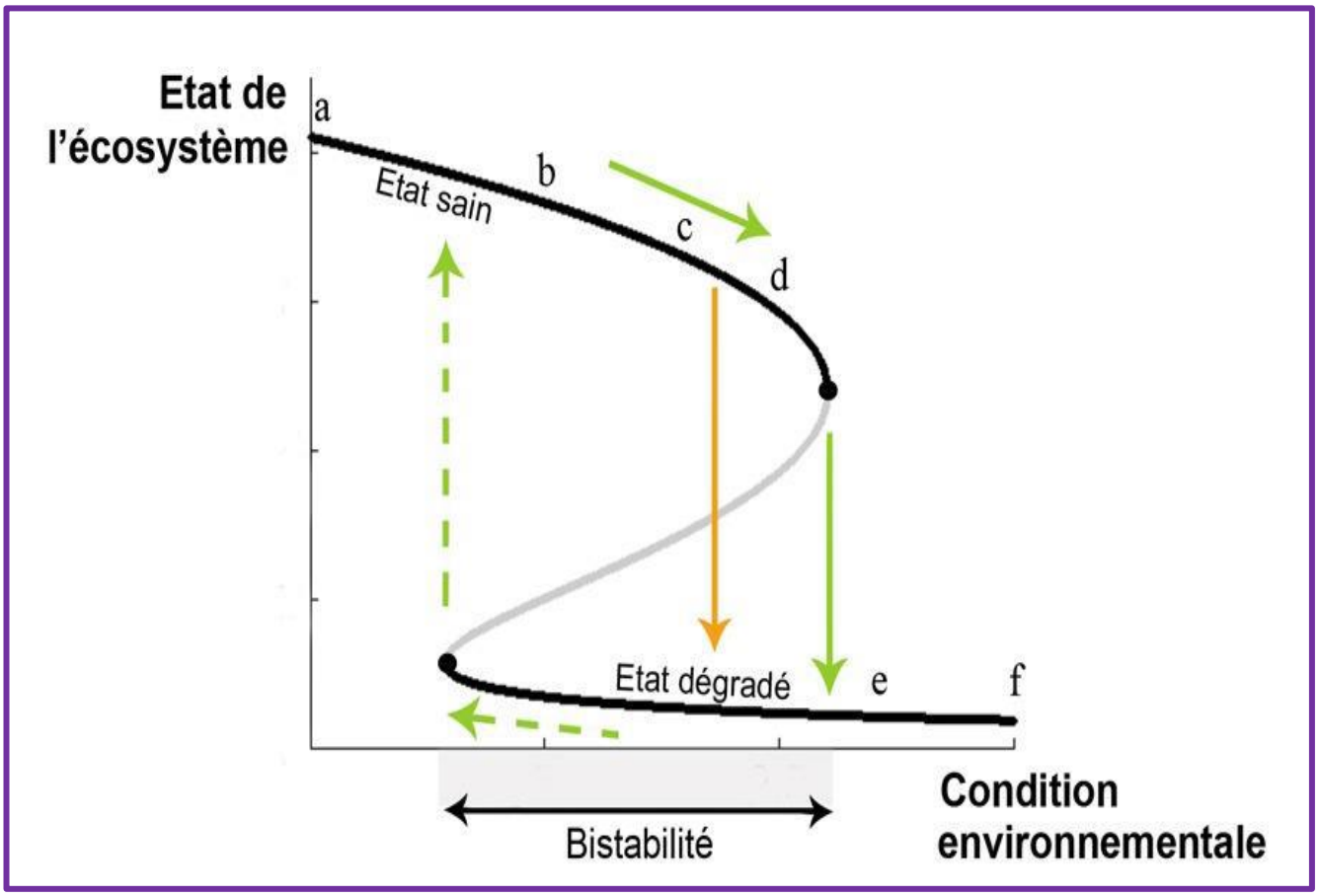


Figure 2: Transition catastrophique et bistabilité (Kéfi 2012).

- De «a» à «d» l'état de l'écosystème se dégrade de façon continue avec l'évolution des conditions environnementales (l'axe des conditions environnementales allant de conditions favorables à gauche à des conditions défavorables à droite) puis une transition catastrophique se produit de «d» à «e», causant une forte dégradation de l'état de l'écosystème.
- L'état dégradé est un nouvel d'équilibre et l'hystérésis se traduit par l'absence de retour à un état sain, malgré le retour à des conditions environnementales favorables.
- Si une telle transition catastrophique a eu lieu, les stratégies de restauration n'ayant recours qu'à des interventions de levée de pression (stratégies de restauration dite «passive», «naturelle» ou «non-assistée») ne permettront donc pas d'inverser le phénomène pour atteindre un état de référence fondé sur l'ancien équilibre.
- Face à un tel basculement, si on considère que le retour à l'équilibre antérieur de l'écosystème est souhaitable, il est possible d'envisager que des interventions directes sur les composantes de l'écosystème puissent permettre le franchissement des barrières biotiques ou abiotiques rendant stable le nouvel état de l'écosystème (Keenleyside *et al*. 2013 ; Alsuwaiyan *et al.* 2022).
- Le choix de la stratégie de restauration à adopter doit donc reposer sur une bonne compréhension des phénomènes naturels de récupération et de la dynamique générale de l'écosystème considéré.
- Cette compréhension doit permettre d'estimer le niveau de résilience de l'écosystème actuel et d'identifier les freins au rétablissement (les causes de dégradation, mais également leurs conséquences qui entretiennent l'incapacité du milieu à se rétablir).
- Le niveau d'intervention sera donc adapté en déterminant la nécessité ou non d'intervenir sur les composantes biotique et/ou abiotiques de l'écosystème (Gann *et al*. 2019 ; Chazdon *et al.* 2021).
- Pour surmonter l'hystérésis, le recours à des stratégies de restauration plus interventionnistes pourrait ainsi être complémentaire de projets basés sur des stratégies de restauration «passive» ou «naturelle» (Jones *et al.* 2018).
- A ce stade, d'avantage d'études comparatives *in situ* sont cependant nécessaires pour mesurer les effets des stratégies plus ou moins interventionnistes sur un même site (Jones *et al.* 2018).

III.1.2.4. Restauration et concepts proches

III.1.2.4.1. Objectif de la restauration

- La restauration écologique part du constat que l'évolution d'un écosystème a été perturbée par des dégradations qui l'ont éloigné d'une expression favorable de l'ensemble de ses composantes.
- L'objectif de la restauration consiste alors en la récupération de l'écosystème dégradé, jusqu'à un état souhaité que l'on prend donc comme référence.
- Les objectifs de restauration sont le plus souvent représentés par une communauté végétale de référence ou cible qui guide les pratiques de restauration (Matthews and Spyreas, 2010). Cette approche suppose implicitement qu'après le

rétablissement de conditions abiotiques appropriées, une communauté s'orientera vers un état cible fixe (Matthews and Spyreas, 2010), conformément au concept classique de succession (Clements 1916 ; Helsen 2013). Cependant, différents paramètres biotiques interviennent, au même titre que les paramètres abiotiques, dans l'assemblage des communautés (Keddy, 1992).

III.1.2.4.2. Notion d'écosystème de référence

- Le concept de «référence» a ainsi été développé par plusieurs auteurs, notamment à travers les notions d'état de référence ou d'écosystème de référence.
- Selon les auteurs, les expressions de «état de référence» ou «écosystème de référence», voire «modèle de référence» ou simplement «référence», peuvent être employées.

Tableau 6: Définitions autour du concept de «référence» en restauration

Sources	Concept utilisé pour parler d'une «référence» et définition associée
Le Floc'h & Aronson, 1993	▪ **Écosystème de référence:** c'est la norme de référence à partir de laquelle un projet de restauration va être comparé et évalué pour décrire la cible et évaluer le succès relatif d'une opération de restauration, de réhabilitation ou de gestion raisonnée ».
SER, 2004	▪ **Écosystème de référence (ou référence) :**Un écosystème de référence ou référence sert de modèle pour la planification d'un projet de restauration et, plus tard, pour son évaluation. Dans sa forme la plus simple, la référence est un site réel, sa description écrite, ou les deux. ▪ Le problème d'une **référence** simple est qu'elle représente un seul état ou une seule expression des attributs d'un écosystème. ▪ **La référence choisie** aurait pu se manifester sous l'une des nombreuses formes potentielles qui se situent dans la plage historique de variation de cet écosystème. ▪ **La référence** reflète une combinaison particulière d'événements stochastiques (aléatoires) survenus au cours du développement de l'écosystème. ▪ De la même manière, un écosystème en cours de restauration peut évoluer vers n'importe lequel des nombreux états potentiels. Tout état exprimé est acceptable comme résultat de la restauration, tant qu'il est comparable à l'un des états dans lequel son écosystème de référence aurait pu évoluer. ▪ En général, **la référence** représente un point de développement avancé situé quelque part le long de la trajectoire visée de la restauration. En d'autres termes, l'écosystème restauré est censé, à terme, imiter les attributs de la référence, et les objectifs et stratégies du projet sont élaborés en fonction de cette attente
Lenfant *et al*. 2015	▪ **Écosystème de référence :** L'écosystème de référence est défini par Aronson *et al*. (1993a,b); Le Floc'h *et al*. (1995) et SER (2004) comme une approximation de l'état souhaitable, une norme choisie parmi plusieurs états alternatifs possibles et accessibles par une succession d'étapes appelées trajectoires. ▪ **L'écosystème de référence** va donc être l'objectif final vers lequel on souhaite tendre.
Chenot, 2018	▪ **Écosystème de référence ou état de référence:** L'écologie de la restauration se base sur un concept important : celui de l'écosystème de

	référence, modèle représentant l'objectif de la restauration (Balaguer *et al*. 2014). ▪ **L'écosystème de référence** aide à planifier, suivre et évaluer les travaux de restauration écologique (McDonald *et al*. 2016). ▪ **Le modèle de référence historique** peut être défini comme un état original antérieur à une perturbation anthropique (Hall, 2005) et ce, avant que le système écologique en question ne franchisse un ou plusieurs seuils écologiques irréversibles (Aronson *et al*. 1993, 1995 ; Hobbs *et al*. 2009). ▪ Dans certains cas il peut être basé sur un modèle ajusté au besoin qui ne correspond pas forcément à l'écosystème historique mais qui permet d'optimiser le potentiel de rétablissement des espèces et des communautés locales afin qu'elles continuent à s'assembler, s'adapter et à évoluer (McDonald *et al*. 2016). « il n'existe pas un seul type d'état de référence, tout dépend de l'échelle temporelle ciblée et des facteurs anthropiques acceptés comme faisant partie de l'évolution des écosystèmes »
Gann *et al* 2019	▪ **Écosystème de référence ou modèle de référence:** Représentation d'un écosystème indigène qui constitue la cible de la restauration écologique (à distinguer d'un simple site de référence). ▪ **Un écosystème de référence**: représente généralement une version non dégradée de l'écosystème, comprenant sa flore, sa faune, et autres organismes vivants, ses éléments abiotiques, ses fonctions, processus, et états de succession qui auraient pu exister sur le site de restauration en l'absence de dégradation, ajustée pour prendre en compte les conditions environnementales modifiées ou prévues. ▪ **Des modèles de référence** appropriés pour la restauration écologique ne consistent pas à figer une communauté écologique à un moment précis du passé, mais plutôt à accroître le potentiel pour que les espèces et communautés indigènes se rétablissent, continuent de se réassembler, s'adapter et évoluer.

- **L'état de référence est** donc une représentation d'un état que l'on souhaite rétablir ou atteindre à l'issue du processus de restauration, choisi parmi plusieurs états alternatifs possibles. Cette référence est une description de l'écosystème tel qu'il pourrait s'exprimer en l'absence de dégradations, dans un état que l'on estime plus favorable pour la biodiversité que l'état actuel, considéré comme dégradé. Gann *et al*. (2019) considèrent que la référence peut être caractérisée par six attributs écosystémiques clés qui, lorsqu'ils sont dans un état approprié, participent à l'intégrité d'ensemble de l'écosystème: l'absence de menaces, les conditions environnementales physiques, la composition spécifique, la diversité structurelle, les fonctions écosystémiques et les échanges externes.
- **L'écosystème de référence, propre à chaque projet de restauration**, peut être défini par un état antérieur aux perturbations. Pour autant, les dégradations occasionnées par ces perturbations ne sont pas toujours ponctuelles ou délimitées dans le temps.
- Les lacunes de connaissances historiques peuvent également limiter la description précise d'un état antérieur. Enfin, le retour à cet état antérieur peut être impossible, en raison par exemple d'évolutions irréversibles des conditions environnementales.
- La référence peut être de deux natures différentes:

- ✓ Lorsque des données historiques existent, la référence peut être construite à partir de ces informations (Falk et al., 2006; Wagner et al., 2000). Les informations collectées pour définir cet état historique concernent les composantes biotiques et abiotiques avant la perturbation, collectées à partir de différentes sources d'informations disponibles (relevés, comptes-rendus, cartographies ou encore photographies) (Andel and Aronson, 2012).
- ✓ Si les données historiques ne sont pas accessibles, alors la référence peut être identifiée parmi les écosystèmes déjà existants et environnants à l'écosystème à restaurer présentant une dynamique et un fonctionnement souhaités similaires à ce qui est attendu (Clewell et al., 2013). C'est-à-dire que la référence peut être construite en s'appuyant sur l'état d'un site témoin semblable dans ses composantes au site à restaurer, mais considéré comme intact ou très faiblement impacté (intègre) par rapport à ce dernier.
- ✓ La littérature et l'expertise peuvent également être utilisées pour caractériser le meilleur état qu'il est possible d'atteindre tout en considérant les spécificités du site (Lake 2001 ; Maciejewski *et al*. 2016 ; Gann *et al*. 2019).

❖ Une référence est meilleure lorsqu'elle est représentée par une multitude de sites de référence et, si nécessaire, par d'autres sources. Cette description composite permet de donner une base plus réaliste à la planification de la restauration. Les sources d'information qui peuvent être utilisées dans la description de la référence comprennent :

- les descriptions écologiques, les listes d'espèces et les cartes du site du projet antérieures aux dégradations ;
- les photographies aériennes anciennes et récentes et celles au niveau du sol ;
- les vestiges du site qui restent à restaurer, indiquant les conditions physiques et le biote antérieurs ;
- les descriptions écologiques et les listes d'espèces d'écosystèmes similaires intacts ;
- les spécimens des herbiers et les musées ;
- les comptes rendus historiques et les histoires orales par des personnes familières avec le site du projet antérieur aux dégradations ;
- les données paléo-écologiques, comme les pollens de fossiles, les charbons, l'histoire des cernes des arbres, les fumiers de rongeurs ;

❖ **On retient que l'état de référence (ou « écosystème de référence » ou « modèle de référence »)** est une représentation d'un état que l'on souhaite rétablir ou atteindre à l'issue du processus de restauration, choisi parmi plusieurs états alternatifs possibles.

❖ Cette référence est une description de l'écosystème tel qu'il pourrait s'exprimer en l'absence de dégradations et dans un état que l'on estime plus favorable pour la biodiversité que l'état actuel, considéré comme dégradé.

❖ Elle est définie par un état approprié de l'ensemble des composantes de l'écosystème (biotiques, abiotiques et fonctionnelles) garantissant son intégrité à long terme.

❖ **Une fois que la référence déterminée**, elle sert à planifier le projet de restauration et permet d'évaluer l'avancement et l'aboutissement du projet (Le Floc'h & Aronson 1995 ; SER 2004 ; Chenot 2018). l'objectif est que l'écosystème

dégradé suive une trajectoire vers cet état. La trajectoire inclut tous les états stables alternatifs que l'écosystème peut prendre et ces étapes doivent être prises en considération pour orienter la construction du schéma de restauration pour atteindre la référence.

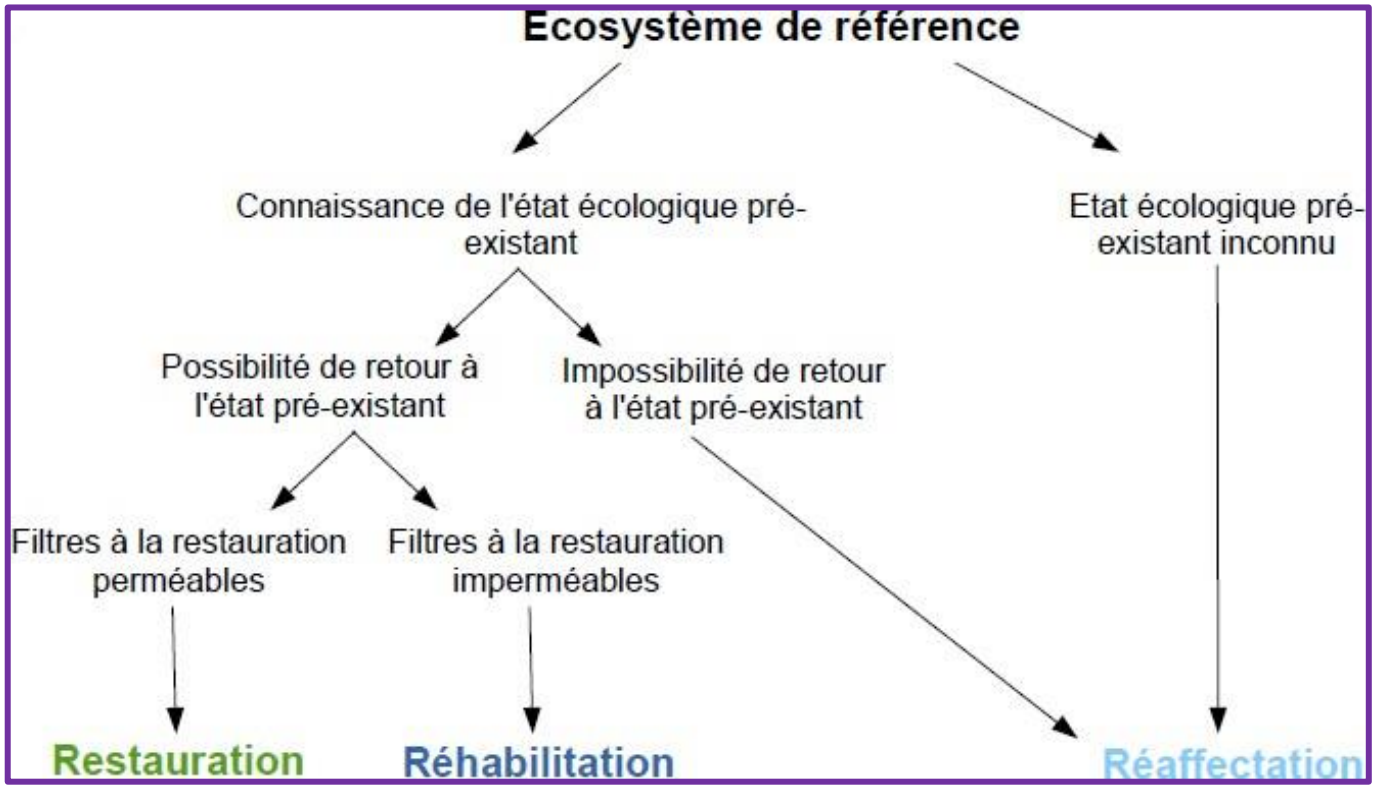


Figure 3 : Ecosystème de référence.

