République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة سطيف 1 - فرحات عباس
Setif 1 University – Ferhat ABBAS
Faculté SNV
Département d'Ecologie et Environnement

Polycopié de cours

« Dégradation des écosystèmes »

Destiné aux étudiants de Master 1

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Protection des écosystèmes

Elaboré par : Dr Nouar Hind



Avant-propos

Les écosystèmes jouent un rôle fondamental dans le maintien de la vie sur Terre en fournissant de nombreux services essentiels, tels que la conservation de la biodiversité, la régulation des cycles naturels, la protection contre les risques naturels, l'amélioration de la qualité de l'eau et le soutien des activités économiques. Leur préservation constitue aujourd'hui un enjeu majeur des politiques publiques en raison de leur importance écologique, sociale et économique.

Cependant, la croissance démographique, l'urbanisation, la surexploitation des ressources naturelles, certaines pratiques de développement et les effets du changement climatique accélèrent la dégradation des écosystèmes, compromettant leur fonctionnement, leur résilience et leur capacité à fournir des services indispensables aux sociétés humaines.

Ce polycopié a pour objectif de fournir aux étudiants de Master 1, spécialité "Protection des Écosystèmes", les connaissances fondamentales relatives aux mécanismes de dégradation des écosystèmes, à leurs causes, à leurs conséquences et aux stratégies permettant leur restauration et leur conservation. Il met également en évidence les liens étroits entre biodiversité, services écosystémiques et activités humaines dans une perspective de développement durable.

Le document est structuré en cinq chapitres. Le premier présente les notions fondamentales relatives au fonctionnement, à la résilience et à la durabilité des écosystèmes.

La deuxième traite des principales formes de dégradation, notamment la déforestation, la pollution, la surexploitation des ressources, les changements climatiques et les invasions biologiques. Le troisième analyse les causes de cette dégradation, qu'elles soient humaines, socio-économiques ou environnementales. Le quatrième chapitre aborde ses conséquences sur la biodiversité, les services écosystémiques, la santé humaine et la sécurité alimentaire.

Enfin, le cinquième chapitre est consacré aux stratégies de restauration et de protection des écosystèmes, en abordant les approches écologiques, les politiques de conservation, la participation des communautés locales et les initiatives internationales en faveur de la durabilité environnementale.

Ce support pédagogique vise ainsi à renforcer la compréhension des enjeux environnementaux actuels et à contribuer à la formation de futurs spécialistes capables de participer à la gestion durable et à la préservation des écosystèmes.

Programme détaillé de la matière Dégradation des écosystèmes

Semestre : 1 **Type :** UEM **VHS :** 60h00 **VHH :** 4h00

Cours : 3h00 **Coefficient :** 3 **Crédit :** 5

Objectifs de l'enseignement *:* L'étudiant suivant cette unité est censé comprendre les différentes causes de la dégradation des écosystèmes (pollution, urbanisation, agriculture intensive, changement climatique, etc.) et les mécanismes sous-jacents.

Connaissances préalables recommandées : Biologie Écologique

Contenu de la matière (45h00)

Chapitre 1. Introduction à la Dégradation des Écosystèmes (06h00)

1. Définition des écosystèmes et de leur fonctionnement ;
2. Concepts de résilience et de durabilité des écosystèmes ;
3. Importance des écosystèmes pour la biodiversité et les services écosystémiques.

Chapitre 2. Types de Dégradation des Écosystèmes (12h00)

1. Déforestation et perte d'habitat ;
2. Pollution de l'eau et des sols ;
3. Surexploitation des ressources naturelles ;
4. Changement climatique et ses impacts ;
5. Invasions biologiques.

Chapitre 3. Causes de la Dégradation des Écosystèmes (09h00)

1. Activités humaines ;
2. Facteurs socio-économiques ;
3. Facteurs environnementaux.

Chapitre 4. Conséquences de la Dégradation des Écosystèmes (09h00)

1. Perte de biodiversité et extinction des espèces ;
2. Impact sur les services écosystémiques ;
3. Effets sur la santé humaine et la sécurité alimentaire ;

Chapitre 5. Stratégies de Restauration et de Protection des Écosystèmes (09h00)

1. Méthodes de restauration écologique ;
2. Politiques de conservation et gestion durable des ressources ;
3. Rôle des communautés locales et de la participation citoyenne ;
4. Rôle des politiques internationales et des accords environnementaux ;
5. Perspectives d’avenir pour la durabilité des écosystèmes.

Table des matières

Chapitre 1. Introduction à la dégradation des écosystèmes 1

Introduction 1

1. Définition des écosystèmes et de leur fonctionnement 1

1.1. Définition des écosystèmes 1

1.2. Fonctionnement des écosystèmes 3

1.2.1. Flux d'énergie, flux de matière et productivité des écosystèmes 4

1.2.2. Les réseaux trophiques au cœur de la structure et du fonctionnement des écosystèmes 6

1.2.3. La structure trophique 7

1.2.3.1. Les producteurs 8

1.2.3.2. Les consommateurs 8

1.2.3.3. Les décomposeurs ou détritivores 8

2. Concepts de résilience et de durabilité des écosystèmes 9

2.1. Naissance du concept de résilience 9

2.2. Définition de la résilience de l'écosystème 10

2.3. La résilience a ses limites : la capacité des écosystèmes 11

2.4. Les composantes de la résilience écologique 13

2.5. Comment la biodiversité contribue-t-elle à la résilience des écosystèmes ? 14

2.6. Concepts de durabilité des écosystèmes 14

2.6.1. Mécanismes et stratégies pour la durabilité 15

2.7. Qu'est-ce que la stabilité d'un écosystème ? 16

2.8. Approches pour renforcer la résilience et la durabilité 19

3. Importance des écosystèmes pour la biodiversité et les services écosystémiques 19

3.1. Classification des services écosystémiques 20

3.1.1. Services d'approvisionnement 20
3.1.2. Services de régulation 21
3.1.3. Services culturels 22
3.1.4. Services de base (de soutien) 23
3.2. Le rôle des services écosystémiques pour les sociétés humaines 24
Chapitre 2. Types de dégradation des écosystèmes 26
Introduction 26
1. Déforestation et perte d'habitat 26
1.1. Les causes de la déforestation 28
1.1.1. L'exploitation du bois 28
1.1.2. L'expansion des terres agricoles 28
1.1.3. L'élevage 28
1.1.4. Les incendies 29
1.1.5. L'extraction minière 29
1.1.6. L'urbanisation 29
1.2. Les conséquences de la déforestation 30
1.2.1. Conséquences de la déforestation sur la biodiversité 30
1.2.2. Conséquences de la déforestation sur les sols 30
1.2.3. Conséquences de la déforestation sur le changement climatique 30
1.3. La perte d'habitat 31
1.3.1. Causes principales de la perte d'habitat 31
2. Pollution de l'eau et des sols 33
2.1. Pollution de l'eau 33
2.1.1. Les différentes sources de la pollution des eaux 34

2.1.1.1. L'industrie 34
2.1.1.2. L'agriculture moderne 34
2.1.1.3. La pollution domestique 35
2.1.1.4. La pollution par les eaux pluviales 35
2.1.1.5. La pollution d'origine naturelle 36
2.1.1.6. La pollution par les substances associées au traitement de l'eau 36
2.1.2. La pollution des eaux de surface et des eaux souterraines 37
2.1.2.1. La pollution des eaux de surface 37
2.1.2.2. La pollution des eaux souterraines 37
2.1.3. Types de la pollution des eaux 38
2.1.3.1. Pollution physique 38
2.1.3.3. Pollution microbiologique 40
2.2. Pollution des sols 40
2.2.1. Définition de la pollution des sols 41
2.2.2. Comportement des polluants dans les sols 42
3. Surexploitation des ressources naturelles 45
3.1. Les causes de la surexploitation des ressources 46
3.2. Équilibrer les droits et les intérêts sur les ressources naturelles 47
3.3. Besoin d'un changement transformateur 48
4. Changement climatique et ses impacts 48
4.1. Définition du changement climatique 48
4.2. Conséquences des changements climatiques sur l'écosystème et la planète 49
4.2.1. Impacts des changements climatiques sur l'écosystème 49
4.2.2. Impact sur l'aire de répartition 50