III.1.2.4.3. Non-détérioration

- Viser la non-détérioration d'un écosystème implique, quel que soit son état initial, de mettre en place des mesures préventives pour s'assurer que l'écosystème n'est pas soumis à des pressions auxquelles il est sensible et dépassant son seuil de tolérance à ces pressions.
- Considérant que la restauration implique de stopper ou limiter des pressions, des mesures similaires peuvent donc être mises en oeuvre dans le cadre de la restauration et de la non-détérioration.
- La non-détérioration d'un habitat implique que les paramètres évalués pour qualifier son état ne se dégradent pas au cours du temps, donc de constater que la tendance d'évolution de ces paramètres est au minimum stable.
- Plus ambitieuse, la restauration vise à assister ou initier la récupération de l'écosystème, donc à améliorer l'état de ses composantes (tendance d'évolution positive). Ce n'est donc pas en termes de type d'actions mises en oeuvre que se distinguent ces deux concepts mais en termes d'objectifs visés.

III.1.2.4.4. Remédiation

- **La remédiation est une activité de gestion consistant** à éliminer ou réduire la pollution physique ou chimique d'un site (e.g. élimination ou détoxification des contaminants ou des nutriments en excès dans le substrat, les sédiments, l'eau) (Gann *et al*. 2019).
- La remédiation ne vise pas un retour de l'écosystème à un état spécifique ou une intégrité passée, mais seulement à supprimer les sources de dégradation. C'est un objectif de moyens, à la différence de la restauration dont l'objectif de résultat est la récupération de l'écosystème pour atteindre un état de référence.

III.1.2.4.5. Réhabilitation

- **La réhabilitation est** un processus visant à rétablir certaines fonctions spécifiques d'un écosystème dégradé (Le Floc'h & Aronson, 1995 ; Gann *et al*., 2019), à rétablir certains processus, la productivité et certains services de l'écosystème (SER,2004).
- **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.
- **La réhabilitation** concerne des écosystèmes ayant subi des dégradations plus importantes et pour lesquels les seuils d'irréversibilité biotique voire abiotique ont été franchis**.**
- **L'objectif de la réhabilitation est d'améliorer ou de rétablir** certains processus ou certaines fonctions avec pour modèle l'état de l'écosystème précédent la dégradation. Des interventions influençant l'environnement physique, telles que la réduction de l'érosion, l'amélioration des ressources du sol ou un remodelage du relief, sont alors mises en oeuvre afin de réparer les sites dégrades (Whisenant, 2002).Ces interventions permettent parfois le retour à l'écosystème d'origine mais aboutissent le plus souvent à un état alternatif.
- **Réhabilitation et restauration** ont en commun de viser l'amélioration d'un site ayant subi des dégradations (Le Floc'h & Aronson 1995) mais diffèrent donc dans l'ambition de leurs objectifs, la restauration visant une récupération de l'écosystème dans son ensemble tandis que la réhabilitation est focalisée sur une partie spécifique des composantes de l'écosystème (à savoir les fonctions qu'il assure).
- La réhabilitation est alors moins contraignante que la restauration et peut par exemple viser uniquement certaines espèces à la base de fonctions écologiques pouvant être assurées par le milieu (Lenfant *et al*. 2015).
- Réhabilitation et restauration peuvent avoir recours à des stratégies similaires (Lake 2001), mais diffèrent en termes de ce qu'elles visent à obtenir à l'issue de la mise en oeuvre de ces mesures.
- Cette différence d'ambition peut être liée aux priorités des acteurs à l'origine du projet : là où la restauration écologique est une réponse à une recherche d'intégrité écologique, la réhabilitation peut être motivée par des intérêts socio-

économiques tels que retrouver la productivité d'un écosystème (Lenfant *et al*. 2015 ; Atkinson & Bonser 2020).

- La distinction entre ces deux concepts n'est pas toujours faite et des projets de réhabilitation, pourtant moins ambitieux que des projets de restauration, sont ainsi souvent qualifiés de restauration malgré la non prise en compte de l'ensemble des composantes de l'écosystème (SER,2004 ; Lenfant *et al*., 2015).

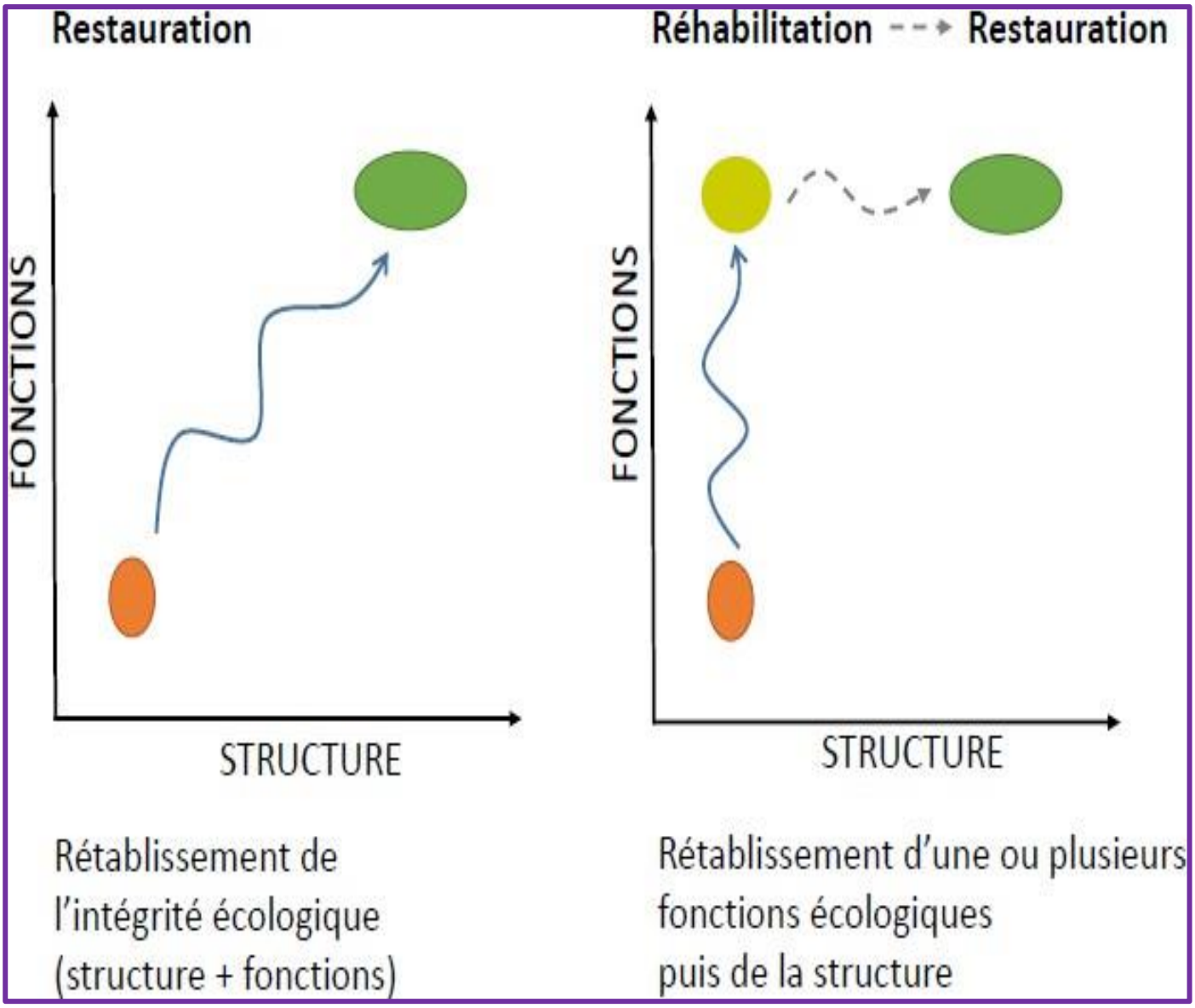


Figure 4 : Processus de réhabilitation d'un écosystème

III.1.2.4.6. Seuil d'irréversibilité

- **Le seuil d'irréversibilité** est le point critique au-delà duquel un écosystème ne peut plus revenir à son état antérieur, même avec une intervention humaine. Les processus de dégradation deviennent alors permanents ou conduisent à un nouvel état stable différent. Il s'agit d'une limite au-delà de laquelle les perturbations externes ne peuvent plus être absorbées par l'écosystème et où l'équilibre existant est rompu.

- **Le seuil d'irréversibilité** est un point critique où un écosystème ou une ressource naturelle subit un changement de régime ou une transition d'un état stable à un autre. Ce concept est étroitement lié à **la résilience de l'écosystème**, qui est sa capacité à supporter des perturbations et à revenir à son état initial. Au-delà du seuil d'irréversibilité, la résilience de l'écosystème est dépassée, et il ne peut plus se rétablir.
- **Changement irréversible:** Une fois le seuil d'irréversibilité dépassé, l'écosystème est transformé, souvent de manière irréversible. Un nouvel équilibre peut se créer, mais il peut être différent de l'état initial, et la capacité de l'écosystème à revenir en arrière est réduite.
- **Causes du dépassement du seuil:** Ce seuil peut être atteint par divers facteurs, notamment des événements climatiques extrêmes, des pollutions, des invasions biologiques, ou l'exploitation excessive des ressources naturelles. **Exemple:** La déforestation excessive peut, par exemple, conduire à un écosystème désertique, où le retour à un état forestier est impossible.

III.1.2.4.7. Réaffectation ou Réallocation

- **La réaffectation** est une autre sorte de réponse à la dégradation d'un écosystème, en réaffectant un espace à un autre usage pour lequel aucune référence historique n'est requise.
- La réaffectation décrit les interventions sur des écosystèmes très fortement dégradés pour lesquels la récupération de la structure et des fonctions de l'écosystème d'origine est impossible. Elle consiste à intervenir sur un écosystème pour le transformer afin qu'il assure un nouvel usage. Le milieu transformé peut être,en termes de structures ou de fonctions, complètement différent de l'écosystème préexistant (LeFloc'h & Aronson, 1995).
- L'objectif peut être de «renaturer» le site pour en faire une zone de loisir, ou simplement d'assurer la stabilité et la sécurité du site (Aronson et al.1993,1995).

Au contraire de la restauration, et même de la réhabilitation,la réaffectation ne vise donc pas la récupération de l'écosystème dégradé ou perdu, ni de ses fonctions mais l'établissement d'un nouvel écosystème choisi pour répondre à des intérêts anthropocentrés. Ce type d'action peut être mené lorsque l'écosystème est jugé trop dégradé pour envisager son rétablissement, même fonctionnel (Aronson et al. 1995 ; Lenfant et al.2015) mais peut également qualifier la transformation volontaire d'un écosystème non dégradé (e.g. mise en culture d'un espace) (Le Floc'h & Aronson 1995).

- La réaffectation décrit ce qui se passe lorsqu'un nouvel usage apparaît. Lorsque l'action de l'homme est permanente il s'agit également de réaffectation. Par exemple lorsque les apports d'intrants sous forme d'énergie d'eau ou de fertilisants sont permanents. La réaffectation peut être appliquée à un écosystème quel que soit son état.

Figure 5 : Réaffectation des écosystèmes

III.1.2.4.8.Articulation entre restauration, réhabilitation et réaffectation selon le degré de dégradation de l'écosystème

Lenfant *et al*. (2015) proposent le schéma suivant (Figure 4) pour résumer la possible articulation entre certains des concepts définis ci-dessus. Ils soulignent ainsi que le choix de l'action à mettre en oeuvre doit prendre en compte à la fois l'état de l'écosystème considéré et l'état que l'on souhaite atteindre à l'issue du processus. Ils précisent également le niveau de gestion nécessaire à l'issue du processus pour maintenir l'écosystème en l'état.

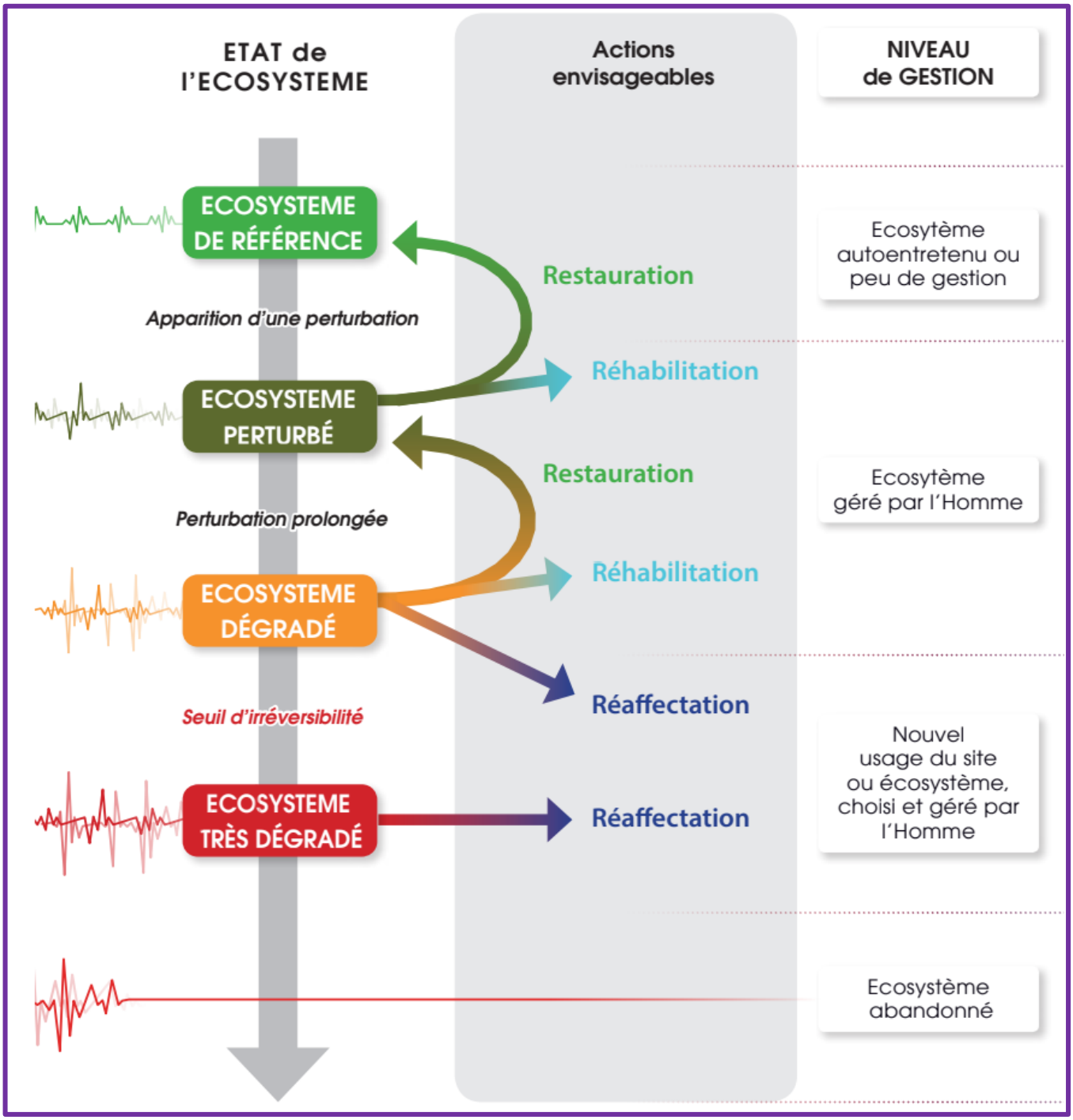


Figure 6: Classement des actions envisageables sur l'écosystème en prenant en compte son niveau de dégradation et les objectifs de l'action mise en oeuvre (Lenfant et al 2015).
NB : Le « niveau de gestion » désigne la gestion à mettre en oeuvre après le projet.

III.1.2.4.9. Notion de Création

- **La création** est l'ensemble des actions qui visent à convertir des milieux terrestres en nouveaux milieux humides et hydriques. Pour ce faire, il faut approvisionner le site en eau là où il n'y en a pas naturellement, selon la profondeur et la durée de temps de rétention souhaitées.
- L'objectif, pour les milieux humides, est d'établir de nouvelles conditions

hydrologiques et d'implanter une végétation typique sur des sols qui ont la capacité de devenir hydromorphes afin de créer un habitat fonctionnel. Par exemple, un sol sableux sur un terrain avec une pente n'aurait pas le même potentiel de devenir hydromorphe qu'un sol argileux sur un terrain plat.

- ❖ L'objectif, pour les milieux hydriques, pourrait être l'excavation d'une nouvelle zone inondable.

À superficie égale, la création demande habituellement beaucoup plus d'efforts et de ressources que la restauration d'un milieu perturbé ou dégradé. Les projets de création de certains types de milieux humides ont nettement moins de succès que ceux d'autres types de milieux. Par exemple, les milieux humides forestiers (marécages arborescents et tourbières boisées) sont plus difficiles à créer, car la durée de leur établissement est plus longue en raison du temps requis pour la croissance des espèces arborescentes (Mitsch et Wilson, 1996; Gorham et Rochefort, 2003). Il y a également un risque accru de colonisation par les espèces exotiques envahissantes à la suite de travaux de création, puisqu'elles s'installent généralement plus rapidement que les communautés végétales indigènes.

Les aménagements visant à remplir une fonction particulière autre qu'environnementale ne correspondent habituellement pas à des milieux humides et hydriques créés (par exemple, un étang artificiel servant de point d'eau pour des bornes sèches d'incendie ou pour le prélèvement d'eau). Ces structures nécessitent un entretien régulier pour maintenir leurs fonctionnalités (enlèvement des sédiments, contrôle de la végétation, etc.), ce qui en fait des ouvrages plus artificiels que naturels. Sauf exception, ils n'accomplissent pas toujours naturellement l'ensemble des fonctions écologiques comme les milieux naturels pérennes et fonctionnels peuvent le faire. Cela dit, des aménagements comme des marais filtrants, s'ils dépassent l'objectif initial de gestion des eaux pour viser l'établissement d'un milieu humide pérenne et fonctionnel, pourraient conduire à une création de milieux humides réussie, notamment si leur conception tient compte des éléments suivants :

- ➢ Objectif de rétablir les conditions naturelles représentatives d'un milieu humide fonctionnel;
- ➢ Aménagements proposés pour la faune, en complément avec d'autres mesures;
- ➢ Diversité et représentativité de la flore qui sera plantée, pour les trois strates de végétation;
- ➢ Garantie d'apport en eau suffisant et pérenne;
- ➢ Entretien minimal pour assurer la pérennité du milieu.

La création d'habitats fauniques, qui est plus apparentée à l'amélioration du potentiel piscicole ou à l'amélioration d'habitats d'autres groupes fauniques, ne permet pas, de façon générale, l'établissement de l'ensemble des fonctions écologiques que fournissent normalement les milieux humides et hydriques. Ces aménagements, présentés comme seule mesure, ne sont pas considérés comme de la création en soi, mais plutôt comme des améliorations visant un objectif faunique. Toutefois, s'ils sont accompagnés d'autres mesures adéquates, de tels aménagements peuvent contribuer à la création d'un écosystème plus complet.