4.2.3. Impact sur les espèces 52
4.2.4. Changement du rythme saisonnier et déséquilibre écologique 53
5. Invasions biologiques 54
5.1. Les invasions biologiques et leurs impacts sur les niveaux de biodiversité 54
5.2. Impacts des invasions biologiques sur différents niveaux de la biodiversité 55
5.3. Les introductions d'espèces à l'échelle globale 58
5.4. Les étapes du processus d'invasion 60
5.5. Conséquences des invasions biologiques 61
Chapitre 3. Causes de la dégradation des écosystèmes 63
Introduction 63
1. Activités humaines 64
1.1. Changement d'usage des sols et des terres 64
1.1.1. La déforestation 64
1.1.2. L'agriculture exerce la pression la plus forte sur les écosystèmes 65
1.2. Pollution 65
1.3. Fragmentation et détérioration des habitats 66
1.4. Pratiques forestières et chasse non durables, et surpêche 67
1.5. Le changement climatique 69
1.6. Les espèces exotiques envahissantes 69
2. Les facteurs socio-économiques 70
2.1. Facteurs Socio-économiques directs 70
2.2. Facteurs Socio-économiques indirects 71
3. Facteurs environnementaux 71
3.1. Changement climatique 71

3.2. Perte et fragmentation des habitats 71

3.3. Pollution 72

3.4. Surexploitation des ressources naturelles 72

3.5. Introduction d'espèces exotiques envahissantes 72

3.6. Dégradation des sols 72

3.7. Perturbation des cycles biogéochimiques 73

4. Conséquences sur les écosystèmes et les populations 73

Chapitre 4. Conséquences de la dégradation des écosystèmes 74

1. Perte de biodiversité et extinction des espèces 74

1.1. Perte de biodiversité 74

1.2. L'extinction des espèces 75

2. Impact sur les services écosystémiques 78

2.1. L'indice de biodiversité et de services écosystémiques 79

2.2. Facteurs de changements directs et indirects dans les services écosystémiques 81

2.3. Lien entre biodiversité, fonctionnement des écosystèmes et fourniture de services 82

3. Effets sur la santé humaine et la sécurité alimentaire 85

3.1. Effets sur la santé humaine 85

3.1.1. Qualité de l'environnement 85

3.1.2. La menace de malnutrition 86

3.1.3. Propagation de maladies 86

3.1.4. Maladies non transmissibles 86

3.2. Répercussions sanitaires de l'exposition aux contaminants d'origine alimentaire 88

3.3. Effet sur la sécurité alimentaire 90

3.3.1. Réduction de la productivité agricole 91

3.3.2. Perturbation des services écosystémiques 93

Chapitre 5. Stratégies de restauration et de protection des écosystèmes 94

1. Méthodes de restauration écologique 94

1.1. Concepts clés de la restauration de la nature 95

1.2. Les différentes méthodes de restauration 96

1.2.1. La restauration passive 96

1.2.2. La restauration active 97

1.3. Critique de la catégorisation passive / active 97

1.4. Restauration naturelle, assistée et reconstructive 98

1.5. Principales approches de restauration des écosystèmes 99

1.5.1. Restauration des terres et de végétation 99

1.5.2. Restauration des écosystèmes aquatiques et côtiers 100

1.6. Choix de la stratégie de restauration 101

1.7. Filtres à la restauration 102

1.7.1. Filtres de dispersion 103

1.7.2. Filtres abiotiques 103

1.7.3. Filtres biotiques 104

1.8. Comment évaluer la réussite d'une restauration ? 104

1.9. Typologie des actions de restauration et de remise en état des écosystèmes 106

1.9.1. La remédiation 106

1.9.2. La réhabilitation 106

1.9.3. La réaffectation 107

1.9.4. Reboisement 107

1.9.5. Re-végétalisation 107

2. Politiques de conservation et gestion durable des ressources 109
2.1. Politiques de conservation des écosystèmes 109
3. Rôle des communautés locales et de la participation citoyenne 113
3.1. Rôle des communautés locales 113
3.2. La participation citoyenne 114
3.2.1. Reconnaître les défis et les limites liés à la participation citoyenne à l'action publique. 114
3.2.2. Déterminer les défis systémiques associés à la participation citoyenne en plaçant le citoyen au centre. 116
3.2.3. Envisager la dynamique des écosystèmes de la participation citoyenne. 118
4. Rôle des politiques internationales et des accords environnementaux 118
4.1. Qu'est-ce que le droit international de l'environnement 118
4.2. Créer un cadre pour l'action collective 120
4.3. Responsabiliser les nations 121
4.4. Cas de contrôle de la pollution 121
4.5. Cas de suivi des changements climatiques 121
4.6. Accord de Paris sur le climat 124
5. Perspectives d'avenir pour la durabilité des écosystèmes 126
Références bibliographiques 128

Chapitre 1. Introduction à la dégradation des écosystèmes

Introduction

Au cours des cinquante dernières années, l'activité humaine a généré une érosion de la biodiversité plus rapide et extensive que sur aucune autre période comparable de l'histoire de l'humanité. Certains experts, tel Edward Wilson, n'hésitent pas à affirmer : « si nous continuons à détruire certains environnements naturels, à la fin du XXIe siècle nous aurons éliminé la moitié ou davantage des plantes et animaux de la planète ».

Il est aujourd'hui largement admis que le taux d'extinction actuel est cent à mille fois plus élevé que le rythme naturel, lequel est estimé à une disparition d'espèce par an pour un à dix millions d'espèces. Depuis le début de l'ère industrielle au XIXe siècle, les sociétés humaines sont animées par une activité de développement effrénée, répondant à des besoins croissants qui ont profondément transformé la planète, à une échelle sans précédent dans l'histoire (Leduc et Raymond, 2000). Ces besoins s'intensifient sous l'effet de la pression démographique et de la recherche d'une amélioration des niveaux de vie – objectif ultime et justification même du processus d'industrialisation. Il en résulte une demande accrue en espaces et en énergies, ressources naturelles au cœur des économies modernes, dont les dynamiques sont étudiées conjointement par les sciences sociales et les sciences naturelles (Carbonnier et Grinevald, 2011 ; Smil, 2017).

1. Définition des écosystèmes et de leur fonctionnement

1.1. Définition des écosystèmes

C'est en 1935 que le système d'interactions entre les êtres vivants et leur environnement est nommé « écosystème » par le botaniste anglais Arthur Tansley. Il s'agit d'un ensemble d'être vivants qui vivent au sein d'un milieu ou d'un environnement spécifique et interagissent entre eux au sein de ce milieu et avec ce milieu.

En 1969, Odum définit ainsi un écosystème comme étant *″une unité d'organisation biologique composée de tous les organismes dans une zone donnée c'est-à-dire, la « communauté », interagissant avec l'environnement physique, de sorte qu'un flux d'énergie conduit à une structure trophique caractéristique et aux cycles de matières dans le système″*.

L'écosystème représente également l'unité de base du champ d'étude scientifique de la nature (l'écologie scientifique). Selon cette discipline, l'écosystème est un milieu physiquement délimité, constitué de ses deux composantes indissociables :

- **Le biotope** est un environnement physique particulier avec des caractéristiques physiques spécifiques (température, humidité, climat), Parfois la variation d'un seul facteur physico-chimique peut provoquer une modification radicale de la biocénose.
- **La biocénose** est un ensemble d'êtres vivants (animaux, végétaux, micro-organismes) en interaction, et donc en interdépendance. Ce terme de biocénose a été introduit dans le langage scientifique en 1877 par le biologiste allemand Möbius, à propos de l'étude des bancs d'huîtres, auxquels de nombreux organismes se trouvent associés. Selon cet auteur, une biocénose est un groupement d'êtres vivants dont la composition, le nombre des espèces et celui des individus reflète certaines conditions moyennes du milieu ; ces êtres sont liés par une dépendance réciproque. Celle-ci doit, selon lui, être compatible avec l'aptitude de ces espèces à se reproduire au niveau du site (biotope) qu'occupe la biocénose, ce qui permet le maintien en place du groupement (*Encyclopedie Universalis*).

Un écosystème est un système ouvert et il se caractérise par une homogénéité botanique, zoologique, topographique, pédologique et climatique. En effet, le concept d'écosystème se décline à toutes les échelles de grandeur dont on peut s'appliquer à n'importe quel milieu depuis une simple mare (micro écosystème), une forêt (méso écosystème) chaîne de montagnes ou bien un océan (macro écosystème).