III.1.2.4.10. Remise en état d'un écosystème

- **La remise en état** regroupe les interventions effectuées à la suite de travaux portant atteinte à des milieux humides et hydriques.
- Ces interventions visent à remettre le site dans un état se rapprochant de l'état initial précédant la réalisation des travaux.
- Certains travaux autorisés peuvent nuire aux milieux situés sur le site, notamment en raison de la circulation de la machinerie. Ces atteintes temporaires n'ont pas pour effet d'altérer considérablement les fonctions écologiques, comme c'est le cas pour un site dégradé après plusieurs années de perturbations plus importantes.
- Les travaux effectués à la suite de l'obtention d'une autorisation peuvent tout de même laisser des traces et il importe de remettre en état les milieux qui ont été endommagés temporairement. Il en est de même pour les travaux réalisés en contravention à la législation environnementale.
- **La remise en état comprend**, entre autres :
  - le démantèlement d'ouvrages temporaires,
  - la stabilisation naturelle des talus,
  - la remise en état du sol avec les matériaux excavés ou le substrat d'origine,
  - la revégétalisation du site lorsque la végétation a été retirée ou décapée,
  - le retrait des débris et des autres matières résiduelles et le rétablissement des conditions de drainage d'origine.
- **La remise en état** est davantage considérée comme une mesure d'atténuation qu'une mesure de restauration ou de création, car le retour aux conditions d'origine est très improbable sur des sites perturbés depuis plusieurs années.
- Les sites dégradés et perturbés pendant plusieurs années nécessitent de réelles mesures de restauration pour retrouver leur fonctionnalité, tandis que les sites altérés durant des travaux peuvent être simplement remis en état. Cependant, des techniques de restauration peuvent être employées pour contribuer à remettre en état un site perturbé et à redémarrer les processus naturels.

III.1.2.4.11. Amélioration d'un écosystème

- L'amélioration consiste au rétablissement d'une ou de plusieurs fonctions écologiques, par exemple par la création d'un habitat faunique ou la gestion des espèces exotiques envahissantes (**Une espèce exotique** est une espèce introduite, volontairement ou accidentellement, dans un environnement où elle n'est pas naturellement présente. Elle peut devenir envahissante et perturber les écosystèmes locaux).
- L'amélioration comme seule mesure est une forme d'aménagement qui n'est pas considérée comme de la restauration en soi. Toutefois, si elle est accompagnée d'autres mesures adéquates, l'amélioration de certaines fonctions peut contribuer à la restauration d'un écosystème.

III.1.2.4.12. Mise en valeur d'un écosystème

- **La mise en valeur** consiste généralement à aménager un milieu afin de lui donner de nouvelles fonctionnalités, de le rendre plus accessible ou d'améliorer sa valeur esthétique en y intégrant des structures anthropiques. Par exemple, des sentiers, des points de vue, des tables à pique-nique, etc. sont des structures anthropiques qui mettent le milieu en valeur par l'amélioration des services culturels et de loisirs ou du paysage.
- La mise en valeur peut être complémentaire à un projet de restauration ou de création, mais ce type d'intervention n'est pas considéré comme de la restauration ou de la création en soi, puisque les travaux ne permettent pas de rétablir directement des fonctions écologiques ou la biodiversité.

III.1.2.4.13. Mesures d'atténuation

- **Les mesures d'atténuation** visent à limiter les impacts sur l'environnement lors de la réalisation d'un projet portant atteinte à des milieux humides et hydriques. Celles-ci comprennent l'évitement, les efforts de minimisation mis en place durant la réalisation de travaux portant atteinte aux milieux et les mesures de compensation pour les pertes inévitables de ces milieux.
- **La minimisation vise** à réduire le plus possible la durée, l'intensité ou l'étendue des impacts du projet sur les milieux qui ne peuvent être complètement évités (CGDD,2013). L'optimisation de la conception du projet pour réduire l'empiètement sur les milieux, la limitation de l'implantation de surfaces imperméabilisées près des milieux humides et hydriques et l'implantation d'une zone tampon autour des milieux humides sont des exemples de mesures de minimisation. Pour plus de précisions concernant les mesures d'atténuation et d'autres exemples, on peut consulter la section 3.2.2 du document *Les milieux humides et hydriques – L'analyse environnementale* (MELCC, 2021b). L'évitement et la minimisation ne sont pas considérés comme des mesures de restauration ou de création.

III.1.2.4.14.Trajectoire

- **La trajectoire écologique** est l'évolution du biotope et de la biocénose dans un écosystème au cours du temps. La trajectoire d'un écosystème intègre son histoire et en particulier les contraintes et les forçages anthropiques qu'il a subis.
- En restauration, la trajectoire commence avec l'écosystème non-restauré et progresse vers l'état attendu d'autoréparation souhaité dans les buts du projet de restauration et exprimé dans l'écosystème de référence.
- La trajectoire englobe tous les attributs écologiques biotiques et abiotiques d'un écosystème et en théorie, peut être suivie par la mesure séquentielle de suites cohérentes de paramètres écologiques. Aucune trajectoire n'est restreinte ou spécifique.
- La trajectoire écologique recouvre la notion de succession et tous les itinéraires possibles de développement et d'évolution de l'écosystème :
  - ✓ **Succession progressive** : de la terre à la prairie à la forêt (=climax), on gagne en richesse d'espèces, en minéralisation, en complexité des strates etc.
  - ✓ Cette trajectoire peut être modifiée par des perturbations (incendies), elle

devient alors **succession régressive**, partant du climax au sol nu. La perturbation est l'élément central.

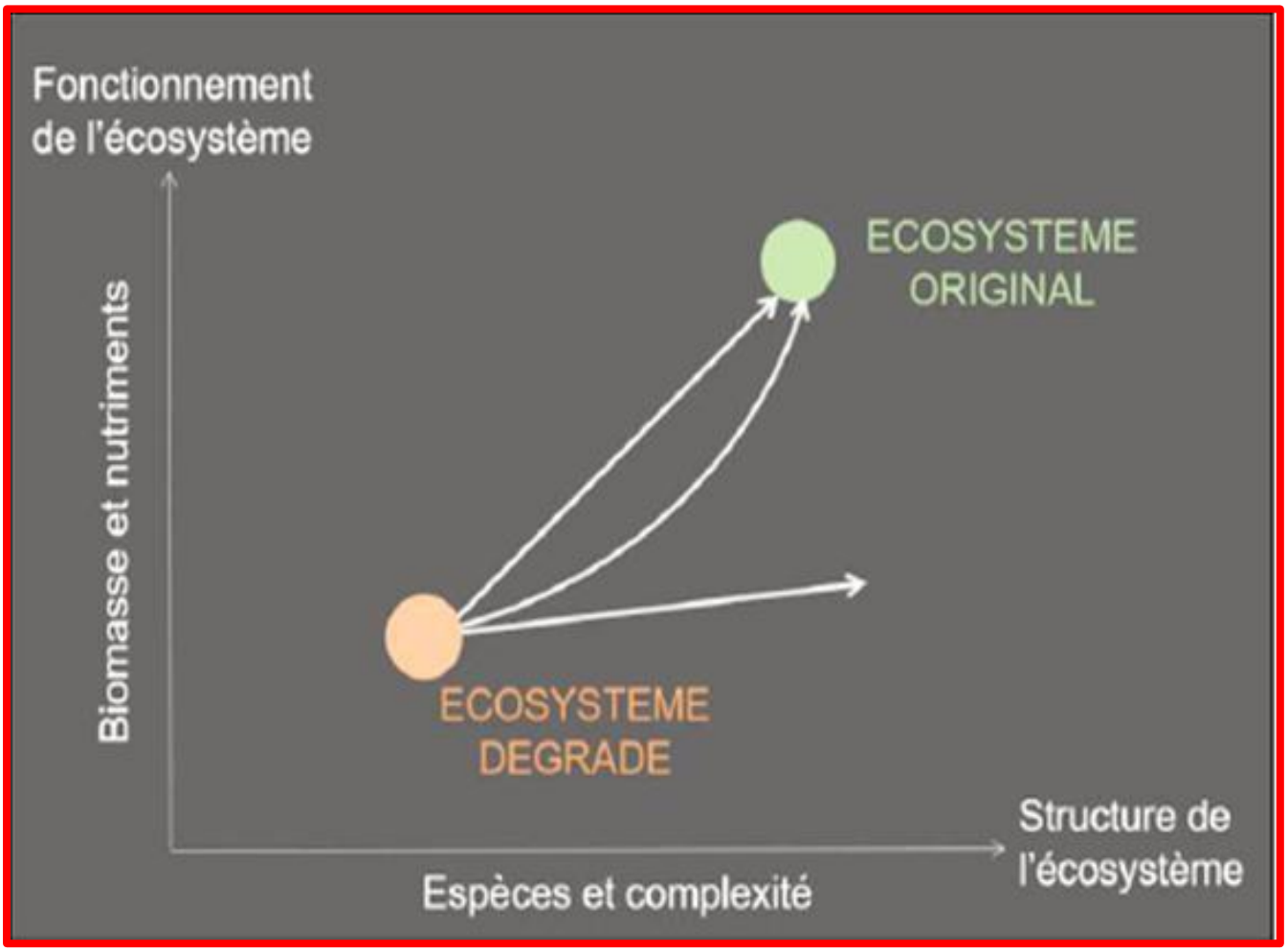


Figure 7 : Formalise théorique des trajectoires d'un écosystème vers sa référence d'après Bradshaw (1984).

III.1.2.4.15. La perturbation écologique

A. Du point de vue dynamique, une perturbation est définie comme étant : tout évènement relativement discret dans le temps qui bouleverse un écosystème, une communauté ou une population et change les niveaux de ressources, leur disponibilité ou l'environnement physique (White & Pickett 1985). Les perturbations dynamiques peuvent être d'origine exogène, lorsque les modifications rencontrées sont issues de sources extérieures au milieu, ou endogène, lorsque les modifications du milieu sont issues de processus internes au milieu (e.g. chute d'un arbre sénescent) (McIntyre and Hobbs, 1999).

B. Du point de vue mécaniste, la perturbation est par contre définie comme un évènement qui engendre une perte totale ou partielle de la biomasse en place dans une communauté (Grime, 1979; Huston, 1994).
Les perturbations mécanistes peuvent permettre une remise à disposition des nutriments et créent de nouvelles opportunités pour les organismes par la création de nouvelles niches exploitables (Grubb, 1977). En fonction du type, de

l'intensité, de la fréquence et de l'échelle spatiale à laquelle elles agissent, ces perturbations jouent fortement sur les capacités de résilience du milieu.

C. Du point de vue général La perturbation écologique correspond à un ou plusieurs évènements naturels ou anthropiques altérant, dans le temps et dans l'espace, les relations entre les organismes vivants et leurs habitats.

D. Les perturbations écologiques génèrent des impacts sur les écosystèmes :

- Destruction et dérangement d'espèces végétales et animales
- Dégradation des sols (assèchement, acidification, …)
- Altération des chaînes trophiques
- Pollution lumineuse…
- **Fragmentation** des habitats qui est la réduction d'un habitat continu de grande taille en fragments d'habitats plus petits et isolés les uns des autres qui a pour conséquence :
  - ❖ **À l'échelle du paysage**: Réduction de la diversité en habitats,
  - ❖ **À l'échelle de l'espèce**: Réduction de la taille des populations des fragments rémanents, diminution du taux de colonisation des fragments d'habitat (manque de connectivité). La restauration écologique va viser dans ce cas :
    - ✓ l'augmentation les surfaces des habitats menacés,
    - ✓ la création d'un réseau écologique assurant la connectivité entre fragments

Dans les opérations de restauration écologique, les perturbations peuvent être manipulées. Les perturbations dynamiques sont utilisées pour initier une nouvelle trajectoire au milieu dégradé, vers la référence. Des actions sur le sol peuvent être mises en place (hersage, excavation d'horizons supérieurs du sol).

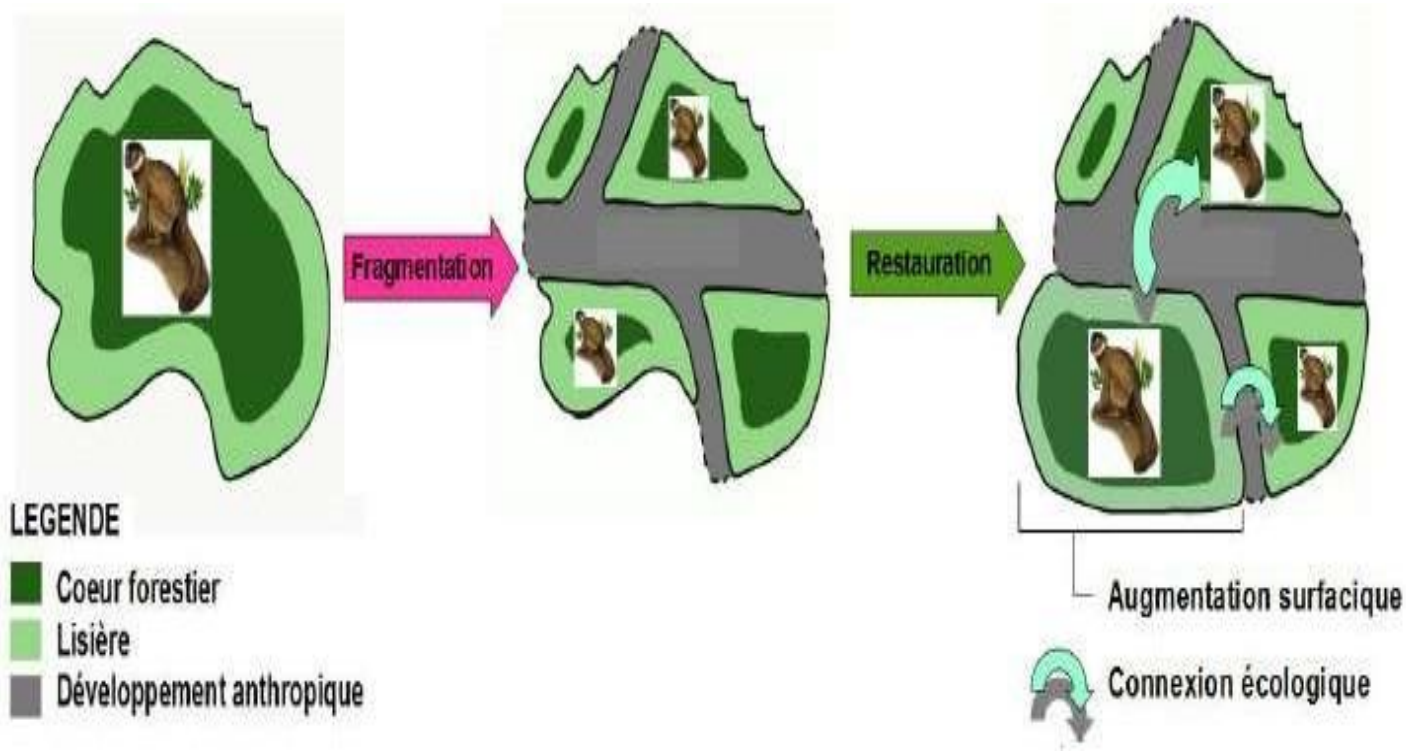


Figure 8 : Fragmentation et Restauration écologique

III.1.2.4.16.Notion de stabilité, de résistance et de résilience et d'un écosystème

- **La stabilité d'un écosystème** est la capacité d'un écosystème à maintenir sa trajectoire donnée malgré un stress ; cela dénote un équilibre dynamique. La stabilité est atteinte sur la base de la capacité d'un écosystème à être résistant ou résilient.
- **La résistance écologique** est le terme décrivant la capacité d'un écosystème à maintenir ses attributs structuraux et fonctionnels face au stress et aux perturbations
- **La résilience écologique** est la capacité d'un écosystème à récupérer rapidement son état initial (les attributs structuraux et fonctionnels) ayant subi des dommages causés par un stress ou une perturbation (incendies, pollution, sécheresse, changement climatique, etc.). Elle correspond à l'amplitude maximale de la modification du paramètre considéré pour laquelle il y a une réponse réversible possible de l'écosystème.
  - ✓ La résilience écologique en tant que phénomène d'un écosystème peut être décomposée en attributs complémentaires : l'échelle, la capacité d'adaptation, les seuils et les états stables alternatifs. C'est le meilleur indicateur de la santé et de l'intégrité d'un écosystème.
  - ✓ **Les indicateurs** sont les attributs vitaux de l'écosystème, ce sont des caractéristiques ou attributs qui servent d'indicateur de la structure et de fonctionnement d'un écosystème (ex : richesse spécifique).
  - ✓ Les indicateurs de changement d'écosystème peuvent inclure une variété de mesures, choisies pour leur sensibilité au changement et leur importance dans un écosystème.
  - ✓ Les indicateurs peuvent provenir du niveau de l'espèce, du niveau de la communauté ou du niveau de l'habitat et peuvent également prendre la forme de mesures de variables abiotiques (ex:la constitution physicochimique d'un sol).

III.1.2.4.17. Intégrité et Santé d'un écosystème

Les termes **d'intégrité d'un écosystème** et **de santé d'un écosystème** sont communément employés pour décrire l'état attendu d'un écosystème restauré. Malgré le fait que certains auteurs utilisent alternativement l'un ou l'autre de ces termes, ils ont des sens différents.

- **L'intégrité d'un écosystème** est l'état ou la condition d'un écosystème qui montre des caractéristiques de biodiversité de la référence, telles que la composition spécifique et la structure communautaire, et qui est entièrement capable de maintenir le fonctionnement normal de l'écosystème.
- **La santé d'un écosystème** est l'état ou la condition d'un écosystème dans lequel ses attributs dynamiques se manifestent pour une gamme « normale » d'activité relative à son stade écologique de développement. La santé d'un écosystème restauré se manifeste s'il fonctionne normalement par rapport à l'écosystème de

référence ou à une série appropriée d'attributs d'écosystème restauré comme ceux qui sont listés ci-dessus en Section 3. Un état d'intégrité de l'écosystème suggère, mais ne confirme pas nécessairement, à la fois un état de santé de l'écosystème et un environnement abiotique adapté.

III.1.2.4.18.Effondrement d'un écosystème

III.1.2.4.18.1.Définition

- L'effondrement d'un écosystème signifie qu'un écosystème a perdu ses fonctions essentielles, rendant impossible son fonctionnement normal et mettant en péril les espèces qui en dépendent. Il s'agit du stade ultime de dégradation écologique.
- L'effondrement d'un écosystème est un point de non-retour où il ne peut plus fonctionner comme avant. Il est donc essentiel de prévenir la destruction des écosystèmes avant qu'ils n'atteignent ce stade critique.

III.1.2.4.18.2. Signes d'effondrement d'un écosystème

Un écosystème est considéré comme effondré lorsqu'il ya:

- ✓ **Disparition des espèces clés:** Perte des espèces qui maintiennent l'équilibre (ex. : coraux dans les récifs, abeilles dans les prairies).
- ✓ **Modification irréversible du paysage:** Transformation radicale due à la déforestation, à l'urbanisation ou aux changements climatiques.
- ✓ **Perte de services écosystémiques**: Plus de régulation du climat, d'approvisionnement en eau potable ou de fertilité des sols.
- ✓ **Apparition d'un nouvel état écologique stable:** L'écosystème ne peut plus revenir à son état d'origine et se transforme en un autre type d'environnement (ex. : une forêt tropicale devient une savane dégradée).