1.2. Fonctionnement des écosystèmes

Le fonctionnement d'un écosystème est traditionnellement défini comme l'ensemble des processus liés aux flux de matière et d'énergie dans cet écosystème : apports, transferts (production, recyclage) et pertes de matière et d'énergie au sein de l'écosystème. Une deuxième définition classiquement utilisée comprend à la fois les flux de matière et d'énergie et leur variabilité, en distinguant les propriétés fonctionnelles des processus fonctionnels :

– les processus écologiques de l'écosystème, appelés aussi processus écosystémiques, ou processus fonctionnels (flux de matière et d'énergie) ;

– les propriétés fonctionnelles de l'écosystème (amplitude des variables d'état telles que la biomasse, et stabilité).

L'expression « fonctionnement des écosystèmes » est parfois prise à un sens beaucoup plus large (Giller et al., 2004), en incluant également les biens et services écologiques, processus et propriétés fonctionnelles dont l'espèce humaine tire un bénéfice. Giller et al., (2004) incluent aussi dans le fonctionnement des écosystèmes la structure de la communauté (par exemple la topologie des réseaux trophiques : nombre d'espèces par niveau trophique, connectance du réseau, force des interactions, etc.).

En réalité, un écosystème évolue en permanence, son fonctionnement reposant sur des processus dynamiques en constante mutation. L'étude bioénergétique des écosystèmes renseigne sur leur fonctionnement et complète l'aspect statique représenté par la description des niveaux trophiques (tout être vivant, même les plus petits « bactérie, champignons, etc. » constitue une source de nourriture pour un autre organisme vivant). Dans cette optique, l'écosystème est considéré comme une machine biologique traversée par un double flux de matière et d'énergie (Schoffeniels, 1973).

1.2.1. Flux d'énergie, flux de matière et productivité des écosystèmes

Le soleil est l'énergie la plus abondante de notre planète, fournissant l'énergie nécessaire aux écosystèmes. La composition du soleil lui permet de libérer sur la surface de la Terre une énergie estimée à 1 000 W/m², cette énergie provient de plusieurs réactions nucléaires qui se produisent dans son noyau. Le soleil produit une chaleur dont la température est estimée à 15 millions de centigrades.

Sur l'ensemble du rayonnement reçu par la Terre, une partie importante est réfléchie vers l'espace (albédo) ou absorbée par l'atmosphère, tandis qu'environ 50 % atteint la surface terrestre, où elle contribue surtout au réchauffement, à l'évaporation de l'eau et aux échanges thermiques. Seule une très faible fraction de cette énergie est utilisée par les plantes : environ 1 à 2 % du rayonnement lumineux est capté par la photosynthèse, et près de 10 % de cette énergie absorbée est transformée en biomasse. Le reste est dissipé sous forme de chaleur. Ainsi, le rendement photosynthétique est faible et l'énergie disponible diminue fortement le long des chaînes alimentaires, en raison de pertes importantes à chaque niveau trophique.

Le flux solaire conditionne toute production de la matière vivante car c'est de lui que dépend toute activité photosynthétique (productivité primaire). En effet, l'énergie lumineuse captée est utilisée pour transformer l'eau et le dioxyde de carbone en matière organique (glucides, cellulose, etc.) et en dioxygène.

Le flux de matière dans les écosystèmes correspond à la circulation et à la transformation des éléments chimiques essentiels (carbone, azote, phosphore, eau, etc.) entre les compartiments biotiques et abiotiques de l'écosystème. Contrairement à l'énergie, la matière est conservée et recyclée : elle circule en boucle dans ce que l'on appelle des cycles biogéochimiques.

Le flux d'énergie dans les écosystèmes correspond au transfert d'énergie à travers les différents niveaux trophiques d'un écosystème. Contrairement à la matière, l'énergie suit un flux unidirectionnel et se dissipe sous forme de chaleur.

La productivité des écosystèmes est la capacité d'un écosystème à produire de la biomasse par unité de surface et de temps.

Nous distinguons : une productivité primaire

Productivité primaire brute (PPB) : c'est la quantité totale d'énergie fixée par photosynthèse.

Productivité primaire nette (PPN) : c'est l'énergie restante après respiration des producteurs : $PPN = PPB - R$

Une productivité secondaire : c'est la production de biomasse par les consommateurs, et elle dépend de la qualité de la nourriture, de l'efficacité d'assimilation et des pertes énergétiques.

Le fonctionnement des écosystèmes repose sur une complémentarité essentielle entre le flux de matière, qui est cyclique et conservatif, et le flux d'énergie, qui est unidirectionnel et dissipatif. La productivité résulte de l'interaction entre ces deux flux et constitue un indicateur clé de la santé et de la dynamique des écosystèmes (Figure 1).

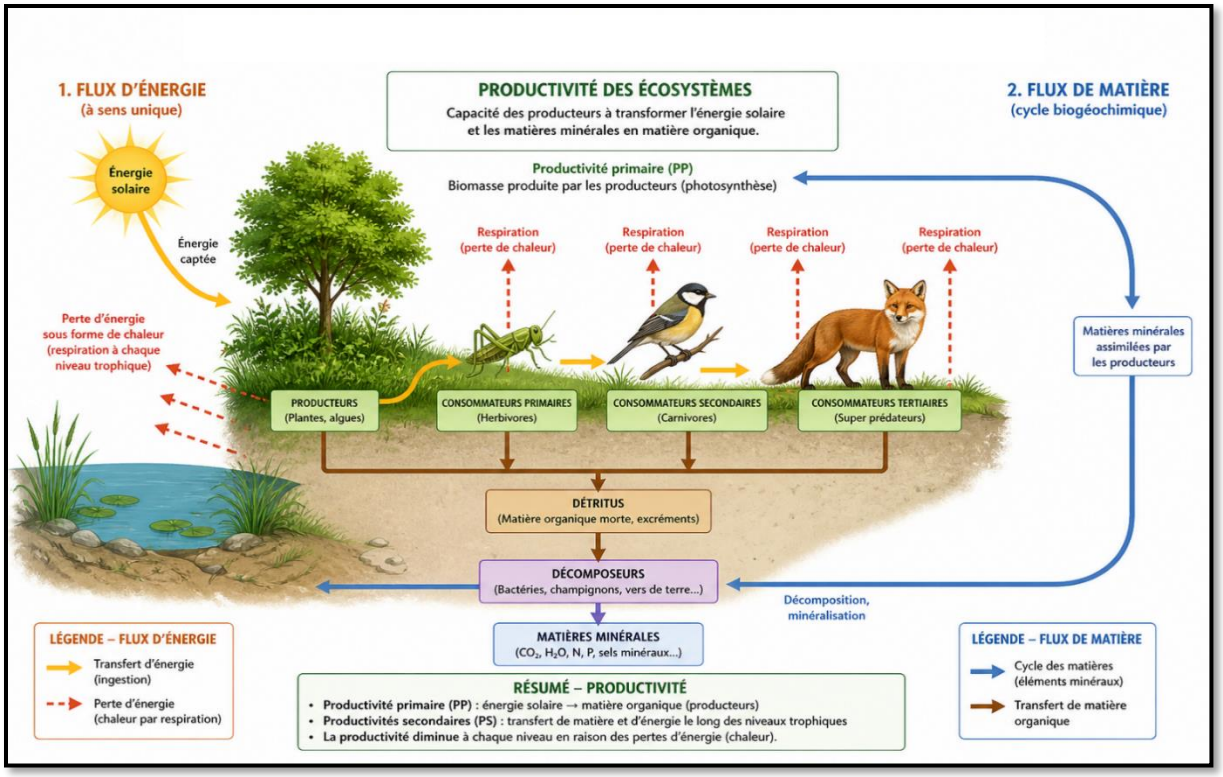


Figure 1. Fonctionnement des écosystèmes : circulation de l'énergie, recyclage de la matière et production biologique.

1.2.2. Les réseaux trophiques au cœur de la structure et du fonctionnement des écosystèmes

L'assimilation de matière énergétique est un besoin vital pour tous les organismes vivants, autotrophes et hétérotrophes, puisqu'elle détermine et conditionne la survie et les capacités reproductives de ces organismes (Stearns 1992). Dans tout environnement, la quête de nourriture est ainsi l'un des principaux objectifs des organismes supérieurs. En 1927, Elton stipulait déjà que les relations entre les organismes d'une communauté sont essentiellement d'ordre trophique. Puis, en 1942 Lindeman précise que les flux d'énergie entre les niveaux trophiques d'une chaîne alimentaire constituent la principale caractéristique de l'organisation des écosystèmes.

Les interactions trophiques constituent le socle de l'organisation des communautés au sein des écosystèmes. Mieux comprendre la structure trophique d'un écosystème, les liens qui

la composent ainsi que leur dynamique (c'est-à-dire le fonctionnement des réseaux trophiques), revient donc à se doter ou à favoriser la mise en place d'outils performants pour la gestion de ces milieux. De par leur organisation et leur rôle, les réseaux trophiques représentent ainsi, à eux seuls, l'un des descripteurs des écosystèmes.