III.1.2.4.18.3. Causes principales de l'effondrement

Les écosystèmes peuvent s'effondrer sous l'effet de plusieurs facteurs:

- ➢ **Activités humaines :**
  - ✓ **Déforestation massive:** Perte des forêts tropicales due à l'agriculture et à l'exploitation du bois,
  - ✓ **Surpêche et destruction des habitats marins:** Récifs coralliens détruits par l'acidification des océans,
  - ✓ **Pollution extrême:** Contamination des eaux et des sols empêchant toute vie.
- ➢ **Changements climatiques**
  - ✓ **Augmentation des températures:** Fonte du pergélisol et dégradation des écosystèmes polaires.
  - ✓ **Sécheresses prolongées :** Transformation des forêts en déserts.
  - ✓ **Montée du niveau de la mer:** Submersion des mangroves et destruction des zones côtières.
- ➢ **Catastrophes naturelles et événements extrêmes :** Ouragans, Incendies de grande ampleur, Éruptions volcaniques qui perturbent durablement un écosystème,etc

III.1.2.4.18.4. Conséquences de l'éffondrement d'un écosystème

- ✓ **Extinction d'espèces:** Perte de la biodiversité locale et mondiale,
- ✓ **Perte des services écosystémiques:** Moins d'eau potable, d'oxygène, de régulation climatique,
- ✓ **Déplacements de populations humaines:** Exode rural et migrations climatiques,
- ✓ **Augmentation des catastrophes naturelles:** Moins de protection contre les tempêtes, érosion accrue.

Figure 9: Effondrement d'un écosystème aquatique

III.1.2.4.18.5.Restauration d'un écosystème effondré

La restauration est difficile, mais possible dans certains cas avec :

- ✓ Reforestation et protection des habitats (ex. : replantation de mangroves),
- ✓ Réduction des polluants et des pressions humaines (ex. : régulation de la pêche),
- ✓ Réintroduction d'espèces disparues localement pour restaurer l'équilibre.

III.1.2.4.19. Dégradation, Dommage et Transformation d'un écosystème

- **La dégradation** se rapporte à des changements subtils ou graduels qui réduisent l'intégrité et la santé écologique.
- **Le dommage** fait référence à des changements importants et manifestes dans un écosystème. Un écosystème est **détruit** lorsque la dégradation ou le dommage supprime toute vie macroscopique, et généralement abîme l'environnement physique.
- **La transformation** est la conversion d'un écosystème vers un type différent d'écosystème ou d'utilisation des terres.

III.1.2.4.20.Différence entre les termes utilisés en écologie de la restauration

Tableau 7 : Différence entre les termes utilisés en écologie de la restauration

Terme	Définition	Objectif principal
1. Écologie de la restauration	▪ C'est la discipline scientifique qui étudie les principes et processus écologiques à appliquer pour concevoir, guider, évaluer et améliorer les projets de restauration des écosystèmes dégradés ou endommages. ▪ **C'est un champ de recherche qui comprend :** L'étude des écosystèmes de référence, la compréhension des processus de dégradation et de régénération, l'élaboration de méthodes et d'indicateurs de réussite et l'analyse des interactions biotiques et abiotiques.	Fournir une base scientifique solide à la pratique de la restauration écologique.
2. Restauration écologique	▪ C'est l'action concrète ou pratique visant à réparer un écosystème dégradé, endommagé ou détruit, pour qu'il retrouve sa structure, sa fonction, sa biodiversité et ses services écosystémiques. ▪ **C'est une activité pratique qui comprend par exemple:** Replanter des arbres indigènes dans une forêt dégradée, Restaurer une zone humide asséchée, Réintroduire des espèces disparues localement.	Retrouver la structure, la composition et la fonction d'origine.
3. Réhabilitation d'un écosystème	Processus visant à rétablir certaines fonctions écologiques d'un écosystème sans retrouver son état d'origine.	Restaurer certaines fonctions écologiques clés.
4. Réaffectation d'un écosystème	Changement volontaire de l'usage ou de la fonction d'un écosystème dégradé vers un nouvel usage compatible avec l'environnement	Donner un nouvel usage écologique ou économique, Utilisation alternative du milieu.
5. Trajectoire	Chemin évolutif emprunté par un	Suivre ou guider l'évolution

écologique	écosystème en restauration vers un état de référence.	d'un écosystème restauré.
6. Écosystème de référence	Écosystème non dégradé servant de modèle pour guider la restauration.	Fournir un point de comparaison ou un but à atteindre.
7. Dégradation d'un écosystème	Processus de détérioration progressive des fonctions, structures ou services d'un écosystème.	Identifier les causes de perte de fonctionnalité.
8. Écosystème endommagé	Écosystème ayant subi des perturbations réduisant sa qualité écologique sans être totalement détruit.	Reconnaître la nécessité d'intervention.
9. Seuil d'irréversibilité	Point au-delà duquel un écosystème ne peut plus revenir à son état antérieur sans intervention majeure.	Déterminer les limites de la restauration passive.
10. Espèces exotiques	Espèces introduites intentionnellement ou non en dehors de leur aire de répartition naturelle.	Éviter les impacts sur la biodiversité locale.
11. Résilience écologique	Capacité d'un écosystème à se rétablir après une perturbation.	Favoriser le rétablissement écologique.
12. Remise en état d'un écosystème	Action visant à rendre à un site dégradé une fonctionnalité écologique ou productive.	Réduire l'impact écologique d'une activité passée.
13. Non-détérioration d'un écosystème	Principe de prévention consistant à ne pas aggraver l'état écologique d'un milieu.	Maintenir un bon état écologique.
14. Remédiation d'un écosystème	Ensemble de techniques visant à réduire ou éliminer les polluants dans un écosystème.	Décontaminer et restaurer les fonctions écologiques.
15. Création d'un écosystème	Construction d'un nouvel écosystème Dans un environnement où il n'existait pas	Compenser une perte ou améliorer la biodiversité.
16. Amélioration d'un écosystème	Augmentation de certaines fonctions ou qualités d'un écosystème, sans restauration complète.	Optimiser les services écosystémiques.
17. Mise en valeur d'un écosystème	Action visant à accroître la valeur écologique, esthétique ou économique d'un écosystème.	Promouvoir l'usage durable et la conservation.
18. Mesures d'atténuation pour un écosystème	Actions visant à réduire les impacts négatifs d'un projet sur un écosystème.	Minimiser les dommages écologiques.
19. Perturbation écologique	Événement naturel ou anthropique modifiant de façon significative la structure ou les fonctions d'un écosystème.	Comprendre les dynamiques de changement.
20. Fragmentation d'un écosystème	Division d'un habitat naturel en fragments plus petits, isolés les uns des autres.	Réduire l'isolement des populations.
21. Résistance écologique	Capacité d'un écosystème à résister aux perturbations sans changer d'état.	Préserver la stabilité malgré les stress.
22. Stabilité d'un écosystème	Capacité à maintenir sa structure et ses fonctions dans le temps.	Assurer la durabilité écologique.
23. Intégrité d'un écosystème	Degré de préservation de la structure, des fonctions et de la biodiversité d'un écosystème.	Garantir un fonctionnement écologique sain.

24. Santé d'un écosystème	État global de bon fonctionnement écologique, productivité, diversité et résilience.	Évaluer l'état de fonctionnement global.
25. Effondrement d'un écosystème	Perte majeure et souvent irréversible des fonctions écologiques d'un système.	Prévenir les points de basculement écologiques.
26. Transformation d'un écosystème	Changement profond de structure, souvent lié à des pressions anthropiques ou climatiques.	Suivre ou prévenir les changements irréversibles.

IV. INDICATEURS D'UN ÉCOSYSTÈME DÉGRADÉ

IV.1. Notion de dégradation en écologie de la restauration

- Le terme **dégradation** est une notion dynamique caractérisant un état différent de l'état initial. De nombreux synonymes et de multiples acceptions liés à l'action de dégrader ou de se dégrader, intéressent plusieurs champs disciplinaires : physique, écologie, architecture, urbanisme, médecine, politique, économie, armée. Les terminologies scientifiques correspondent généralement à des binômes antagonistes :
  - Dégradation/Restauration,
  - Dégradation Anthropique/Naturelle,
  - Dégénération/Régénération,
  - Dynamique Régressive/Progressive,
  - Dénaturation/Renaturation.

La SERI (*Society for Ecological Restoration International*) propose une définition officielle du terme dégradation (SER, 20004) :

- **La dégradation** se rapporte à des changements subtils ou graduels qui réduisent l'intégrité et la santé écologique.
- **Le dommage** fait référence à des changements importants et manifestes dans un écosystème.
- **Un écosystème est détruit** lorsque la dégradation ou le dommage supprime toute vie macroscopique, et généralement abîme l'environnement physique.

IV.2. Indicateurs de dégradation d'un écosystème

- Lorsqu'un écosystème est dégradé, cela signifie que ses fonctions naturelles sont altérées. Un écosystème dégradé présente plusieurs indicateurs, notamment une perte de diversité biologique, une réduction de la qualité de l'eau et du sol, une pollution, des changements dans les populations d'espèces, et une altération des habitats naturels.
- La surveillance de ces indicateurs permet de détecter précocement les signes de dégradation écologique et de mettre en place des actions de restauration écologique adaptées.
- Les principaux indicateurs qui permettent de diagnostiquer cette dégradation sont:

IV.2.1. Perte de biodiversité

- Diminution du nombre d'espèces (Réduction de la richesse spécifique) : disparition progressive de certaines espèces dans un écosystème, notamment les sensibles ou endémiques.
- Homogénéisation biologique: Les individus d'une même espèce deviennent plus homogènes, réduisant leur capacité d'adaptation.
- Changements dans la composition des espèces: Une dominance des espèces tolérantes à la dégradation, au détriment des espèces plus sensibles.
- Apparition d'espèces envahissantes : introduction d'espèces perturbatrices.
- Effondrement des populations: Certaines espèces disparaissent ou voient leur population chuter drastiquement.
- Diminution de la diversité génétique: Les populations deviennent moins résistantes aux changements environnementaux.

IV.3.2. Altération des sols

- Compactage : réduction de la porosité du sol.
- Salinisation : accumulation de sels dans le sol.
- Acidification des sols: L'acidification du sol rend les sols moins fertiles et affecte la croissance des plantes.
- Erosion du sol: Le sol est enlevé par l'eau ou le vent, ce qui diminue sa fertilité et peut entraîner des problèmes d'écosystèmes.

IV.3.3. Dégradation de la qualité de l'eau et pollution

- Turbidité : eau trouble gênant la photosynthèse aquatique.
- Pollution Chimique: Présence des contaminants chimiques, des déchets, des pesticides, des métaux lourds etc., qui affectent la qualité de l'eau et du sol. Les polluants peuvent avoir des effets toxiques sur les organismes et perturber les processus écosystémiques.
- Eutrophisation: Augmentation excessive de nutriments (azote et phosphore) dans l'eau, entraînant une prolifération d'algues et une réduction de la qualité de l'eau.
- Accumulation de toxines: Les polluants persistants peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire et affecter les organismes supérieurs.

IV.3.4. Perturbation des cycles naturels et Perte des fonctions écosystémiques.

- Cycle du carbone : diminution de la fixation du carbone.
- Cycle des nutriments : appauvrissement en éléments essentiels.
- Modification des cycles de l'eau: Le changement climatique peut entraîner des changements dans les régimes de précipitations, modification de l'infiltration, évaporation, ruissellement, ce qui peut affecter les écosystèmes.
- Réduction de la régulation de l'eau: La dégradation des zones humides et des forêts peut réduire la capacité des écosystèmes à réguler le cycle de l'eau.
- Diminution de la production alimentaire: La dégradation des sols et la perte d'habitats peuvent réduire la capacité des écosystèmes à produire de la nourriture.

IV.3.5. Diminution de la productivité biologique

- Baisse de la biomasse végétale.
- Diminution des rendements agricoles.
- Moins de ressources pour la faune.

IV.3.6. Fragmentation ou perte/Altération d'habitats naturels

- Isolement des populations animales et végétales.
- Destruction des habitats: Le défrichement des forêts, des zones humides et des autres habitats essentiels réduit la disponibilité d'espaces pour les espèces.
- Fragmentation des habitats: La fragmentation des habitats isole les populations d'espèces et rend la migration entre les différents écosystèmes plus difficile. De même, la construction d'infrastructures divisant les habitats et l'exploitation agricole peuvent détruire des habitats naturels, réduisant ainsi la diversité des espèces qui vivent dans les écosystèmes, ce qui affecte la stabilité et la fonctionnalité des écosystèmes.
- Utilisation excessive des ressources naturelles: L'exploitation non durable des ressources naturelles (eau, forêts, etc.) peut entraîner une dégradation des écosystèmes.

IV.3.7. Changements climatiques locaux

- Réchauffement climatique: L'augmentation des températures locales peut avoir des conséquences majeures sur les écosystèmes, notamment sur les habitats sensibles.
- Sécheresses ou inondations plus fréquentes.
- Diminution de la régulation climatique naturelle.

IV.3.8. Présence de déchets ou de polluants

- Pollution visible : plastiques, décharges, débris industriels.
- Pollution invisible : substances toxiques dans l'eau, l'air, les sols.
- Impact sur la santé humaine et animale.

IV.3.9. Changements dans les populations d'espèces

- Présence d'espèces invasives: Les espèces introduites peuvent perturber les écosystèmes locaux en colonisant rapidement les habitats et remplacer les espèces indigènes.
- Modification des relations alimentaires: La disparition d'une espèce clé peut avoir des conséquences sur toute la chaîne alimentaire.
- Changement des comportements des espèces: Les modifications climatiques ou la pollution peuvent entraîner des changements dans les comportements des espèces, comme des migrations tardives ou des changements de régime alimentaire.

IV.3.10. Tableau synthétique des indicateurs généraux de dégradation d'un écosystème

Tableau 8 : Indicateurs généraux de dégradation d'un écosystème

Catégorie d'indicateurs	Indicateurs spécifiques	Signes de dégradation observables
1. Biologiques	▪ Baisse de la biodiversité, ▪ Disparition d'espèces sensibles ▪ Espèces invasives ▪ Taux de reproduction faible, ▪ Pathogènes/parasites accrus	▪ Moins d'espèces animales/végétales, ▪ Espèces exotiques dominantes ▪ Faune malade, ▪ Faible résilience
2. Physico-Chimiques	▪ Pollution (eau, sol, air), ▪ pH anormal, ▪ Eau trouble ou appauvrie en oxygène	▪ Présence de métaux lourds, nitrates, pesticides, ▪ Acidification, eutrophisation
3. Climatiques	▪ Hausse des températures locales, Sécheresses, ▪ Régime des pluies modifié	▪ Perte d'humidité, stress hydrique des plantes
4. Hydrologiques	▪ Réduction du débit, ▪ Baisse nappe phréatique, ▪ Assèchement des zones humides	▪ Sources tariées, rivières intermittentes
5. Géomorphologiques	▪ Érosion des sols, ▪ Glissements de terrain, ▪ Sédimentation	▪ Ravinement, perte de sol, ▪ Talus instables, rivières boueuses
6. Écotoxicologiques	▪ Polluants bioaccumulés, ▪ Malformations, ▪ Tests bioessais positifs	▪ Organismes déformés, toxines détectées
7. Fonctionnels	▪ Baisse de la productivité primaire, Perturbation des cycles naturels	▪ Moins de biomasse, ▪ Déficit en pollinisation, en régulation naturelle
8. Sociales	▪ Migration forcée, ▪ Conflits d'usage	▪ Appauvrissement de la population, exode rural, tensions sociales
9. Économiques	▪ Baisse de productivité, ▪ Dépendance aux intrants, ▪ Abandon des terres ▪ Réduction des ressources naturelles,	▪ Rendements faibles, coût élevé, terres en friche ▪ Moins d'eau potable, de poissons, de bois
10. Paysagers	▪ Fragmentation des habitats, ▪ Uniformisation, ▪ Réduction de la complexité ▪ Déforestation,	▪ Monocultures, perte de diversité spatiale ▪ Paysage morcelé, disparition du couvert végétal

IV.3.11. Exemple concret : Forêt tropicale humide dégradée

La forêt tropicale d'un pays équatorial (ex. : Congo, Brésil, Indonésie) est soumise à des pressions humaines: exploitation forestière illégale, agriculture sur brûlis, construction de routes, exploitation minière.

Tableau 9 : Indicateurs de dégradation observés :

Catégorie	Indicateurs observés	Signes concrets
1. Biologiques	• Baisse du nombre d'espèces, • Disparition d'animaux rares, • Plantes pionnières	• Moins de singes, oiseaux, amphibiens, • Espèces forestières rares disparues
2. Physico-chimiques	• Sols appauvris et acides, • Pollution des rivières par le mercure	• Moins de nutriments, • Poissons morts dans les cours d'eau
3. Physiques	• Déforestation massive, • Érosion due à la perte du couvert végétal	• Sol nu, ravinement, • Paysage morcelé
4. Fonctionnels	• Chute de la productivité végétale, • Dérèglement du cycle de l'eau	• Régénération lente, • Microclimat modifié : sécheresse
5. Socio-économiques	• Perte de ressources, • Conflits entre éleveurs et agriculteurs	• Moins de bois, plantes médicinales, • Tensions foncières

IV.3.12.Fiche signalétique de restauration

Tableau 10 : Fiche signalétique de restauration

Type d'écosystème	Forêt tropicale humide
1. Problèmes rencontrés	Déforestation, érosion, perte de biodiversité, pollution, fragmentation des habitats
2. Causes principales	Exploitation forestière, agriculture sur brûlis, extraction minière, urbanisation
3. Objectifs de la restauration	Reconstituer la structure forestière, restaurer les fonctions écologiques, réintroduire la biodiversité, améliorer les conditions de vie
4. Méthodes de restauration	Régénération naturelle assistée, reboisement avec espèces locales, agroforesterie, stabilisation des sols, création de corridors écologiques
5. Acteurs impliqués	Communautés locales, ONG, autorités forestières, chercheurs
6. Durée estimée du projet	5 à 20 ans selon le contexte
7. Résultats attendus	Retour de la biodiversité, régénération des sols, amélioration du microclimat
8. Suivi-évaluation	Suivi de la faune/flore, taux de survie, couverture forestière, indicateurs socio-économiques

V. ETAPES D'UN PROJET DE RESTAURATION

Une étape cruciale d'un projet de restauration est la sélection d'un écosystème de référence. Celui-ci a été défini par Le Floc'h et al. (1995) comme une approximation de l'état souhaitable, une norme choisie parmi plusieurs états alternatifs possibles et accessibles par une succession d'étapes appelée trajectoire. L'écosystème de référence sera ensuite utilisé pour évaluer les efforts de restauration (White et al., 1997).

V.1. Fondements de l'écologie de la restauration

Quatre idées principales soutiennent la démarche de l'écologie de la restauration :

i. Avant de restaurer, il est nécessaire d'obtenir la disparition du facteur de dégradation des milieux. Le diagnostic des causes profondes des dégradations et la prise de conscience de leur importance ne sont pas toujours évidents, ni unanimement partagés (exemples: relations pollutions/dépérissement des forêts dans les années 80 dans la vallée de la Maurienne, relations forêt/érosion au XIX^{e} siècle dans les Alpes du Sud).

ii. Une fois dégradé, l'écosystème est bien souvent lent ou incapable de se reconstruire ; sa résilience est faible ou nulle, un seuil d'irréversibilité écologique (Aronson *et al*., 1993, 1995) a pu être franchi.

iii. L'homme possède en partie la capacité de réparer les écosystèmes. Le traitement des éco- systèmes dégradés, leur réhabilitation, peut débuter par des opérations d'ingénierie écologique. C'est le domaine sans doute le plus délicat et pour lequel la majorité des chercheurs et ingénieurs de la restauration travaille aujourd'hui.

iv. La restauration d'un système écologique viable, complexe et diversifié par définition, est un processus écologique demandant du temps. À partir d'un espace dégradé, la restauration n'est que très rarement possible sans une longue phase d'accompagnement. L'écosystème réhabilité va, au fil du temps et à l'épreuve de la nature, se réorganiser, rétablir ses équilibres écologiques (reconstitution du sol, compétition entre espèces,…). Ainsi, dans le domaine forestier, si l'arrêt des dégradations et la réparation des compartiments vitaux de l'écosystème forestier sont possibles par reboisement à l'échelle d'une trentaine d'années, on n'obtiendra pas la complexité d'une forêt avant plusieurs générations d'arbres et… de forestiers.

V.2. Étapes détaillées d'un projet de restauration écologique

1. Définition de la problématique(diagnostic initial de l'écosystème)

La définition de la problématique consiste à établir un diagnostic du milieu à restaurer et du contexte du projet par :

- Analyse de l'information disponible sur le milieu impacté :
  - Évaluer l'état actuel de l'écosystème (sols, biodiversité, eau, climat, etc.).
  - Identifier les causes de la dégradation et l'etendue de la dégradation, des dégâts ou de la destruction,
  - à quoi ressemblait l'écosystème avant d'être dégradé? Que s'est-il passé?

- Quelles fonctions écologiques ont été perdues?
- Des espèces cibles ou un habitat d'importance régionale ont-ils été perdus?
- Composition des espèces,la présence d'espèces envahissantes qui pourrait compromettre le projet, Résilience du biote,
- Menaces et manière de les éliminer, de les atténuer ou de s'y adapter
- Inventaire du milieu physique du site d'accueil (dépôts de surface, perméabilité du sol, apport en eau, etc.) afin de s'assurer que les conditions abiotiques conviennent au projet de restauration qui sera développé.
- Implication des parties prenantes: Consultation des communautés locales, ONG, autorités, chercheurs, Sensibilisation et formation des acteurs impliqués, intégration des savoirs locaux et scientifiques
- Comment les citoyens qui vivent à proximité du site dégradé perçoivent-ils le projet de restauration écologique?
- Connaissance du budget disponible: permet d'orienter rapidement les projets de restauration écologique puisque le budget constitue généralement la contrainte prépondérante.
- Cartographier la zone et collecter des données écologiques de référence.

Figure 10: Diagnostic initial de l'écosystème à restaurer

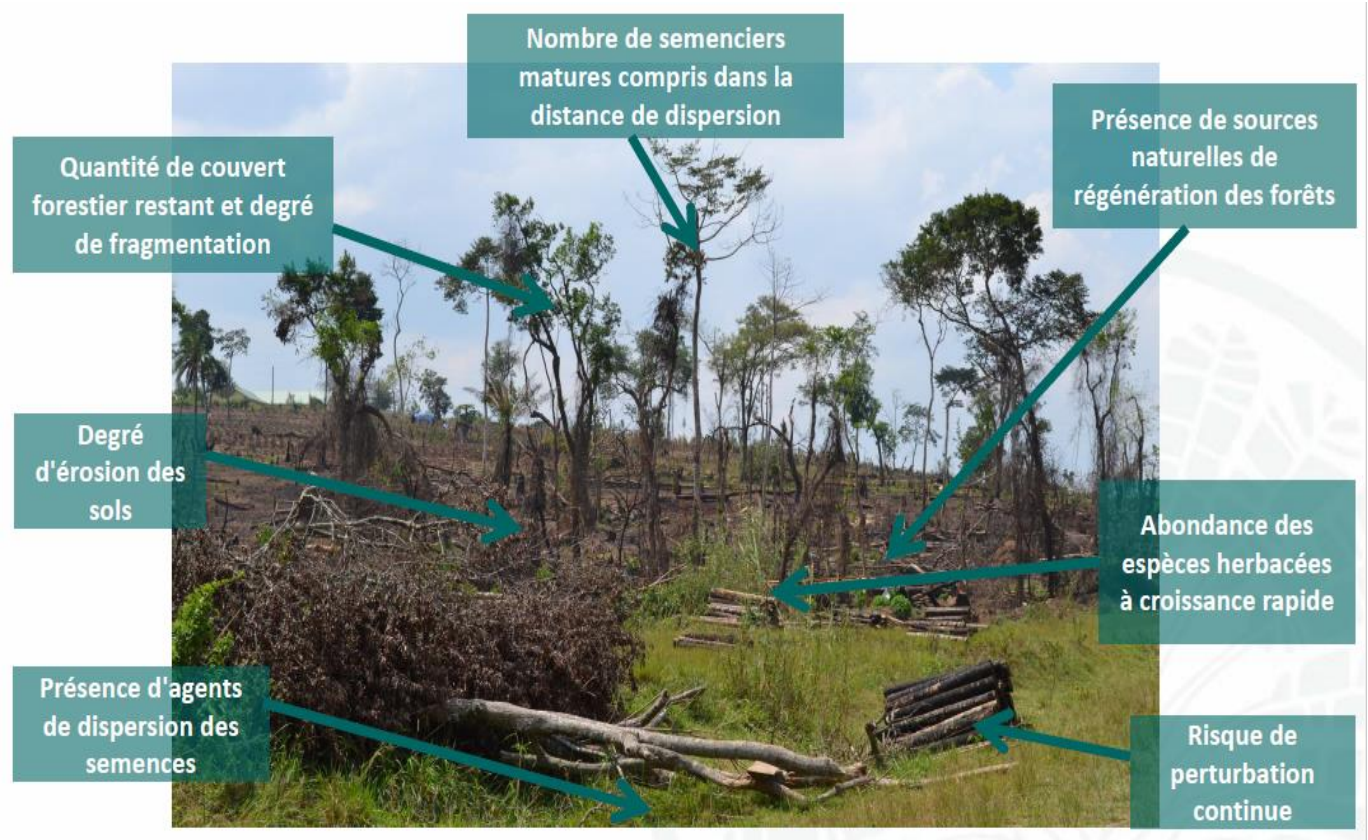


Figure 11 : Évaluation de l'état actuel de l'écosystème

2. Définition des buts et des objectifs de restauration (Fonction écologique souhaitée

Les buts et objectifs doivent être **SMART : c'est-à-dire** **S**pécifiques, **M**esurables, **A**tteignables (ou Réalisables), **R**éalistes (ou Pertinents) et limités dans le **T**emps (Pierce, 2005).

Exemple d'un objectif smart : Les taux de survie des espèces ont augmenté

Spécifique	**Le taux de survie de *Ficus sur* plantés sur le site de restauration a augmenté**
Mesurable	**Pourcentage** pour le taux de survie de *Ficus sur* plantés sur le site de restauration d'**au moins 99 %**
Réalisable	Pourcentage pour le taux de survie de *Ficus sur* plantés sur le site de restauration d'**au moins 80 %**
Pertinent	*Cet objectif est-il pertinent par rapport au but global du projet ?*
Limité dans le temps	Pourcentage pour le taux de survie de *Ficus sur* plantés sur le site de restauration d'au moins 80 % **trois ans après la plantation**

Figure 12 : Objectifs SMART

Les buts et objectifs se traduisent par l'identification des fonctions écologiques spécifiques pour un projet de restauration donné. Par exemple : créer une frayère pour l'omble de fontaine ou créer un habitat pour la couvée et l'élevage du canard branchu.

- **Objectifs écologiques :** rétablir les fonctions écologiques souhaitées , augmenter la biodiversité, restaurer les habitats naturels.
- **Objectifs socio-économiques :** améliorer la qualité de vie, fournir des services écosystémiques, impliquer les communautés locales.
- Déterminer des indicateurs de succès mesurables.
- **Evaluation des impacts négatifs:** La réalisation d'un projet de restauration écologique peut engendrer certains impacts négatifs sur l'environnement. Par exemple, la restauration d'un milieu humide ou riverain demande d'excaver ou de remblayer le milieu récepteur. Il importe donc de considerer ces impacts potentiels en relation avec l'atteinte des buts et objectifs (fonctions écologiques) et de réfléchir à la réalisation de la restauration de manière à réduire le plus possible les impacts non souhaités.

Figure 13 : Définition des objectifs SMART de restauration

3. Identifier paramètres de suivi

- Identifications des indicateurs spécifiques, mesurables et atteignables qui vont permettre de mesurer la réussite à long terme du projet.
- Identifications des protocoles pour mesurer les indicateurs
- Valorisation du projet retour d'expérience
- Les suivis permettent non seulement de constater l'efficacité des mesures mises en place, mais également d'apprendre et d'adapter au besoin un futur projet.
- Il faut par exemple déterminer si le milieu restauré est réellement utilisé par l'espèce ou le groupe d'espèces ciblées, ou si le contrôle de l'espèce envahissante est efficace à long terme.
- Le suivi permet également de valoriser davantage l'investissement qui a permis la réalisation du projet.

Figure 14 : Identifications des protocoles pour mesurer les indicateurs

4. Planification du projet et devis

L'élaboration des plans et devis constitue une étape capitale et consiste à:

- Sélectionner précisément des opérations et des méthodes de restauration (plantation, lutte contre l'érosion, reconstitution de zones humides...).
- Élaboration d'un calendrier avec des étapes clés.
- Prévision des besoins en ressources humaines, financières et matérielles.
- Penser la gestion à long terme

Figure 15: Planification du projet et devis

5. La réalisation du projet : Mise en œuvre des actions de restauration

- Cette étape doit se réaliser en saison propice et une surveillance continue est nécessaire.
- Par exemple, aménager un étang temporaire en période estivale compromettra significativement la réussite du projet, car l'absence d'eau ou la faible saturation en eau du sol ne favorisera pas l'enracinement et la survie des plantes émergentes.
- Cette étape permet également de s'assurer que les équipes de travail comprennent bien les plans et devis fournis.
- La surveillance des travaux par une personne expérimentée permet de s'assurer du respect des plans et devis et d'adapter ou de modifier le projet sur le champ si les conditions de site l'imposent.
- Les principales réalisations comprennent :
  - ✓ Préparation du terrain : déblayage, amendement des sols, protection contre les perturbations,
  - ✓ Plantation ou régénération naturelle assistée.
  - ✓ Contrôle des espèces invasives et des nuisibles.
  - ✓ Gestion de l'eau : restauration de cours d'eau, zones humides, etc .

Figure 16 : Réalisation du projet

6. Suivi et évaluation écologique

➢ Le suivi-évaluation écologique porte essentiellement sur :

- Le suivi des indicateurs de succès (biodiversité, structure du sol, qualité de l'eau...).
- La comparaison avec les conditions de référence ou les objectifs.
- L'ajustement des pratiques si nécessaire (gestion adaptative).

- Le suivi des travaux s'inscrit dans un processus d'amélioration continue, car il permet de vérifier si les étapes précédentes ont été bien réalisées et si les indicateurs et les cibles identifiés pour le suivi sont adéquats.
- Le suivi vise également à vérifier si les fonctions visées sont atteintes. Il doit donc permettre de suivre et de quantifier la survie des espèces implantées, l'utilisation d'une frayère par l'espèce ciblée, l'amélioration de la qualité de l'eau, la maîtrise à long terme d'une espèce envahissante, etc.
- Le suivi met aussi en lumière les éléments qui font défaut, par exemple un faible taux de survie des plantations d'arbres et d'arbustes, et de comprendre pourquoi un tel résultat s'est produit.
- Dans le cas de plantations ou de dispositifs de génie végétal, un minimum de deux ans est nécessaire pour évaluer le succès de reprise de végétaux. La durée du suivi dépend toujours du projet de restauration et des fonctions écologiques recherchées, mais une période de cinq ans est jugée minimalement nécessaire pour la plupart des projets de restauration écologique.

Figure 17: Mesure des indicateurs physico-chimiques de l'eau

7. Entretien et pérennisation

- Mise en place d'un plan de gestion à long terme.
- Surveillance continue pour prévenir toute nouvelle dégradation.
- Renforcement des capacités locales (formation continue, transfert de savoir-faire).

Figure 18 : Renforcement des capacités locales pour la pérennisation du projet

8. Communication et retour d'expérience

- Rédaction de rapports et diffusion des résultats.
- Capitalisation des enseignements pour d'autres projets.
- Valorisation des impacts positifs sur la communauté et l'environnement.

V.3.Filtres à la restauration

À différentes étapes du processus de restauration, des filtres (ou contraintes) vont intervenir isolément ou conjointement, entravant la colonisation, l'établissement ou la persistance à long terme de certaines espèces. Les filtres déterminent les espèces qui sont susceptibles de s'installer dans la communauté (Andel and Aronson, 2012; Keddy, 1992; Temperton, 2004). Les filtres se succèdent de manière hiérarchique et agissent à des échelles spatio-temporelles différentes. Selon les auteurs, les filtres sont repartis en trois grandes catégories:

i. les filtres liés à la dispersion,
ii. les filtres liés aux conditions abiotiques du site,
iii. les filtres d'ordre biotique.

V.3.1.Les filtres de dispersion

- **Les filtres de dispersion** sont des filtres qui déterminent la capacité d'une espèce à arriver sur le milieu et englobe la structure du paysage (contexte historique de l'usage des terres, fragmentation du milieu, isolement du milieu).
- **D'une manière générale, la dispersion désigne** tous les processus par lesquels des êtres vivants, se séparant (ou étant séparés) géographiquement d'une population d'origine, colonisent (ou recolonisent) un nouveau territoire. Autrement dit, c'est la capacité de dispersion spatio-temporelle des différentes espèces.
- De façon plus précise, et en ce qui concerne les végétaux, la dispersion peut, en plus d'être spatiale (voie végétative ou diaspores propagées par des agents de dispersion), être temporelle via la banque de graines du sol.
- Les végétaux et animaux se dispersent par le vent et l'eau, à l'aide d'autres espèces, ou par leurs propres mouvements. Ces différents moyens de dispersion confèrent des capacités de dispersion spatio-temporelles variables selon les espèces leur permettant de franchir avec plus ou moins de facilité les filtres à la dispersion.
- Un site nouvellement restauré peut, au départ, n'accueillir qu'une proportion limitée, voire nulle, en espèces cibles (en ce compris la banque de graines). Dans ce cas, la colonisation du site restauré par les espèces « manquantes » ne sera possible que par l'arrivée d'individus ayant franchi les filtres à la dispersion, issus de populations voisines (Bakker et al., 1996), dans un contexte spatial satisfaisant, permettant la dispersion de ces espèces et résultant en un enrichissement des assemblages en espèces cibles sur le site restauré (Seabloom et al., 2003).
- Outre la restauration à proximité d'un site de référence, la connectivité, et donc la maille du filtre de dispersion, peut être améliorée par la mise en place de corridors écologiques entre le site restauré et un site pouvant jouer le rôle de source de propagules ou d'individus.
- Par ailleurs, la connectivité et dispersion d'individus entre écosystèmes similaires, restaurés et de référence, permettra par la suite la persistance à long terme de métapopulations à l'échelle du paysage.
- **Par métapopulation, on entend** un ensemble de sous-populations, appartenant à une espèce donnée, spatialement structurées et interconnectées entre elles par des flux d'individus.
- Ces sous-populations pouvant être confrontées à des évènements d'extinction et de recolonisation (via les flux d'individus), distribués dans le temps.
- Enfin, la nature de la matrice paysagère est également considérée comme un filtre à la dispersion, pouvant influencer la connectivité fonctionnelle entre les fragments d'habitats cibles.
- En effet, selon l'organisme visé, la dispersion à travers la matrice peut générer des coûts plus ou moins importants, selon sa perméabilité aux mouvements de l'organisme (Cristofoli & Mahy, 2010).

V.3.2.Les filtres abiotiques (environnementaux)

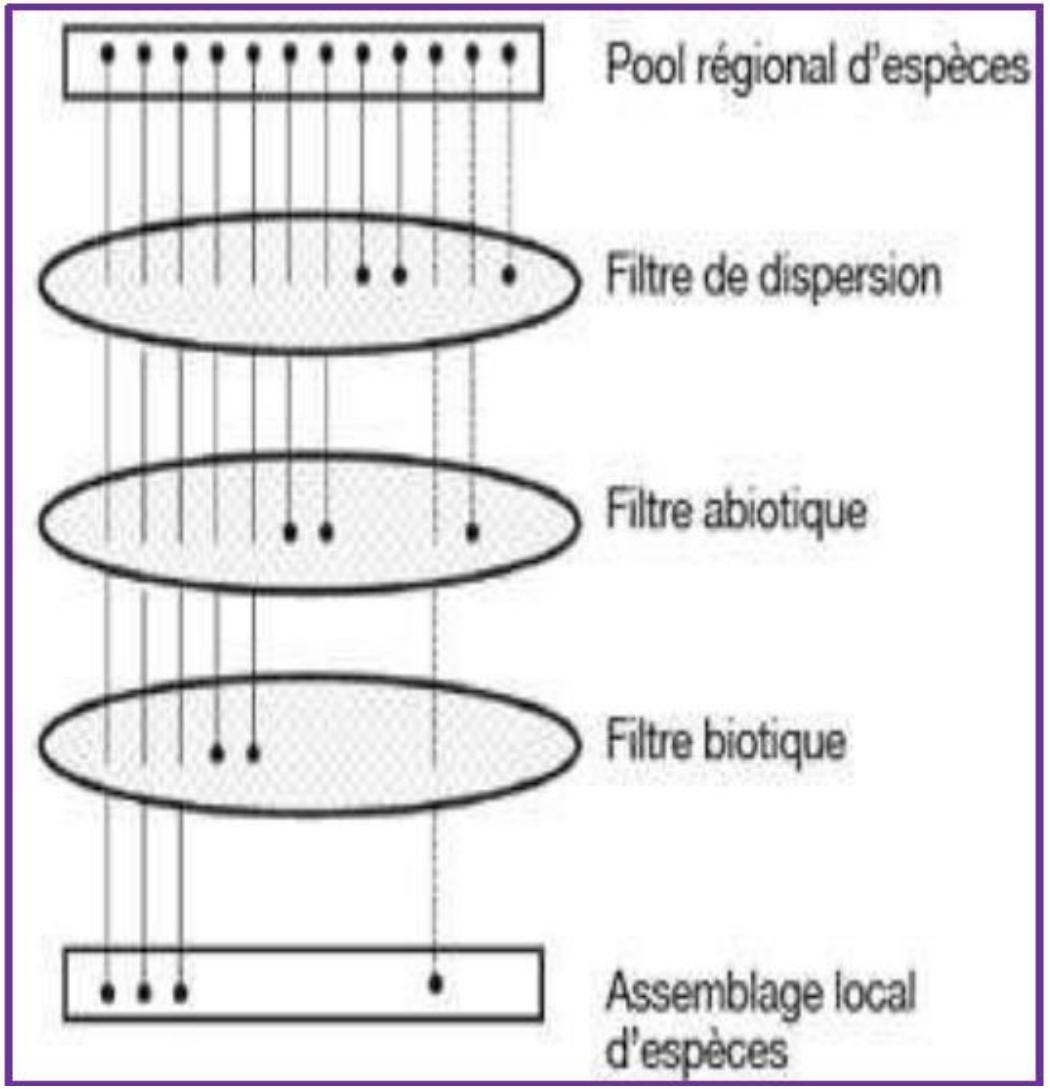
Les filtres abiotiques sont des filtres qui englobent les paramètres relatifs au climat (gradient de température, de pluviométrie) et aux caractéristiques du substrat (fertilité du milieu, disponibilité en eau, toxicité). Ce sont des filtres qui déterminent si une espèce donnée peut ou non tolérer et coloniser le milieu selon les conditions en place.