1.2.3. La structure trophique

Les échanges trophiques représentent au niveau de la biocénose ce que sont les processus de nutrition chez l'individu. Cette structure est définie en premier lieu par les relations trophiques qui existent entre les diverses espèces de la biocénose : ce sont les *chaînes alimentaires*, qu'il vaut mieux d'ailleurs appeler *réseaux trophiques*, car les interrelations y sont innombrables. De fait, un prédateur capture souvent des proies très diverses qui varient par surcroît au cours de sa vie, et inversement un animal ou une plante peuvent être victimes de prédateurs et de parasites très divers (Figure 2).

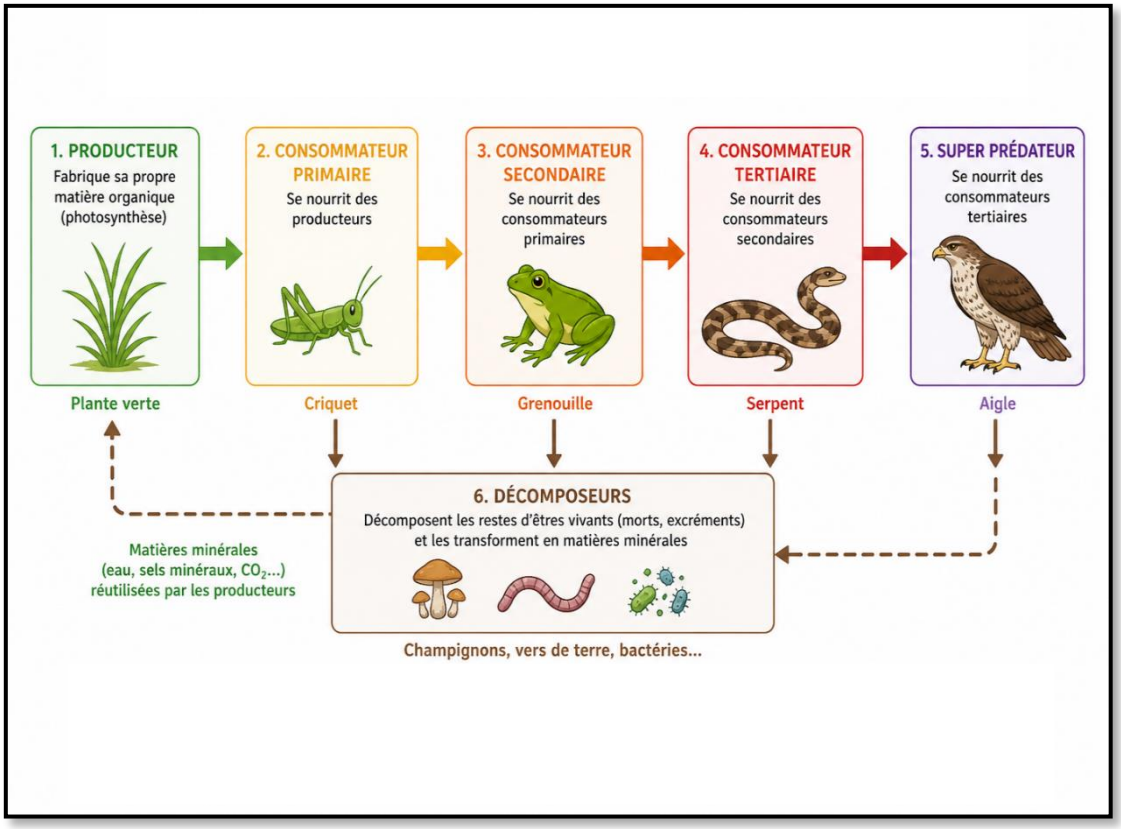


Figure2. Schéma de la structure globale d'une chaine alimentaire.

1.2.3.1. Les producteurs : Les végétaux porteurs de pigments chlorophylliens sont capables de capter l'énergie lumineuse et de la transformer, sous forme d'énergie chimique potentielle, pour fabriquer, à partir de matières minérales (eau, dioxyde de carbone, sels minéraux) prélevées dans le milieu, des molécules de substances carbonées. Cette synthèse de matières organiques, appelée photosynthèse, est donc le fait des organismes autonomes ou autotrophes, c'est à dire capables d'assurer, par eux même, leur nutrition ; ils sont qualifiés de producteurs. Dans le milieu marin ce sont les algues.

1.2.3.2. Les consommateurs : Il s'agit d'êtres vivants, dits hétérotrophes, qui se nourrissent des matières organiques complexes déjà élaborées qu'ils prélèvent sur d'autres êtres vivants. Ils se considèrent comme étant des producteurs secondaires. Les consommateurs occupent un niveau trophique différent en fonction de leur régime alimentaire. On distingue les consommateurs de matière fraiche et les consommateurs de cadavres.

1.2.3.3. Les décomposeurs ou détritivores : Les décomposeurs sont des organismes qui bouclent le cycle trophique et qui remettent en circulation les éléments minéraux contenus sous forme organique dans les débris animaux et végétaux (détritus végétaux, excrétas et cadavres d'animaux). Ce sont les différents organismes et microorganismes qui s'attaquent aux cadavres et aux excrétas et les décomposent peu à peu en assurant le retour progressif au monde minéral des éléments contenus dans la matière organique. Ce sont des champignons, bactéries, levures et autres microorganismes.

La planète dans sa globalité (écosphère) fonctionne dans un certain équilibre ou homéostasie. L'interdépendance entre les différents organismes qui composent avec le biotope (Figure 2).

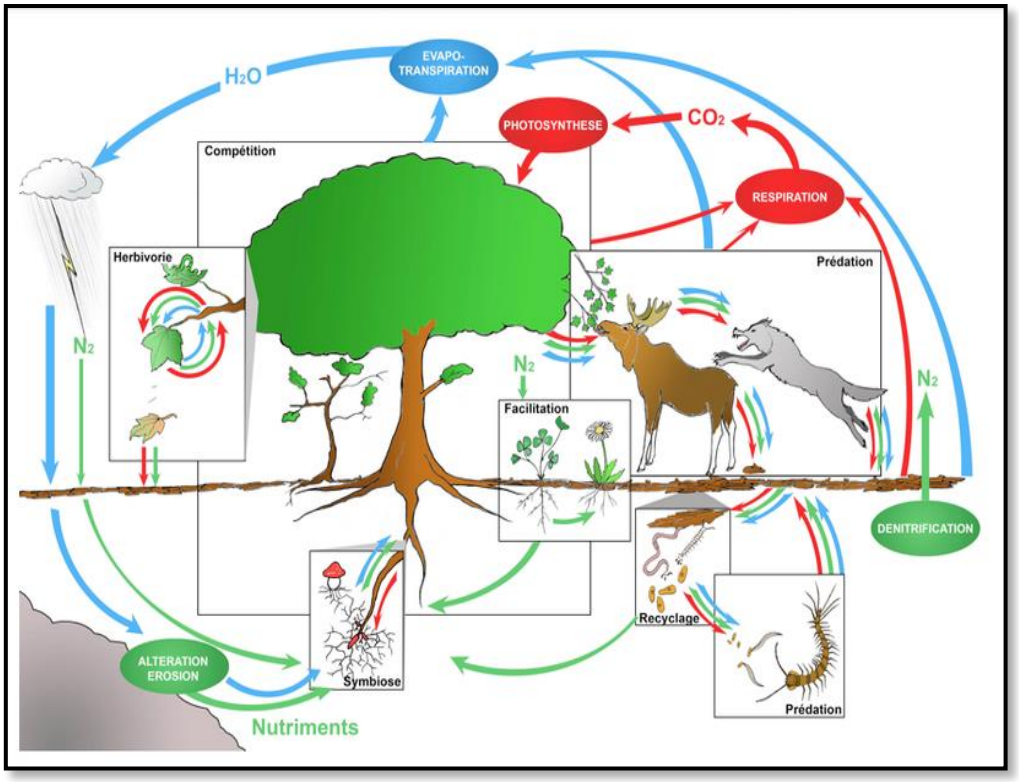


Figure 3. Fonctionnement des écosystèmes (Mouquet et al., 2010).

❁ Dans certains cas également, la présence des consommateurs supérieurs peut accélérer le recyclage des nutriments et par conséquent la productivité des écosystèmes. Ainsi, la structure et la diversité des réseaux trophiques auraient un effet majeur sur la productivité (Figure 3). Notant que les grands prédateurs sont souvent les organismes les plus exploités et les plus sensibles aux activités humaines, on comprend bien les conséquences que cela peut entraîner sur le fonctionnement des écosystèmes (Mouquet et al., 2010).

2. Concepts de résilience et de durabilité des écosystèmes

2.1. Naissance du concept de résilience

Ce terme de résilience aurait initialement été introduit en écologie en 1958 par Charles Sutherland Elton (Botton et al., 2006), un des pères de l'écologie scientifique contemporaine (Southwood & Clarke 1999). Elton définissait la résilience comme "l'amplitude des changements provoqués par une perturbation et la dynamique de récupération après la perturbation/stress" (Elton, 1958 ; Botton et al., 2006). Holling (1996) met par la suite en avant

deux définitions de la résilience utilisées en écologie : "*engineering resilience*" et "*ecological resilience*". Le premier concept d'*engineering resilience* se place dans le cadre d'un unique état d'équilibre de référence et considère la résilience comme la capacité d'un système à rester proche de cet état d'équilibre pendant la perturbation ou le stress et à revenir à ce point d'équilibre ensuite.

D'autre part, le concept d'*ecological resilience* considère plusieurs états d'équilibres potentiels et définit la résilience comme la magnitude de perturbation ou de stress qui peut être absorbée par le système avant de changer de point d'équilibre. Ces concepts peuvent être appliqués tant à des composantes structurales des communautés (composition de la communauté) qu'à ses composantes fonctionnelles (structure fonctionnelle) ou aux propriétés des écosystèmes (Botton et al., 2006).

Ainsi, la biodiversité d'un écosystème définit sa capacité de résilience. Plus un écosystème possède une richesse en biodiversité, plus il est résilient. Et c'est ainsi qu'une importante loi de l'écologie est née : les espèces possèdent des rôles et fonctions complémentaires qui permettent à l'écosystème d'être équilibré.

La résilience des écosystèmes dépend de la diversité de sa faune et de sa flore. En effet, la diversité et la variété d'espèces renforcent l'équilibre de l'écosystème. Il peut ainsi avoir une meilleure capacité de résilience et d'adaptation face à une perturbation.

2.2. Définition de la résilience de l'écosystème

C'est la capacité d'un écosystème à absorber les perturbations et à se réorganiser tout en subissant des changements de manière à conserver essentiellement la même fonction, la même structure, la même identité et les mêmes rétroactions. Autrement dit, elle renvoie à la capacité d'un système à retourner à son état initial à la suite d'un choc. Ainsi, le système peut être un milieu, un écosystème, une biodiversité, une population ou une biosphère, qui subirait une

perturbation affectant son fonctionnement. La résilience intervient à la suite de cette perturbation, le système retrouverait ainsi son fonctionnement et sa structure initial.

Exemple 1 *:* Une forêt qui subit un grave incendie ; un écosystème à forte résilience se régénérerait au fil du temps, rétablissant les espèces d'arbres et la faune d'origine. À l'inverse, un écosystème à faible résilience pourrait se transformer en un type d'écosystème différent, comme une prairie, ce qui indiquerait une perte de résilience.

Exemple 2 *:* Une prairie qui retrouve sa flore après un incendie grâce aux graines enfouies dans le sol.

Exemple 3 *:* Un récif corallien qui, après un blanchissement, peut redevenir fonctionnel si les conditions redeviennent favorables.

Exemple 4 *:* Une ville qui développe des infrastructures vertes telles que les toits végétalisés, et les zones humides urbaines pour renforcer sa résilience face aux canicules et aux inondations.

2.3. La résilience a ses limites : la capacité des écosystèmes

Un concept pour bien saisir les limites de la résilience écologique c'est l'effet de seuil. Ce dernier désigne le moment où après avoir subi plusieurs perturbations et chocs, le système bascule. Tout système n'a pas le même degré de résilience. Le degré de résilience dépend également de conditions variables selon les populations, les écosystèmes, les territoires et la diversité des espèces. L'état de l'écosystème est également important au sens où sa résilience en découle. En effet, plus son état est bon, plus sa résilience et sa capacité à encaisser les chocs le seront aussi.

Exemple **:** Une forêt dont on coupe tous les arbres mettra du temps à revenir à son état initial. Ces points de bascule sont parfois des points de non-retour : les perturbations sont alors irréversibles.

La notion de résilience implique que le système assure sa continuité non pas seulement en préservant un équilibre fixe ou en revenant au même état qu'avant la perturbation, mais

également en intégrant des transformations dans son évolution. A cet effet, la résilience est un concept qui s'intègre dans le cadre théorique des systèmes loin de l'équilibre. La question fondamentale est de comprendre comment, avant un éventuel basculement, un système adaptatif peut réguler ses évolutions à différentes échelles de temps et à différents niveaux hiérarchiques pour s'adapter à ses contraintes de viabilité du système.

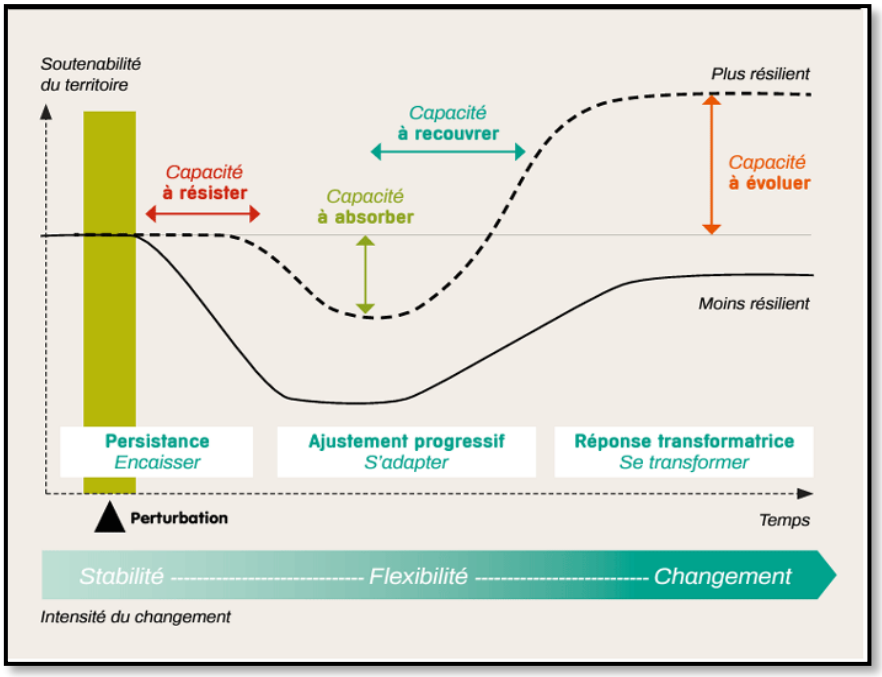


Figure 4. Transition des états du système.

Pour évaluer et prioriser les solutions d'adaptation et dispositions techniques, organisationnelles ou comportementales et définir la stratégie de résilience, et des actions pour augmenter le niveau de résilience d'un système doivent être détaillées et priorisées. Elles peuvent être mises en œuvre :

- Par anticipation afin de prévenir et éviter les risques, réduire l'exposition et la vulnérabilité (proactif).
- Au moment de la survenue d'un événement climatique, pour y faire face : résister, retarder, absorber, céder, mode dégradé … (réactif).
- Suite à un événement climatique pour un retour à la stabilité (palliatif) et pas forcément à l'état initial ; post-perturbation via un retour d'expérience afin d'évaluer le niveau de

résilience du système dans une dynamique d'amélioration continue et de transformation pour gagner en résilience.

L'évolution de la soutenabilité d'un territoire, soumis à une perturbation initiale (aléa climatique par ex.) note trois grandes phases, qui peuvent se succéder ou être concomitantes (Figure 4) :

■ La première phase correspond à la période qui suit immédiatement le choc : la manière dont le système réagit témoigne sa sensibilité au choc, qui dépend de sa capacité de résistance à l'impact et de sa fragilité (vulnérabilité) physique.

■ La deuxième phase démarre quand le système subit les effets de la perturbation et essaye de la gérer. Elle renvoie à la capacité à absorber la perturbation. Puis, le système réagit au choc et rétablit progressivement sa trajectoire : c'est la capacité à recouvrer qui entre alors en jeu. Cette seconde phase d'absorption-recouvrement constitue une phase d'ajustement progressif ou d'adaptation, incrémentale.