- En général, les premières interventions d'un projet de restauration écologique visent à se rapprocher des conditions abiotiques de l'écosystème de référence (restauration du régime hydrique, dépollution, réduction des excès en nutriments dans le sol, etc).
- En restaurant les conditions physico-chimiques propres à un écosystème, les espèces cibles sont susceptibles de retrouver dans le site restauré des conditions propres à leur niche écologique fondamentale.
- Toutefois, les conditions abiotiques nécessaires à une espèce peuvent grandement varier au cours de son ontogenèse (développement de l'individu depuis l'œuf jusqu'au stage adulte). Ceci est bien connu pour le règne animal, mais s'applique également au règne végétal. Grubb (1977) a suggéré que pour de nombreuses espèces végétales, la période du cycle de vie définissant la niche réalisée de l'espèce soit la période s'étalant de la germination à l'établissement de l'espèce.
- La niche adulte étant souvent plus large que la niche de recrutement. Ceci induit que les efforts de restauration doivent tenir compte de cette ontogénie de l'habitat, en restaurant les conditions propices au développement des différents stades de vie d'une espèce, mais également en assurant une connectivité suffisante entre les différents microhabitats utilisés par l'espèce.
- La non considération de cette notion de niches ontogéniques peut déboucher sur la mise en place de populations non-recrutantes. Ceci s'observe lorsque les limites déterminées par la niche de recrutement sont dépassées.
  - ✓ **Exemple:** Plantation d'individus dans des sites où de jeunes individus et des adultes peuvent persister, mais où les propagules sont incapables de germer avec succès et de s'établir « populations relictes » (Cristofoli & Mahy, 2010).

V.3.3.Les filtres biotiques (de coexistence)

- **Les filtres biotiques sont** des interactions entre espèces (règles d'assemblages selon Wilson, 1999) en particulier la compétition, les potentialités d'invasions biologiques, effets de priorités.
- Lorsqu'une espèce du pool régional parvient à franchir les filtres de dispersion (ex: arrive sur le site restauré) et n'est pas contrainte par les filtres abiotiques, son inclusion dans l'assemblage d'espèces sera déterminée par les filtres biotiques.
- Ces filtres biotiques consistent en interactions rencontrées par les espèces cibles de la restauration avec le cortège d'espèces liées au site (ex:espèces présentes sur le site ou pouvant y avoir un quelconque effet). La compétition interspécifique, les relations trophiques et les « espèces nexus » en sont les exemples classiques.

- **Les espèces nexus sont des espèces** pouvant n'apparaitre que transitoirement dans la trajectoire de restauration et de développement d'une communauté, mais dont la présence ou l'absence se répercute par des effets à long terme importants. À titre d'exemple, *Lotus purshianus* (Benth.) Clem. & Clem., espèce transitoire des plaines fluviales,fixe l'azote. La dénitrification qui en résulte initie des modifications dans la dynamique des espèces.
- **L'idée des « ingénieurs écologiques » est similaire** : Il s'agit d'espèces dont l'activité peut créer des structures profitant à l'activité d'autres espèces. Favoriser ces espèces lors du processus de restauration peut ainsi faciliter et améliorer la colonisation par des espèces cibles. Comme le soulignait Poff (1997), il est important de quantifier la nature des filtres biotiques, mais dans la majorité des cas, l'exercice n'est pas aisé.
- Fattorini et al.(2004) ont introduit la notion de filtres dynamiques. De par les interactions mutuelles et continues entre les filtres en jeu lors du processus de restauration, les effets respectifs des filtres sont plus ou moins contraignants vis-à-vis du pool d'espèces.
- En étudiant un écosystème rivulaire, Fattorini et al. ont considéré la suppression des forces de dégradation de l'écosystème et donc la diminution du stress environnemental comme un élargissement des mailles du filtre abiotique permettant ainsi l'établissement d'un plus grand nombre d'espèces cibles.
- Toutefois, avec ce nombre croissant d'espèces, la compétition pour les ressources augmentait, entrainant un rétrécissement des mailles du filtre biotique. De façon similaire, l'arrivée d'une espèce sur le site restauré peut en modifier les conditions et donc le filtre abiotique (Cristofoli & Mahy, 2010).
- Selon leurs traits d'histoire de vie propres, les espèces constituant le pool régional d'espèces seront capables ou non de passer à travers les mailles des différents filtres et ainsi de se retrouver ou être absentes de l'assemblage locale d'espèces sur un site restauré.
- Les filtres écologiques permettent donc d'aborder les interactions intra/inter-spécifiques, les relations trophiques, la disponibilité en propagules (et en particulier



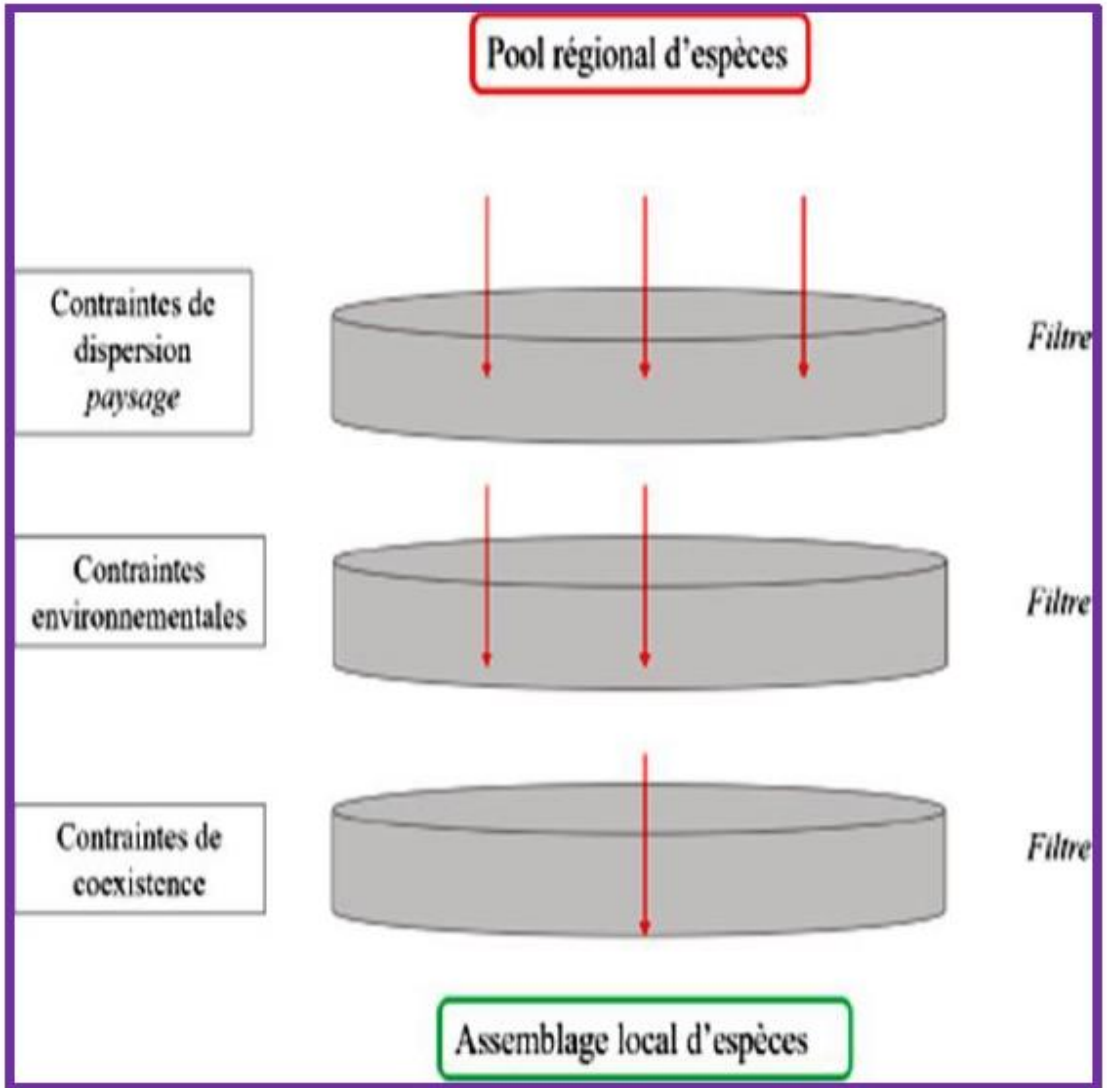


Figure 19: Représentation schématique des filtres écologiques conduisant à la formation d'une communauté locale d'après Keddy(1992).

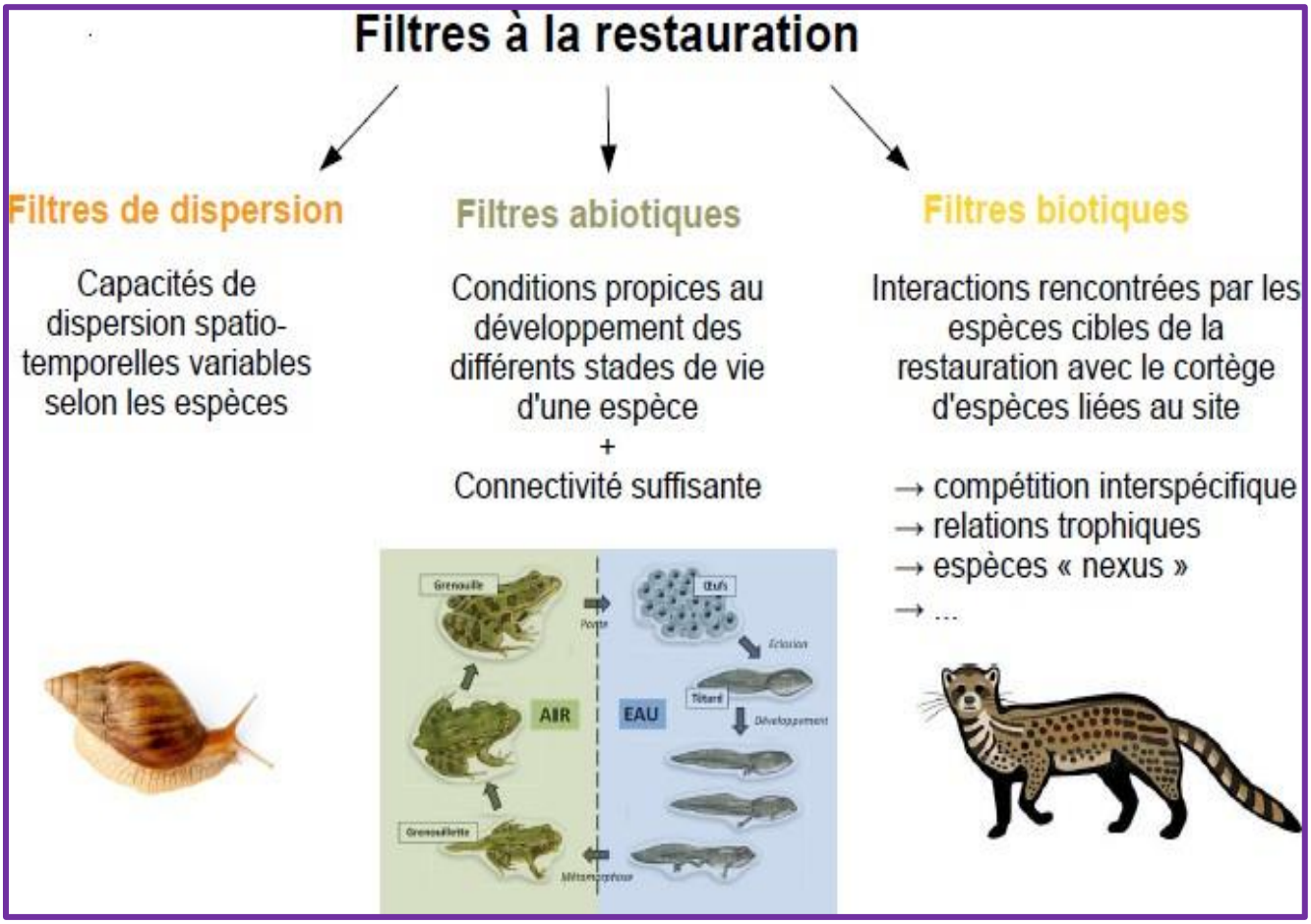


Figure 20 : les filtres à la restauration écologiques

V.4.Evaluation de la réussite d'un projet de restauration écologique

Dans tout projet de restauration, il est important de définir des objectifs clairs et précis. Ces objectifs peuvent être définis à différentes échelles écologiques : populations, communautés, processus écologiques et services de l'écosystème. Le suivi des restaurations est essentiel pour en évaluer le succès et évaluer la réalisation de leurs objectifs. Malheureusement, un suivi insatisfaisant des projets de restauration est assez récurrent (Lake, 2001).

V.4.1. Attributs d'une restauration écologique réussie

Avant de quantifier la réussite d'une restauration écologique, il convient de préciser ce qu'est une restauration considérée comme réussie. Selon l'International Primer on Ecological Restoration (SER,2004),un écosystème s'est régénéré(restauré), lorsqu'il possède les neuf attributs suivants :

- **i.** l'écosystème restauré contient un ensemble caractéristique d'espèces de l'écosystème de référence qui procure une structure communautaire appropriée,
- **ii.** L'écosystème restauré est constitué par la plupart d'espèces indigènes. Dans les écosystèmes culturels restaurés, des concessions peuvent être faites pour des espèces exotiques domestiquées et pour des espèces rudérales et ségétales non invasives ayant vraisemblablement coévolué avec elles. **Les rudérales** sont des plantes qui colonisent les sites perturbés tandis que **les ségétales** poussent typiquement en association avec des cultures.

iii. 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 manquant ont la capacité à le coloniser naturellement,
iv. 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,
v. l'écosystème restauré fonctionne en apparence normalement lors de sa phase écologique de développement et les signes de dysfonctionnement sont absents,
vi. 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,
vii. les menaces potentielles du paysage alentour sur la santé et l'intégrité de l'écosystème restauré ont été éliminées ou réduites autant que possible,
viii. l'écosystème restauré est suffisamment résilient pour faire face à des évènements normaux de stress périodiques de l'environnement local, ce qui sert à maintenir l'intégrité de l'écosystème,
ix. 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.

Cependant, les aspects de sa biodiversité, de sa structure et de son fonctionnement peuvent changer au cours de l'évolution normale d'un écosystème et peuvent fluctuer en réponse à des évènements normaux de stress périodiques et à des perturbations occasionnelles de plus grande importance. Comme dans n'importe quel écosystème intact, la composition spécifique ainsi que les autres attributs d'un écosystème restauré peuvent évoluer si les conditions environnementales changent.

D'autres attributs sont pertinents et devraient être ajoutés à cette liste s'ils sont identifiés comme étant des objectifs d'un projet de restauration. Par exemple, un des buts de la restauration pourrait être de fournir durablement des biens et services naturels spécifiques pour un intérêt social. A cet effet, l'écosystème restauré sert de capital nature pour le compte de ces biens et services. Un autre but de l'écosystème restauré pourrait être de procurer un habitat pour des espèces rares ou d'abriter un pool génétique varié d'espèces sélectionnées. Un autre but possible de la restauration pourrait inclure le financement d'équipements esthétiques ou d'hébergement pour des activités sociales, comme le renforcement d'une communauté à travers la participation des individus à un projet de restauration.

V.4.2. Quantification de la réussite d'une restauration à l'aide d'indicateurs

Différentes stratégies permettent l'évaluation de la réussite d'une restauration :

i. l'atteinte des objectifs peut être quantifiée par rapport aux attributs spécifiques de sites de référence (Hobbs et al., 1996), ou par rapport à de l'information de référence de source historique ou contemporaine (White et al., 1997) ;
ii. une estimation du degré selon lequel les différents attributs d'un site restauré sont atteints ;

iii. l'analyse de la trajectoire se base sur des indicateurs relevés périodiquement sur le site restauré et permet de vérifier la bonne trajectoire du site, dans la direction de la référence. Dans tous les cas, un « bon » indicateur répond à plusieurs critères :

- Facile à mesurer et relativement peu couteux,
- Ne pas présenter de difficultés taxonomiques ou de difficultés de mesures,
- Etre sensible aux mesures de restauration, *i.e.* possibilité d'être inclus directement dans les hypothèses à tester (Keddy, 1999). La caractérisation des indicateurs qui, au vu des objectifs de restauration fixés, permettent d'évaluer la représentativité et la fonctionnalité du cortège d'espèces de l'écosystème restauré (*i.e.* évaluation des attributs 1-3). Classiquement, l'évaluation biotique d'une restauration repose soit sur une approche « espèce », soit sur une approche « communauté ».

✓ **Approche espèce :** L'approche espèce fait référence à une espèce cible de la restauration, souvent rare ou menacée, ou un groupe restreint de telles espèces (Simberloff, 1988 ; Brussard, 1991). Les indicateurs concernent, dans ce cas, directement l'état de la (les) population(s) (nombre d'individus, démographie, diversité génétique, etc.). Bien que son utilisation se justifie dans le cadre de suivi de projets de restauration visant explicitement une espèce en particulier, l'approche espèce 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 (Franklin, 1993). Ces mêmes critiques suggéraient des approches considérant des niveaux d'organisation supérieurs tels que les écosystèmes ou les paysages (Noss, 1983 ; Salwasser, 1991). De ces critiques, est né le concept **d'espèces parapluie** (Frankel et al., 1981 ; Caro, 2003). Il s'agit d'espèces dont les exigences importantes sont supposées englober les exigences moins étendues d'un ensemble d'espèces. Ainsi, les espèces parapluie permettent d'appréhender la réponse de toute une série d'espèces face aux mesures de restauration, tout en conservant l'avantage (économique et main-d'œuvre) d'une collecte de données restreinte, puisque ne concernant qu'une espèce. Toutefois, Franklin (1994) souligne que des évaluations (et plus généralement des stratégies de conservation), centrées sur une espèce, même parapluie, peuvent passer à côté d'autres aspects critiques de l'écosystème dans lequel l'espèce se développe. La notion d'espèce parapluie reste utile mais devrait dès lors être inclue dans une approche multi-taxonomique identifiant un ensemble d'espèces (focales) dont les exigences spatiales, compositionnelles et fonctionnelles comprennent les exigences de toutes les autres espèces d'une région (Lambeck, 1997).

✓ **Approche communauté :** De son côté, l'approche communauté est supposée saisir l'intégrité, la diversité et la vulnérabilité d'une communauté donnée (Lambeck, 1997 ; Soulé et al., 2001). Des indicateurs classiques en sont la diversité et la richesse spécifique, souvent mises en relation avec les patrons paysagers (Saunders et al., 1991 ; Angelstam, 1992).

La richesse spécifique est le nombre d'espèces correspondant à un nombre d'individus (ou une biomasse) donnés ou à une superficie donnée (Magurran, 2004). Notons qu'un problème lié aux estimateurs de richesse spécifique est leur dépendance vis-à-vis de l'effort d'échantillonnage, rendant notamment difficile la comparaison des richesses spécifiques entre études (Gaston, 1996). Certains indices permettent toutefois de remédier à ce problème (*e.g.* Clifford et al., 1975). 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 (New, 1997 ; Tscharntke 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 les différents compartiments de la richesse spécifique. 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). Dans le cadre d'une approche communauté, l'aspect multitaxonomique trouve également son intérêt. Le recours à des indicateurs de suivi et d'évaluation répondant à différentes échelles temporelles est préférable pour une évaluation pertinente à long terme. En effet, différents taxons répondent à des vitesses diverses aux modifications environnementales liées à la restauration. Dans un projet de restauration de rivière, Trexler (1995) avait estimé la réponse des végétaux aquatiques à 3-8 ans, celle des invertébrés à 10-12 ans et celle des poissons à 12-20 ans. De telles différences de récupération par les différents taxons doivent être prises en compte et se refléter par un choix judicieux des différents indicateurs d'évaluation.