■ Enfin, la troisième phase est celle de la réponse transformatrice et correspond à la capacité du territoire à évoluer, à se transformer pour orienter sa trajectoire vers un nouvel équilibre caractérisé par une plus grande soutenabilité.

2.4. Les composantes de la résilience écologique

Les composantes de la résilience écologique correspondent aux propriétés qui permettent à un écosystème de résister aux perturbations, de se réorganiser et de maintenir ses fonctions essentielles. Elles comprennent généralement :

- Diversité biologique (richesse et abondance des espèces) : Plus la diversité est importante, plus la résilience est meilleure.
- Redondance fonctionnelle : Plusieurs espèces remplissent des rôles similaires, le système peut compenser les pertes.

- Connectivité : échanges entre populations et écosystèmes (corridors écologiques, flux génétiques).
- Complexité des interactions : réseaux trophiques stables, cycles biogéochimiques équilibrés.
- Capacité d'adaptation : évolution génétique, plasticité phénotypique, migrations.

2.5. Comment la biodiversité contribue-t-elle à la résilience des écosystèmes ?

La biodiversité est une pierre angulaire de la résilience des écosystèmes. Elle désigne la variété et la variabilité des formes de vie au sein d'un écosystème. Cette diversité joue un rôle crucial en garantissant que les écosystèmes peuvent résister aux perturbations et s'en remettre. Les mécanismes par lesquels la biodiversité renforce la résilience sont multiples.

La diversité des espèces permet la redondance, c'est-à-dire que plusieurs espèces peuvent remplir des rôles similaires dans un écosystème. Cela augmente la probabilité que les fonctions de l'écosystème puissent se poursuivre quelles que soient les perturbations.

La diversité génétique au sein des espèces renforce la résilience, car les populations génétiquement variées sont mieux équipées pour s'adapter aux changements et aux stress, ce qui réduit la sensibilité aux maladies et aux changements environnementaux.

2.6. Concepts de durabilité des écosystèmes

Le terme *durabilité* a été inventé il y a plus de 300 ans par l'expert forestier Hans Carl von Carlowitz. Dans son livre fondateur sur la sylviculture paru en 1713, von Carlowitz définissait la durabilité comme le principe visant à ne récolter que ce qui peut repousser dans la nature. Le but de cette démarche est de créer un équilibre stable dans l'environnement et d'assurer ainsi la préservation à long terme des écosystèmes. S'il convient de veiller à ce que les matières premières renouvelables disposent de suffisamment de temps pour se régénérer, l'utilisation des ressources non renouvelables comme le pétrole ou le charbon présente un tout autre objectif. Il s'agit ici de diminuer leur utilisation, de favoriser le recyclage, de développer

des technologies alternatives et d'accélérer la transition vers des sources d'énergie renouvelables.

La durabilité des écosystèmes se réfère à leur capacité à maintenir leur intégrité écologique, leur diversité fonctionnelle et leurs processus biogéochimiques au fil du temps, malgré les perturbations naturelles ou anthropiques. Elle repose sur la résilience des écosystèmes, c'est-à-dire leur aptitude à retrouver leur état initial après une perturbation, et est intrinsèquement liée au concept plus large de développement durable, qui vise à satisfaire les besoins des générations actuelles sans compromettre ceux des générations futures. La préservation de la biodiversité, l'utilisation raisonnée des ressources, la gestion des habitats et la promotion de pratiques responsables sont des éléments clés pour assurer cette durabilité.

2.6.1. Mécanismes et stratégies pour la durabilité

La durabilité écologique repose sur un ensemble de mécanismes naturels et de stratégies de gestion visant à maintenir à long terme la biodiversité, les fonctions écologiques et les services écosystémiques tout en répondant aux besoins humains (IPBES, 2019).

- ***Conservation et restauration*** : La protection des habitats naturels et la restauration d'écosystèmes dégradés (zones humides, forêts) contribuent à rétablir leur intégrité écologique et leur biodiversité.
- ***Gestion durable*** : L'utilisation respectueuse et raisonnée des ressources, la prévention de la pollution, et l'adoption de pratiques de production et de consommation responsables sont cruciales pour la durabilité.
- ***Coopération internationale*** : Des efforts conjoints sont nécessaires pour lutter contre le braconnage, le trafic des espèces et les invasions d'espèces exotiques envahissantes qui menacent la biodiversité.
- ***Intégration et planification*** : Les stratégies de conservation doivent s'intégrer dans les plans de développement nationaux et locaux, en tenant compte des besoins des

populations locales et en promouvant des solutions fondées sur la nature, avec une interconnexion avec le développement durable. En effet, la durabilité des écosystèmes est un pilier essentiel du développement durable, qui vise l'équilibre entre l'environnement, la société et l'économie. Assurer la pérennité des écosystèmes est donc une condition nécessaire pour garantir la santé humaine, le bien-être et le développement économique à long terme.

2.7. Qu'est-ce que la stabilité d'un écosystème ?

Dans un contexte de changements globaux, tous les systèmes écologiques sont soumis à des pressions croissantes dues aux activités humaines. La fragmentation des habitats altère le maintien des petites populations en limitant la dispersion des individus, la surconsommation d'intrants agricoles déséquilibre notamment le fonctionnement des écosystèmes tandis que le changement climatique exacerbe ces différentes perturbations. En réponse, l'état d'un écosystème est en perpétuel changement. Le mot « état » est utilisé ici comme un terme générique et peut aussi bien qualifier la diversité d'espèces, de traits, que la biomasse des espèces, ou bien encore le fonctionnement de l'écosystème en termes de cycles de la matière. Chacun de ces attributs peut répondre différemment aux diverses perturbations s'exerçant sur les écosystèmes.

Le schéma ci-dessous (Figure 5) montre que l'écosystème résiste bien aux perturbations et retrouve facilement son état d'origine (Exemple : une forêt mature capable de se régénérer après une petite tempête). Ainsi, dans un autre cas l'écosystème est très vulnérable, il ne revient pas spontanément à son état initial (Exemple : un écosystème déjà dégradé où une perturbation supplémentaire entraîne un effondrement). L'état où l'écosystème est peu stable mais résilient (stabilité alternative), là il peut s'adapter, mais il est peu stable car les transitions sont faciles. (Exemple : un lac qui peut passer d'un état clair à un état eutrophisé).

Le cas où l'écosystème est résilient et état stable, on note une résilience élevée et stabilité forte, c'est à dire que la qualité de l'écosystème est bonne, (Exemple : un écosystème forestier équilibré avec une biodiversité riche).

L'écosystème est peu résilient : c'est le cas où l'écosystème ne peut pas revenir à son état initial. Il change de régime ou s'effondre (Figure 5). (Exemple : Désertification après déforestation massive).