Dette d'extinction et crédit de colonisation. Une fois les données de suivi collectées et les différents indices d'évaluation de l'écosystème restauré calculés, il convient de garder à l'esprit ce fait que certaines espèces répondent presque immédiatement aux modifications environnementales, alors que d'autres réagiront avec un certain délai. Deux situations de déséquilibre peuvent ainsi apparaitre. Du fait de relations bien établies entre la richesse spécifique et les propriétés spatiales (surface, connectivité, effet lisière, etc.) d'un fragment d'habitat (*e.g.* Rosenzweig, 1995 ;Bastin et al., 1999;Bruun,2000), on peut théoriquement déterminer la richesse spécifique attendue dans ce fragment, pour un paysage donné. Toutefois, le délai de réponse des espèces peut résulter en un surplus d'espèces par rapport à la situation d'équilibre ; il s'agit d'espèces persistant dans le fragment, alors que leurs exigences ne sont plus rencontrées, et

donc vouées à s'éteindre localement dans un avenir plus ou moins proche selon leur délai de réponse. Ce phénomène est connu sous le terme de dette d'extinction (Tilman et al.,1994) et concerne principalement des situations de dégradation d'habitat telles que la fragmentation. À l'inverse, lorsque la situation spatiale d'un fragment d'habitat est « améliorée » (restauration par augmentation de la surface ou de la connectivité), un crédit de colonisation peut être observé et est défini comme le nombre d'espèces dont une colonisation future est attendue (Cristofoli et al.,2009). Ces deux phénomènes ont des implications importantes en termes de conservation. Une dette d'extinction, à l'inverse d'un crédit de colonisation, peut mener à surestimer la richesse spécifique à long terme et de ce fait, à une sous-estimation du niveau de menace pesant sur les espèces (Hanski et al., 2002).

V.5. Facteurs pris en compte lors de la conception d'un projet adéquat de restauration:

La conception d'un projet adéquat prendra en compte, dans la mesure du possible, les éléments suivants :

V.5.1. Expertise pertinente

- Choix des collaborations et des partenaires, s'il y a lieu, en fonction des besoins du projet;
- Diversité et expérience des professionnels : biologiste, ingénieur, architecte-paysagiste, chercheur universitaire, ingénieur, hydrogéomorphologue, etc.

V.5.2. Objectifs du Projet

2.1 Objectifs généraux

- Gains attendus en superficie;
- Gains attendus en fonctions écologiques selon le type de milieu restauré ou créé. Par exemple : filtre contre la pollution, rempart contre l'érosion, rétention des sédiments, régulation du niveau d'eau (réduction des risques d'inondation, etc.), conservation de la biodiversité, écran solaire, brise-vent naturel, séquestration du carbone, atténuation des impacts des changements climatiques et qualité du paysage, amélioration de l'état hydromorphologique, de la connectivité et de l'hétérogénéité des habitats. D'autres fonctions écologiques spécifiques à chaque projet peuvent également être mises de l'avant;
- Objectifs distinctifs des différentes approches possibles (restauration passive ou active, création);
- Objectifs distinctifs des milieux humides et des milieux hydriques;
- Objectifs en ce qui concerne les composantes : végétation, sol, hydrologie et équilibre dynamique, etc.

2.2 Objectifs particuliers

- Réponse à des enjeux régionaux ou locaux (diminution du risque d'inondation, restauration des types de milieux perdus sur le territoire, augmentation de la qualité de l'eau ou des débits d'étiage, retour d'une espèce menacée ou vulnérable, atténuation des changements climatiques, etc.);
- Objectif de taille et de type de milieu selon les fonctions écologiques recherchées;
- Identification des indicateurs des objectifs particuliers du projet;
- Prise en compte des changements climatiques dans la conception du projet (voir les Fiches synthèses régionales d'adaptation aux changements climatiques [Ouranos, MAMH et MSP, 2020]).

V.5.3. Localisation et choix du Site

3.1 Choix du bassin versant et fonctions écologiques

- Priorisation pour réaliser les travaux de restauration ou de création dans le même bassin versant que celui où ont eu lieu les pertes de milieux humides et hydriques :
  - Directement sur le site même du projet portant atteinte aux milieux (*in situ*);
  - Sur un terrain adjacent du projet portant atteinte aux milieux (*ex situ*);
  - Sur un site situé dans le même bassin versant (de niveau approprié) que celui où est situé le projet portant atteinte aux milieux;
- Localisation du site dans le bassin versant en fonction des gains attendus en fonctions écologiques.

3.2 Contexte régional et local

- Utilisation d'outils de planification régionale pour choisir le meilleur site (plans régionaux des milieux humides et hydriques, plans de conservation des milieux humides, plan de gestion intégrée du Saint-Laurent, plan directeur de l'eau, plan de gestion intégrée régional, plan de développement de la zone agricole, cadre de référence hydrologique du Québec, Atlas des territoires d'intérêt pour la conservation dans les basses-terres du Saint-Laurent, etc.);
- Présence d'une bande tampon autour des milieux restaurés ou créés, présence d'un corridor de connectivité entre les milieux restaurés ou créés et le milieu naturel, type d'occupation du sol, utilisation future des terres environnantes, pressions environnantes, dynamique fluviale, etc.;
- Localisation dans le bassin versant, topographie du site, nature des dépôts de surface, classe de drainage, accès à l'eau souterraine, connectivité au réseau hydrographique, ruissellement, qualité environnementale des sols, perméabilité et texture des sols, présence d'une banque de semences, faisabilité technique.

3.3. Identification de sites potentiels et évaluation de leur pertinence

- Identification de sites potentiels et évaluation de leur pertinence (besoins spatiaux et écologiques en restauration, contraintes environnementales et socioéconomiques, viabilité des projets potentiels;
- Priorisation des sites à restaurer : localisation, besoins de restauration et potentiel offert par le site, avantages et inconvénients environnementaux, gains

attendus en superficies et en fonctions écologiques, usages permis par la municipalité;
- Disponibilité du site (lettre d'entente avec le propriétaire, preuve d'achat ou de propriété, etc.)
- Appui de la MRC((**M**unicipalité **R**égionale de **C**omté);
- Identification des autorisations requises;
- Cartes complètes à différentes échelles qui superposent le plus possible les différentes composantes : localisation des milieux affectés et de ceux qui seraient restaurés ou créés, superficies, type de milieux, délimitation des bassins versants, position topographique du **Cadre écologique de référence** du Ministère, réseau hydrographique, réseau routier, limites municipales, éléments sensibles, aires protégées, superficie et proportion (%) de milieux humides et hydriques restants dans le bassin versant, etc.

V.5.4.Description du site et diagnostic environnemental

4.1 Méthodologie utilisée pour la description du site et la caractérisation des milieux

- Le Ministère recommande d'utiliser minimalement les documents suivants :
  - Identification et délimitation des milieux humides du Québec méridional (Lachance, Fortin et Dufour Tremblay, 2021),
  - Identification et délimitation des milieux hydriques et riverains (MDDELCC, 2015);
  - Lignes directrices sur le calcul de la contribution financière exigible à titre de compensation pour l'atteinte aux milieux humides et hydriques (MELCC, 2021a);
- D'autres sources sont présentées dans le document Les milieux humides et hydriques–L'analyse environnementale (MELCC, 2021b).

4.2 Description des milieux où sont projetés les travaux

- Tous les types de milieux :
  - Caractérisation écologique des milieux naturels : portrait actuel des milieux, délimitation, identification, niveau de dégradation;
  - Caractéristiques générales des milieux humides et hydriques présents sur le site: superficie, position et rôle dans le bassin versant, type de milieu, fonctions écologiques des milieux;
  - État naturel avant perturbation, pour autant qu'on puisse en juger à l'aide de cartes ou d'inventaires passés ou de photos aériennes d'époque (en l'absence de données historiques, un écosystème similaire, c.-à-d. même type de milieu, même valeur écologique, etc., se trouvant dans le même contexte régional (pressions anthropiques similaires, etc.) peut servir de site pour la description de l'état passé);
  - Compréhension de l'historique et de l'évolution du site;
  - Pressions, perturbations, causes de dégradation du milieu, besoins écologiques en restauration, potentiel de restauration ou de création;
  - Végétation et communautés naturelles (épaisseur de la tourbe et degré de décomposition, espèces dominantes, densité du couvert végétal, etc.);
  - Sol (pH, conductivité hydraulique, etc.);
  - Hydrologie et hydrogéologie (hauteur de la nappe phréatique, connexion entre

les eaux souterraines et de surface, débits, etc.);
- Dynamique et état hydrogéomorphologique;
- Éléments sensibles : habitats fauniques, habitat du poisson, aires protégées, espèces menacées, vulnérables ou susceptibles d'être ainsi désignées, etc.;
- Espèces fauniques présentes (communes et rares) et état de la continuité écologique;
- Espèces exotiques envahissantes, bande tampon, milieu environnant, utilisation du sol, etc.;
- Études préliminaires: photographies du milieu actuel, relevés topographiques, étude hydrogéomorphologique, inventaires fauniques, etc.;
- Description des indicateurs utilisés et relevés au « temps 0» avant les travaux.

V.5.5. Ecosystème de Référence

- Localisation et identification d'un ou de plusieurs milieux humides de référence servant de modèle et de cible à atteindre pour le projet de restauration ou de création :
  - Milieu humide à restaurer, s'il a pu être caractérisé avant les perturbations;
  - Milieu non dégradé à proximité;
  - Éventail des associations végétales présentes et des conditions abiotiques d'un ensemble de milieux humides d'un même type, à différents stades d'évolution, se trouvant à proximité et dans un même contexte territorial;
  - Référentiel d'un milieu hydrique reflétant un potentiel de fonctionnement en terme de processus et d'importance des services écosystémiques;
  - Identification et documentation d'un ensemble d'écosystème de référence identification des indicateurs qui seront également utilisés pour la description du site et le suivi du projet de restauration.

V.5.6. Acceptabilité Sociale

- Consultations publiques ou ciblées :
  - Optimisation du choix des sites de restauration et de création;
  - Adaptation des travaux aux réalités du terrain;
  - Prise en considération des préoccupations de la population, des usagers et des communautés autochtones;
- Aménagements de sentiers, points de vue ou autres installations pour favoriser l'accès public;
- Participation publique à la prise de décision ou à des comités de suivi, etc.;
- Démarches participatives (L'Atelier Social, 2021).

V.5.7.Conception du projet et description des travaux

- Nature des interventions requises pour chacun des objectifs du projet;
- Aménagement de panneaux de sensibilisation et de passerelles non imperméabilisées pour les sites où des utilisateurs peuvent faire pression sur le milieu;
- Description préliminaire des travaux :
  - Activités préparatoires au terrain (délimitation des milieux, aménagement de

chemins d'accès, etc.);
  - Travaux de restauration ou de création : besoins de démolition d'infrastructures, remise en place de la topographie et du drainage, matériaux et types de plantation envisagés, présence d'espèces exotiques envahissantes et de canaux de drainage, etc.;
  - Plans sommaires, schémas conceptuels, esquisses illustrant le milieu actuel, interventions prévues de manière conceptuelle et superficies en question;
- Description détaillée des travaux :
  - Personne et firme responsables des travaux et de la surveillance du chantier;
  - Plans et devis, entre autres :
    - ✓ Plan de démolition des infrastructures;
    - ✓ Plan de la topographie et du drainage à mettre en place;
    - ✓ Sites de dépôts des matériaux retirés;
    - ✓ Type de machinerie utilisé;
    - ✓ Matériaux utilisés (géotextile, types de substrat, importation de sols arables, etc.);
    - ✓ Plan de plantation (liste des espèces par strate, quantité, positionnement, espacement, méthode de plantation, etc.);
    - ✓ Localisation et méthode de gestion des espèces exotiques envahissantes;
    - ✓ Localisation des canaux de drainage à bloquer et méthode appliquée;
    - ✓ Localisation des relevés topographiques et des piézomètres.

V.5.8. Minimisation

- Efforts de minimisation des impacts sur les milieux lors de la réalisation des travaux (p. ex., circulation de la machinerie)
  - Plan de gestion des espèces exotiques envahissantes, des sédiments, des matières résiduelles, des déblais et des remblais, etc.;
  - Circulation de la machinerie;
  - Période de réalisation des travaux;
  - Autres (voir le document Les milieux humides et hydriques – L'analyse environnementale (MELCC, 2021b).

V.5.9. Suivi et indicateurs

9.1 Choix des indicateurs

- Indicateurs centrés sur les objectifs du projet (maintien de l'intégrité de la zone tampon, retour de processus physique, érosion de berge et sinuosité, etc.).
- Indicateurs mesurables, centrés sur les objectifs du projet, simples d'utilisation, utilisables à une échelle temporelle réaliste par rapport au calendrier des travaux et des suivis et sensibles aux changements environnementaux ou aux perturbations;
- Indicateurs pour l'écosystème de référence, l'état initial du milieu à restaurer ou à créer et l'évolution de l'état du milieu après les travaux;
- Mesures correctives prévues si, pour différentes raisons, les travaux ne permettent pas de répondre aux objectifs fixés;
- Collaboration possible avec une organisation expérimentée.

9.2 Indicateurs des objectifs particuliers du projet

- Végétation (recouvrement de la végétation, taux de survie, nombre d'espèces indicatrices des milieux humides et hydriques, abondance d'espèces indigènes, présence et taux d'invasion d'espèces exotiques envahissantes, degré de ressemblance avec la végétation du milieu de référence, etc.);
- Hydrologie (réponse du sol à de fortes précipitations, évaluation du contenu en eau du sol, hauteur de la nappe phréatique, indicateurs présentés dans le Guide d'identification et délimitation des milieux humides du Québec méridional (Lachance, Fortin et Dufour Tremblay, 2021), etc.);
- Sols (taux d'accumulation de la matière organique, texture, pH, classe de drainage, présence de mouchetures, etc.);
- Indicateurs biologiques (Qualitative Habitat Evolution Index (Taft et Koncelik, 2006), présence de frayères, communautés d'insectes, mollusques, crustacés et vers, indice de santé du benthos, etc.);
- État hydromorphologique (indice de qualité morphologique [IQM]).

9.3 Suivi de l'évolution du site

- Suivi avant le début des travaux et lors de la première, troisième et cinquième année après les travaux :
  - Mesures de suivi et indicateurs;
  - Mesures correctives;
  - Photographies, évaluation du type de milieu présent et de l'évolution des superficies.
- Périodes de suivi:
  - Première année: printemps et automne pour l'hydrologie;
  - Périodes d'inventaire-voir Les milieux humides et hydriques – L'analyse environnementale (MELCC, 2021b).

V.5.10.Pérennisation des milieux restaurés ou crées

- Moyen envisagé pour la protection légale à long terme des milieux restaurés ou créés :
  - Désignation sur plan (article 13 de la LCPN);
  - Conservation volontaire (L'Atelier Social, 2021) : don ou vente de propriété à des fins de conservation, réalisation de travaux dans une réserve naturelle existante, sous certaines conditions.

V.5.11.Echéancier des travaux et planification budgétaire

- Calendrier des activités :
  - Coordination, conception, réalisation des travaux, suivis et entretien;
  - Périodes prévues pour approcher les propriétaires et usagers;
  - Obtention de l'appui de la MRC et des autorisations requises;
  - Périodes sensibles pour certaines espèces.
- Planification budgétaire :
  - Montants requis pour chacune des phases des projets;

- Salaires et frais pour des spécialistes, les autorisations, les déplacements, la réalisation d'une caractérisation, la conception des plans et devis, l'acquisition de terrain, la réalisation des travaux (location ou achat de machinerie, achat de matériaux, etc.), la surveillance du chantier, les suivis, les mesures correctives, etc.).

- Modèles de calendrier des travaux et de planification budgétaire : page Web du Programme de restauration et de création de milieux humides et hydriques.

V.6. Étude de cas d'un projet de restauration écologique: Restauration écologique du bassin versant de la rivière Kanyaru (Burundi)

1. Contexte géographique et écologique

Le bassin versant de la rivière Kanyaru, situé au nord-ouest du Burundi à la frontière avec le Rwanda, couvre environ 1 500 km² du côté burundais. Il est caractérisé par un climat tropical de montagne et comprend divers écosystèmes: forêts marécageuses, forêts secondaires et savanes. Les principales activités humaines incluent l'agriculture (banane, haricot, manioc), l'élevage et l'exploitation forestière, souvent pratiquées de manière non durable.

2. Étape de planification et d'évaluation initiale

Un diagnostic écologique a révélé une érosion hydrique sévère (ravinement, glissements), une déforestation avancée (98 % des forêts originelles détruites), une pollution de l'eau (sédiments, Intrants agricoles) et une perte de biodiversité importante (disparition d'espèces forestières, avifaune menacée). Ces dégradations sont causées par la pression démographique, l'agriculture sur pente sans techniques antiérosives, l'absence de plan d'aménagement territorial, la pauvreté locale et dépendance à l'exploitation des ressources naturelles.

Les parties prenantes mobilisées incluent : les communautés locales (coopératives agricoles, comité de bassin), les ONG locales (CAPAD, ADISCO) et internationales (IUCN, GIZ), les chercheurs de l'ISABU, les autorités locales et le ministère burundais de l'Environnement, de l'agriculture et de l'élevage.

3. Définition des objectifs de restauration

Tableau 11 : Objectifs de restauration

Objectif	Description
Écologique	Restaurer la couverture végétale et réduire l'érosion
Hydrologique	Réduire le ruissellement et améliorer la recharge des nappes
Socioéconomique	Améliorer la résilience des communautés locales (agroforesterie, gestion durable)
Biodiversité	Reconstituer les habitats naturels et réintroduire des espèces indigènes

4. Conception des interventions de restauration

Les actions prévues comprennent :

- **Agroforesterie:** Plantation d'espèces à usages multiples (Agroforesterie : Calliandra, Grevillea, albizia) pour stabiliser les sols et fournir du bois.
- **Reboisement:** Plantation d'essences locales (indigenes) adaptées (Maesopsis, Croton,Markhamia).
- **Aménagements antiérosifs:** Courbes de niveau, haies vives, fossés filtrants.
- **Restauration des berges:** Plantations riveraines, interdiction des cultures proches de la rivière (à moins de 5m de la rive).
- **Éducation environnementale et participation communautaire:** Formations aux pratiques durables, sensibilisation communautaire,.
- **Suivi participatif:** Mise en place des comités villageois.

5. Mise en œuvre des interventions

De 2019 à 2024, les travaux réalisés comprennent :

- 1500 hectares reboisés avec des espèces locales et mixtes,
- 120 km de courbes de niveau avec des haies de Leucaena et vetiver,
- 30 pépinières communautaires créées,
- Réhabilitation de 20 km de berges de la rivière,
- Formation de 500 agriculteurs sur l'agroforesterie,les techniques de conservation des sols et la gestion des eaux de ruissellement.

6. Suivi et évaluation

Tableau 12 : Indicateurs de suivi-évaluation

Type	Indicateur de suivi	Évolution (2019–2024)
Végétation	Couverture végétale	+38 %
Erosion	Profondeur des ravines	-50 %
Biodiversité	Espèces d'oiseaux	+15 espèces identifiées
Hydrologie	Turbidité de l'eau en saison de pluie	Réduction de 40 %
Social	Revenus des ménages pratiquant l'agroforesterie	+20 %

7. Adaptation et amélioration continue

Les pratiques ont été ajustées en fonction du suivi :

- Adoption d'espèces plus résistantes localement,
- Création de règles villageoises pour gérer les ressources,
- Intégration de la restauration dans les plans communaux de développement.