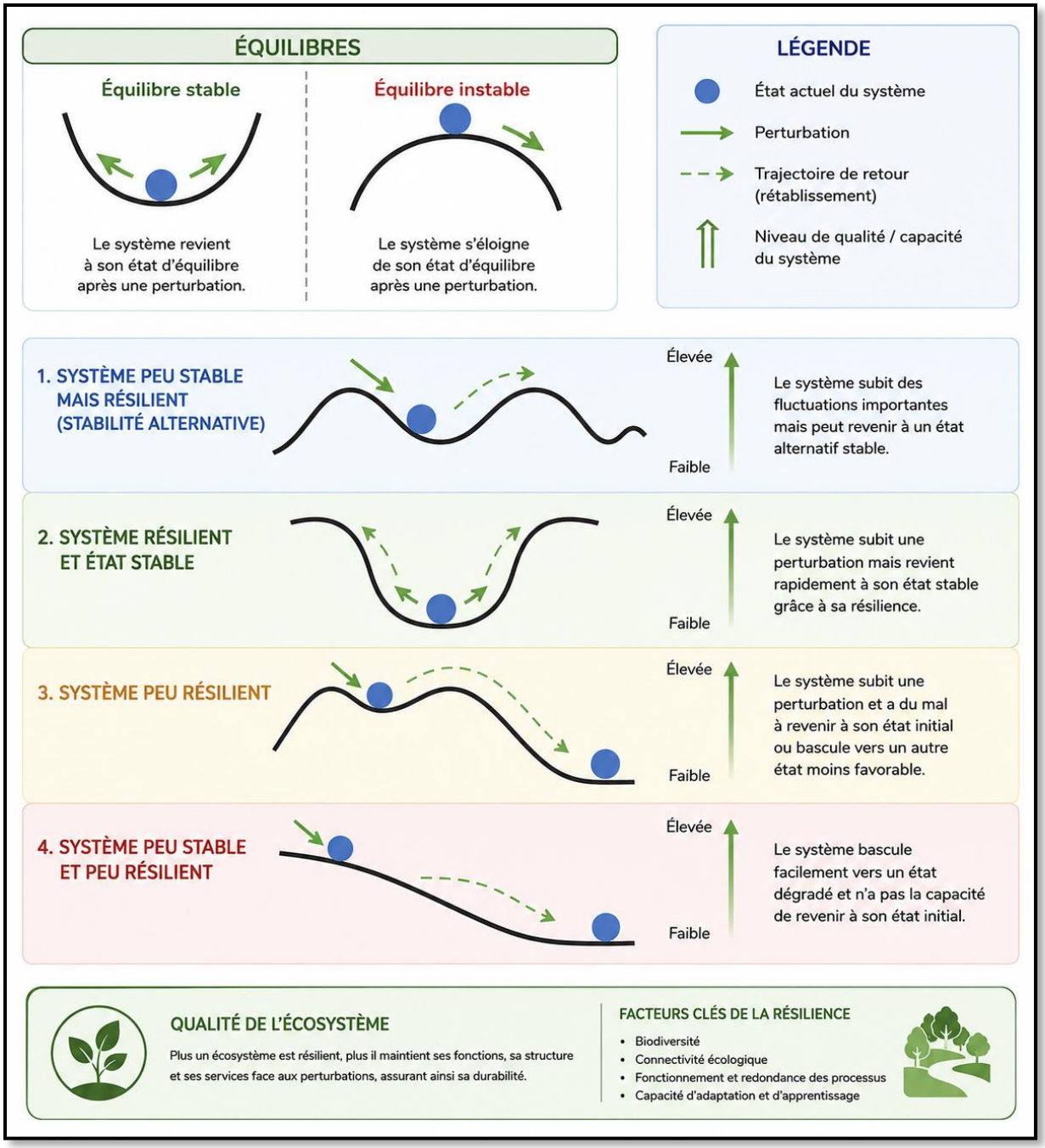


Figure 5. Schémas représentant les notions de stabilité et de résilience des écosystèmes. *Les états potentiels de l'écosystème sont représentés par la ligne, la position de la balle sur cette ligne représentant l'état de la communauté* (Modifié d'après Nicolas et al., 2013).

La stabilité d'un système écologique peut être définie de différentes manières. Ce qui est stable est, par définition, ce qui se maintient dans le temps. La notion de stabilité comprend donc à la fois la capacité des populations et des écosystèmes à absorber les perturbations, c'est-à-dire à avoir un état qui change peu suite à une perturbation, et la capacité des écosystèmes modifiés suite à une perturbation à revenir à leur état initial.

2.8. Approches pour renforcer la résilience et la durabilité

Le renforcement de la résilience et de la durabilité des écosystèmes repose sur des actions visant à accroître leur capacité à résister aux perturbations, à s'adapter aux changements et à maintenir leurs fonctions écologiques à long terme.

- La conservation de la biodiversité par la création des aires protégées, et la restauration écologique.
- La gestion adaptative par le suivi scientifique continu, et l'ajustement des pratiques.
- L'agroécologie et les pratiques durables en agriculture.
- Trouver des solutions fondées sur la nature (Exemple : mangroves contre l'érosion côtière).
- La réduction des pressions humaines : consommation durable, économie circulaire.
- Les politiques publiques : conventions internationales (Convention sur la diversité biologique, COP climat).

3. Importance des écosystèmes pour la biodiversité et les services écosystémiques

Les services écosystémiques sont générés par l'organisation et la structure d'un écosystème, ainsi que par les processus et fonctions écologiques. Les processus écologiques désignent tout changement ou réaction (physique, chimique ou biologique) qui se produit dans un écosystème, comme la décomposition et le cycle des nutriments (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Les fonctions des écosystèmes, qui constituent un sous-ensemble des

interactions entre les structures biophysiques, la biodiversité et les processus écosystémiques, représentent le potentiel ou la capacité d'un écosystème à fournir des services (Faure et al., 2024).

3.1. Classification des services écosystémiques

La classification la plus utilisée est celle du *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005), qui distingue quatre grandes catégories :

3.1.1. Services d'approvisionnement

Ils correspondent aux biens matériels fournis par les écosystèmes. De nombreux produits tels que l'eau potable, la nourriture, l'énergie, les fibres textiles, les matériaux de construction ou les substances actives des médicaments existent grâce à des organismes biologiques. Les ressources génétiques sont à la base du développement de nouvelles cultures, de médicaments et de matières premières industrielles. Les écosystèmes et la diversité des espèces sont importants en agriculture pour la pollinisation et la lutte antiparasitaire, en plus de créer un sol fertile.

Énergie : Biocarburants

Aliments pour consommation humaine et animale : Sources sauvages et domestiques, alimentation du bétail et du poisson d'élevage.

Matériaux et assistance : Production de matériaux dérivés d'organismes provenant de cultures ou d'écosystèmes sauvages pour la construction, l'habillement, l'imprimerie ou à des fins décoratives.

Ressources médicinales, biochimiques et génétiques : Plantes, animaux et microorganismes pouvant être utilisés pour maintenir ou protéger la santé humaine, soit directement, soit par le biais de processus de l'organisme ou de ses dérivés (IPBES, 2018).

3.1.2. Services de régulation

Ils résultent des processus naturels qui régulent les conditions environnementales.

Création et préservation de l'habitat : Maintenir les structures et les processus écosystémiques qui permettent d'assurer d'autres contributions de la nature aux sociétés.

Pollinisation et dispersion de graines et autres propagules : Les façons par lesquelles la nature contribue à la productivité des plantes par la fertilisation et la dispersion de graines et d'autres propagules végétatives.

Régulation de la qualité de l'air : Régulation de l'équilibre CO_2/O_2, de l'ozone pour l'absorption des ultraviolets B et des gaz polluants.

Régulation du climat : Régulation de l'albédo, de certains aspects des émissions de gaz à effet de serre et de la séquestration du carbone.

Régulation de l'acidification des océans : Le maintien du pH de l'océan par l'effet tampon des augmentations et des diminutions de l'acide carbonique, causées principalement par l'absorption de CO_2 par l'océan.

Régulation de la qualité des eaux douces et des eaux côtières : Capacité d'écosystèmes terrestres et aquatiques sains à réguler l'approvisionnement en eau et/ou à filtrer et à retenir les nutriments, les sédiments et les agents pathogènes affectant la qualité de l'eau.

Régulation de la quantité d'eau douce, de son emplacement et de la répartition des précipitations pendant l'année : Pour les utilisations directes par les personnes et les utilisations indirectes par la biodiversité et les habitats naturels.

Formation, protection et décontamination des sols et des sédiments : Rétention des sédiments et contrôle de l'érosion, genèse du sol et maintien de sa structure, décomposition et cycle des nutriments.

Régulation des risques naturels et des phénomènes extrêmes : Rôle des écosystèmes préservés dans la réduction des impacts des inondations, des tempêtes, des glissements de terrain, des sécheresses, des vagues de chaleur et des incendies.

Régulation des organismes nuisibles à la population humaine : Ravageurs, agents pathogènes, prédateurs, compétiteurs, etc (IPBES, 2018).

3.1.3. Services culturels

Les milieux naturels et leurs espèces contribuent à la formation de paysages divers, avec lesquels les hommes s'identifient fortement. Les prestations récréatives et esthétiques dues à la biodiversité sont considérables (Figure 6), nous citons :

Apprentissage et inspiration : Possibilités offertes par la nature pour le renforcement des capacités qui permettent aux humains de prospérer grâce à l'éducation, à l'acquisition de connaissances et au développement de compétences.

Expériences physiques et psychologiques : Possibilités d'activités bénéfiques sur le plan physique et psychologique, de guérison, de relaxation, de loisirs, de tourisme et de plaisir esthétique.

Soutien des identités : Fondement des expériences religieuses, spirituelles et de cohésion sociale, des récits et des contes, ainsi que du sentiment d'appartenance, du sentiment d'avoir un but précis, d'attachement ou d'interdépendance.

Maintien des options : L'existence continue d'une grande variété d'espèces, de populations et de génotypes pour permettre des découvertes encore inconnues et des utilisations imprévues de la nature, ainsi qu'une évolution continue (IPBES, 2018).