8. Résultats et leçons apprises

- **Les résultats majeurs incluent :**
  - la stabilisation des sols sur les pentes,
  - la reconstitution/régénération progressive de la biodiversité,

- ❖ la réduction notable de la pression sur les forêts restantes,
- ❖ le renforcement de la résilience climatique des communautés,
- ❖ l'amélioration des revenus des ménages.

➢ **Leçons majeures apprises :**

- ❖ La participation communautaire est cruciale pour la pérennité des acquis,
- ❖ Les approches mixtes combinant les techniques traditionnelles et modernes sont efficaces,
- ❖ La formation continue et l'appui institutionnel soutenu les piliers de succès et garantissent la durabilité.

9. Références

- Projet GIRE Kanyaru, Rapport final (GIZ – 2024),
- IUCN (2022), Guide pratique de la restauration écologique en Afrique de l'Est,
- Ministère de l'Environnement , de l'Agriculture et de l'élevage du Burundi (MINEAGRIE),
- Entrevues avec les comités locaux (Extraits de rapport de terrain),
- ISABU (Institut des Sciences Agronomiques du Burundi).

.....Fin du Cours.....

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Alsuwaiyan N.A., Filbee-Dexter K., Vranken S., Burkholz C., Cambridge M., Coleman M.A., Wernberg T. (2022) Green gravel as a vector of dispersal for kelp restoration. *Frontiers in Marine Science*, 9: 910417. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.910417
2. Angelstam P., 1992. Conservation of communities – the importance of edges, surroundings and landscape mosaic structure. *In: Hansson L., ed.Ecological principles of nature conservation. Applications in temperate and boreal environments. London: Elsevier Applied Science, 9-70.*
3. Aronson J. & Le Floc'h E., 1996. Vital landscape attributes: missing tools for restoration ecology. *Restoration Ecol*., 4, 377-387.
4. Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C., Pintanier R. (1993b) Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems. II. Case studies in Chile, Tunisia and Cameroon. *Restoration Ecology*, 1(3): 168-187.
5. Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C., Pintanier R. (1993a) Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems. I. A view from the South. *Restoration Ecology*, 1(1): 8-17.https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1993.tb00004.x
6. Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C., Pintanier R. (1993b) Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems. II. Case studies in Chile, Tunisia and Cameroon. *Restoration Ecology*, 1(3): 168-187. https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1993.tb00023.x
7. Atkinson J. & Bonser S.P. (2020) "Active" and "passive" ecological restoration strategies in meta-analysis. *Restoration Ecology*, 28(5): 1032-1035.
8. Balmford A. et al., 2005. The convention on biological diversity's 2010 Target. *Science*, 307, 212-213.
9. Bastin L. & Thomas C.D., 1999. The distribution of plant species in urban vegetation fragments. *Landscape Ecol*., 14, 493-507. Bennett A.F., 1997. Habitat linkages: a key element in an integrated landscape approach to conservation. *Parks*, 7, 43-49.
10. Bensettiti F., Bioret F., Roland J., Lacoste J.-P. (2004) « Cahiers d'habitats » Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 2 - Habitats côtiers. MEDD/MAAPAR/MNHN. Éd. La Documentation française, Paris, 399 pp. + cédérom. https://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/tome2.pdf
11. Brussard P.F., 1991. The role of ecology in biological conservation. *Ecol. Appl*., **1**(1), 6-12.
12. Burel F. & Baudry J., 1999. *Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*.
13. Chase J.M., 2003. Community assembly: when should history matter? *Oecologia*, 136, 489-498.

14. Chazdon R.L., Falk D.A., Banin L.F., Wagner M., Wilson S.J., Grabowski R.C., Suding K.N. (2021) The intervention continuum in restoration ecology: rethinking the active–passive dichotomy. *Restoration Ecology*, e13535. https://doi.org/10.1111/rec.13535

15. Chenot J. (2018) Réhabilitation écologique d'écosystèmes dégradés par l'exploitation des carrières : faire avec, refaire ou laisser faire la nature ? Thèse de doctorat en Sciences de la vie, Université d'Avignon, 356 pp. https://hal.ird.fr/tel-02070639/.

16. Commission européenne (2022a) Proposal for a regulation of the European parliament and of the council on nature restoration. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022PC0304

17. Commission européenne (2022b) ANNEXES to the proposal for a regulation of the European parliament and of the council on nature restoration. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f1bf6981-f62c-11ec-b976-01aa75ed71a1/language- en/format-PDF

18. Commission européenne et Parlement européen (2024) AMENDMENTS BY THE EUROPEAN PARLIAMENT to the Commission proposal -REGULATION (EU) 2024/… OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL - of … - on nature restoration and amending Regulation (EU) 2022/869. (Version du texte retenue par le Parlement le 27.02.2024)

19. Cristofoli S. et al., 2009. Colonization credit in restored wet heathlands. *Restoration Ecol*., doi: 10.1111/j.1526-100.2008.00495.x., in press.

20. Directive 2008/56/EC ("DCSMM 2008/56/EC") of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). Official Journal of the European Union, L164: 119-140. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0056

21. Directive 92/43/EEC ("DHFF 92/43/EEC") of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. Official Journal of the European Union, L206: 7-50. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:01992L0043-19920610

22. Entrevues avec les comités locaux (Extraits de rapport de terrain),

23. Eriksson O. & Ehrlén J., 2001. Landscape fragmentation and the viability of plant populations. *In:* Silvertown J. & Antonovics J., eds. *Integrating ecology and evolution in a spatial context*. Oxford, UK: Blackwell Publications, 157-175.

24. Eriksson O., 1996. Regional dynamics of plants: a review of evidence for remnant, source-sink and metapopulations. *Oikos*, 77,248-258.

25. FAO, IUCN CEM, SER (2021) Principles for ecosystem restoration to guide the United Nations Decade 2021–2030. FAO, Rome, 21 pp.

26. FAO, IUCN CEM, SER (2021) Principles for ecosystem restoration to guide the United Nations Decade 2021–2030. FAO, Rome, 21 pp. https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb6591en/

27. Frankel O.H. & Soulé E., 1981. *Conservation and evolution*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. Franklin J.F., 1993. Preserving biodiversity: species, ecosystems or landscapes? *Ecol. Appl*., **3**, 202-205.

28. Gann G.D., McDonald T., Walder B., Aronson J., Nelson C.R., Jonson J., Hallett J.G., Eisenberg C., Guariguata M.R., Liu J., Hua F., Echeverría C., Gonzales E., Shaw N., Decleer K., Dixon K.W. (2019).International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1): S1-S46.

29. Gann G.D., McDonald T., Walder B., Aronson J., Nelson C.R., Jonson J., Hallett J.G., Eisenberg C., Guariguata M.R., Liu J., Hua F., Echeverría C., Gonzales E., Shaw N., Decleer K., Dixon K.W. (2019) International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1): S1-S46. https://doi.org/10.1111/rec.13035

30. Gaston K.J., 1996. Spatial covariance in the species richness of higher taxa. *In:* Hochberg M.E., Clobert J. & Barbault R., eds. *Aspects of the genesis and maintenance of biological diversity*. Oxford, UK: Oxford University Press, 221-242.

31. Godron M. & Forman R.T.T., 1983. Landscape modification and changing ecological characteristics. *In:* Mooney H.A. & Godron M., eds.

32. Grubb P., 1977. The maintenance of species richness in pant communities: the importance of the regeneration niche. *Bot. Rev*., **52**, 107-145. Hanski I., 1998. Metapopulation dynamics. *Nature*, **396**(5), 41-49.

33. Hanski I. & Simberloff D., 1997. The metapopulation approach: its history, conceptual domain, and application to conservation. *In:* Hanski I.A. & Gilpin M.E., eds. *Metapopulation biology*. San Diego, CA, USA: Academic Press, 5-25.

34. Harrisson S. & Bruna E., 1999. Habitat fragmentation and large-scale conservation: what do we know for sure? *Ecography*, **22**, 225-232.

35. 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. *J. Biogeogr*., **32**, 2069-2081.

36. Hobbs R.J. & Norton D.A., 2004. Ecological filters, thresholds, and gradients in resistance to ecosystem reassembly. *In:* Temperton V.M., https://doi.org/10.1046/j.1442-8903.2001.00074.x.
https://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/tome2.pdf
https://sfecologie.org/regard/r37-hysteresis-sonia-kefi/
https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0220-AM-137-137_EN.pdf 41.
https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb6591en/.#

37. ISABU (Institut des Sciences Agronomiques du Burundi).

38. IUCN (2022), Guide pratique de la restauration écologique en Afrique de l'Est,

39. Jones H.P., Jones P.C., Barbier E.B., Blackburn R.C., Rey Benayas J.M., Holl K.D., McCrackin M., Meli P., Montoya D., Moreno Mateos D. (2018) Restoration and repair of Earth's damaged ecosystems. *Proceedings of the Royal Society B*, 285: 20172577.

40. Jones H.P., Jones P.C., Barbier E.B., Blackburn R.C., Rey Benayas J.M., Holl K.D., McCrackin M., Meli P., Montoya D., Moreno Mateos D. (2018) Restoration and repair of Earth's damaged ecosystems. *Proceedings of the Royal Society B*, 285: 20172577.https://doi.org/10.1098/rspb.2017.2577

41. Keddy P.A., 1999. Wetland restoration: the potential for assembly rules in the service of restoration. *Wetlands*, **19**, 716-732.

42. Keenleyside K.A., Dudley N., Cairns S., Hall C.M., S. Stolton (2013) Restauration écologique pour les aires protégées: Principes, lignes directrices et bonnes pratiques. Gland, Suisse : UICN. x + 120pp https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/PAG-018-Fr.pdf

43. Kéfi S. (2012) Des écosystèmes sur le fil : comment certains écosystèmes basculent d'un état à un autre. Institut des Sciences de l'Evolution (ISEM), Regard R37 édité par Anne Teyssèdre, Société Française d'Ecologie. https://sfecologie.org/regard/r37-hysteresis-sonia-kefi/

44. Krauss J., Steffan-Dewenter I. & Tscharntke T., 2003. How does landscape context contribute to effects of habitat fragmentation on diversity andpopulation density of butterflies? *J. Biogeogr*., 30,889-900.

45. Krishnan A. & Osuri A.M. (2023) beyond the passive–active dichotomy: aligning research with the intervention continuum framework of ecological restoration. *Restoration Ecology*, 31(4): e13828. https://doi.org/10.1111/rec.13828

46. La Rivière M., Aish A., Gauthier O., Grall J., Guérin L., Janson A.-L., Labrune C., Thibaut T., Thiébaut E. (2015) Méthodologie pour l'évaluation de la sensibilité des habitats benthiques aux pressions anthropiques. Rapport SPN 2015-69. MNHN, Paris, 52 pp. https://inpn.mnhn.fr/docs/sensibilite/SPN_2015_69_La_Riviere_et_al_2015_Methodologie_Sensibilite_MNHN.pdf

47. Lake P.S. (2001) On the maturing of restoration: linking ecological research and restoration. *Ecological Management & Restoration*, 2(2): 110-115.https://doi.org/10.1046/j.1442-8903.2001.00074.x

48. Lake P.S., Bond N. & Reich P., 2007. Linking ecological theory with stream restoration. *Freshwater Biol*., 52(4), 597-615.

49. Lambeck R.J., 1997. Focal species: a multi-species umbrella for nature conservation. *Conserv. Biol*., 11(4), 849-856.

50. Lavorel S., Mcintyre S., Landsberg J. & Forbes T.D.A., 1997. Plant functional

classifications: from general groups to specific groups based onresponse to disturbance. *Trends Ecol. Evol*., 12, 474-478.

51. Le Floc'h E. & Aronson J. (1995) Écologie de la restauration. Définition de quelques concepts de base. *Natures Sciences Sociétés*, 3: S29-S35. https://doi.org/10.1051/nss/199503s029

52. Le Floc'h E. & Aronson J., 1995. Écologie de la restauration. Définition de quelques concepts de base. *Nat. Sci. Soc*., 3, 29-35. Leck M.A., Parker V.T. & Simpson R.L., 1989. *Ecology of soil seed banks*. San Diego, CA, USA: Academic Press Inc.

53. Lenfant P., Gudefin A., Fonbonne S., Lecaillon G., Aronson J., Blin E., Lourie S.M., Boissery P., Loeuillard J.-L., Palmaro A., Herrouin G., Person J. (2015) Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée. Orientations et principes. 98 pp. https://www.restauration-ecologique.com/_files/ugd/bed0fd_1ab8e28f1a294acca227bad98c22e493.pdf

54. LENZ (R.), HABER (W.). — Approaches for restoration of forest ecosystems in northeastern Bavaria. — *Ecological Modelling*, vol. 63, 1992, pp. 299-317.

55. Levins R., 1969. Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control. *Bull. Entomol. Soc. Am*., 15, 236-240.

56. Lockwood J.L. & Samuels C.L., 2004. Assembly models and the practice of restoration. *In:* Temperton V.M., Hobbs R.J., Nuttle T. & Halle S., eds.*Assembly rules and restoration ecology: bridging the gap between theory and practice*. Washington, DC, USA: Island Press, 34-54.

57. Lortie C.J. et al., 2004. Rethinking plant community theory. *Oikos*, 107(2), 433-438.4/27/25, 11:44 PM.

58. Maciejewski L., Lepareur F., Viry D., Bensettiti F., Puissauve R., Touroult J. (2016) État de conservation des habitats : propositions de définitions et de concepts pour l'évaluation à l'échelle d'un site Natura 2000. *Revue d'Écologie (Terre et Vie)*, 71(1): 3-20.https://hal.science/hal-03530365

59. Madgwick F.J. & Jones T.A., 2002. Europe. *In:* Perrow M.R. & Davy A.J., eds. *Handbook of ecological restoration. Principles of restoration. Vol. 2*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 32-56.

60. Magurran A.E., 2004. *Measuring biological diversity*. Cornwall, ON, Canada: Blackwell Publishing.

61. Maurer K., Durka W. & Stöcklin J., 2003. Frequency of plant species in remnants of calcareous grassland and their dispersal and persistencecharacteristics. *Basic Appl. Ecol*., 4(4), 307-316.

62. Mc CHESNEY (C.J.), KOCH (J.M.), BELL (D.T.). — Jarrah forest restoration in western Australia : canopy and topogra- phic effects. — *Restoration Ecology*, vol. 3, n° 2, 1995, pp. 105-110.

63. McKay J., Christian C., Harrison S.P. & Rice K.J., 2005. How local is local? A review

of practical and conceptual issues in the genetics of restoration.*Restoration Ecol*., 13(3), 432-440.

64. Ministère de l'Environnement , de l'Agriculture et de l'élevage du Burundi (MINEAGRIE),

65. New T.R., 1997. Are the Lepidoptera an effective "umbrella group" for biodiversity conservation? *J. Insect Conserv*., 1, 5-12. Noss R.F., 1983. A regional landscape approach to maintain biodiversity. *Bioscience*, 33, 700-706.

66. Noss R.F., 1983. A regional landscape approach to maintain biodiversity. *Bioscience*, 33, 700-706.

67. on nature restoration and amending Regulation (EU) 2022/869. (Version du texte retenue par le Parlement le 27.02.2024) https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0220-AM-137-137_EN.pdf

68. Ouborg N.J., 1993. Isolation, population size and extinction: the classical and metapopulation approaches applied to vascular plants along the DutchRhine-system. *Oikos*, 66, 298-308.

69. Poff N.L., 1997. Landscape filters and species traits: towards mechanistic understanding and prediction in stream ecology. *J. North Am.Benthological Soc*., 16(2), 391-409.

70. Projet GIRE Kanyaru, Rapport final (GIZ – 2024),

71. *Restoration Ecology*, 28(5): 1032-1035. https://doi.org/10.1111/rec.13229

72. Rosenzweig M.L., 1995. *Species diversity in space and time*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

73. Salwasser H., 1991. In search of an ecosystem approach to endangered species conservation. *In:* Kohm K.A., ed. *Balancing on the brink of extinction: the endangered species act and lessons for the future*. Washington, DC, USA: Island Press.

74. Saunders D.A., Hobbs R.J. & Margules C.R., 1991. Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conserv. Biol*., 5(1), 18-32.

75. SER, 2004. The SER (Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group) international primer on ecological restoration, http://www.ser.org/content/ecological_restoration_primer.asp, (30/06/09).

76. Sih A., Jonsson B.G. & Luikart G., 2000. Habitat loss: ecological, evolutionary and genetic consequences. *Trends Ecol. Evol*., 15, 132-134.

77. Simberloff D.S., 1988. The contribution of population community biology to conservation science. *Ann. Rev. Ecol. Syst*., 19, 473-511.

78. Society for Ecological Restoration (SER) International Science & Policy Working

Group (2004) The SER International Primer on Ecological Restoration. www.ser.org & Tucson: Society for Ecological Restoration International, 16 pp.

79. Society for Ecological Restoration (SER) International Science & Policy Working Group (2004) The SER International Primer on Ecological Restoration. www.ser.org & Tucson: Society for Ecological Restoration International, 16 pp. https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/ser_publications/ser_primer.p df

80. Soulé M.E. & Orians G.H., 2001. Conservation biology research: its challenges and contexts. *In:* Soulé M.E. & Orians G.H., eds. *Conservation biology, research priorities for the next decade.* Washington, DC, USA: Island Press, 271-285.

81. Temperton V.M. & Hobbs R.J., 2004. The search for ecological assembly rules and its relevance to restoration ecology. *In:* Temperton V.M.,Hobbs R.J., Nuttle T. & Halle S., eds. *Assembly rules and restoration ecology: bridging the gap between theory and practice*. Washington,DC, USA: Island Press, 34-54.

82. Trexler J.C., 1995. Restoration of the Kissimmee river: a conceptual model of past and present fish communitites and its consequences for evaluating restoration success. *Restoration Ecol*., 3, 195-210.

83. Tscharntke T., Steffan-Dewenter I., Kruess A. & Thies C., 2002. Characteristics of insect populations on habitat fragments: a mini-review. *Ecol. Res*.,17, 229-239.

84. UNEP, 2007. *Global environmental outlook - GEO 4*. Valletta, Malta: Progress Press.

85. United Nations Environment Programme (2021) Becoming #GenerationRestoration: ecosystem restoration for people, nature and climate. Nairobi, 56 pp. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/36251/ERPNC.pdf

86. V.M., Hobbs D.A., Nuttle T. & Halle S., eds. *Assembly rules and restoration ecology: bridging the gap between theory and practice*. Washington, DC, USA: Island Press, 94-116.

87. Wali M.L., 1987. The structure, dynamics, and rehabilitation of drastically disturbed ecosystems. *In:* Khoshoo T.N., ed. *Perspectives inenvironmental management*. New Delhi, India: Oxford and IBH Publishing, 163-183.

88. Weiher E. & Keddy P., 1999. Assembly rules as general constraints on community composition. *In:* Weiher E. & Keddy P., eds. *Assembly rules: perspectives, advances, retreats*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 251-271.

89. Westhoff V., 1983. Man's attitude towards vegetation. *In:* Holzner W., Werger M.J.A. & Ikusima I., eds. *Man's impact on vegetation*. The Hague,The Netherlands: Dr. W. Junk Publishers, 7-21.

90. White P.S. & Walker J.L., 1997. Approximating nature's variation: selecting and using reference information in restoration ecology. *Restoration Ecol*., 5(4), 338-349.