3.1.4. Services de base (de soutien)

Ce sont les services de base des écosystèmes, dont l'homme ne profite pas directement, mais qui permettent tous les autres services, comprennent la production d'oxygène, l'entretien des cycles des nutriments et le cycle de l'eau (Figure 6).

La fourniture de ces services écosystémiques est soutenue par des processus biophysiques et des fonctions écologiques, eux-mêmes maintenus par la biodiversité (génétique, taxonomique, fonctionnelle).

Les fonctions écologiques se définissent comme les processus biologiques participant au fonctionnement et au maintien de l'écosystème. Ces fonctions sont très diverses allant de la production primaire à la purification de l'eau. Les fonctions et donc *in fine* le bon fonctionnement des écosystèmes, ainsi que de leur résilience aux pressions, sont soutenus par la richesse fonctionnelle des communautés (Harrison et al., 2014). En effet, la structure fonctionnelle des communautés, définie par la composition et la diversité des traits fonctionnels, est l'un des principaux moteurs des processus écologiques (Mouillot et al., 2011).

Les traits fonctionnels (d'effet et de réponse) sont des caractéristiques mesurables au niveau individuel déterminant le rôle de l'espèce dans les processus écologiques et leur réponse à l'environnement. Ces traits peuvent être utilisés à l'échelle des communautés pour caractériser leur diversité, et leur lien avec le fonctionnement de l'écosystème (Schleuter et al., 2010). La diversité fonctionnelle est déterminante dans le maintien et la résilience des services écosystémiques (Haines-Young & Potschin, 2010) en assurant au système d'être plus résistant et de mieux s'adapter aux conditions futures (Taylor & Duggan, 2012).



Figure 6. Extraits des différentes contributions de la nature à l'Homme.

3.2. Le rôle des services écosystémiques pour les sociétés humaines

Les services écosystémiques et abiotiques sont les contributions créées par le capital naturel dont les êtres humains bénéficient (MEA, 2005).

La diversité joue un rôle très important dans le fonctionnement de l'écosystème et la nature des assemblages d'organismes au sein des écosystèmes est un élément central pour en comprendre la mécanique (Figure 7). Les écologues utilisent le terme "fonctionnement" pour référer aux propriétés et/ou processus biotiques et abiotiques au sein des écosystèmes, comme par exemple le recyclage ou la production de biomasse. Les "services" représentent tous les bénéfices que les populations humaines obtiennent des écosystèmes, notamment la production de nourriture, le contrôle biologique, la pollinisation, etc.

Des travaux récents ont aussi mis clairement en évidence le lien entre les aspects biologique et économique de la biodiversité. Cette crise d'extinctions massive a motivé deux

décennies de recherche pour comprendre plus clairement la relation entre la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes. Cet effort a nécessité une synthèse entre plusieurs sous-disciplines de l'écologie, essentiellement l'écologie des communautés et des écosystèmes.

Face aux constats de l'importance de la biodiversité et de son effondrement, le monde économique prend conscience de ses moyens d'agir. Le rapport d'étape « Biodiversité et stabilité financière : construire les arguments en faveur de l'action » du NGFS et INSPIRE (2021) mentionne de complexes boucles de rétroaction agissant selon les différentes externalités positives et négatives de nos actions sur la nature, menaçant le dépassement de points de bascule de résilience des écosystèmes. Les risques identifiés sont : réglementaires, opérationnels, de réputation, de crédit, de marché, économique et systémique (Figure 7).

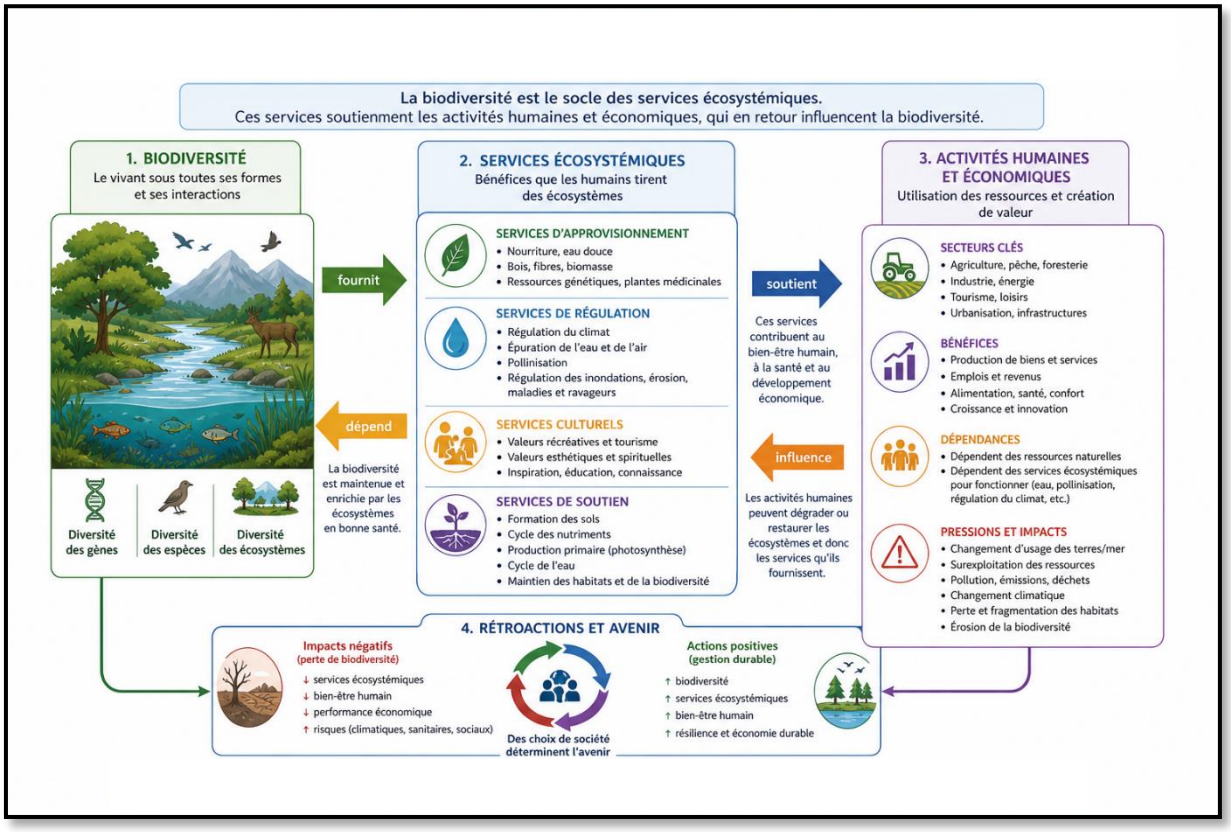


Figure 7. Liens entre biodiversité, services écosystémiques et les activités humaines et économiques.

Chapitre 2. Types de dégradation des écosystèmes

Introduction

Un écosystème est dit dégradé quand il montre une perte de biodiversité, de son intégrité et/ou une simplification ou une rupture dans sa structure, son fonctionnement et/ou sa composition en raison d'activités ou de perturbations qui sont trop fréquentes ou trop importantes pour permettre une régénération ou une récupération naturelle. Ce terme, comme ceux de dommage, de destruction ou de transformation, représente une déviation de l'état normal ou souhaité d'un écosystème intact. Il s'agit donc d'une réduction permanente de la capacité à fournir des services écosystémiques. Autrement dit, un écosystème est détruit lorsque la dégradation ou le dommage supprime toute vie macroscopique et qu'un retour vers la situation initiale est très improbable (PNUE, 2025).

Nous détruisons les milieux naturels à un rythme accéléré : 100 millions d'hectares de forêt tropicale coupés entre 1980 et 2000 ; plus de 85 % des zones humides supprimées depuis le début de l'époque industrielle. Ce faisant, nous mettons en contact des populations humaines, souvent en état de santé précaire, avec de nouveaux agents pathogènes. Les réservoirs de ces pathogènes sont des animaux sauvages habituellement cantonnés aux milieux dans lesquels l'espèce humaine est quasiment absente ou en petites populations isolées. Du fait de la destruction des forêts, les villageois installés en lisière de déboisement chassent et envoient de la viande contaminée vers des grandes villes (IPBES, 2024).

1. Déforestation et perte d'habitat

Les forêts sont une ressource d'importance mondiale. Elles couvrent un tiers des terres émergées de la planète et abritent la majorité de la biodiversité terrestre. La superficie forestière continue de diminuer, malgré les efforts déployés pour mettre un terme à la déforestation et remettre en état les terres dégradées. Les forêts sont essentielles à l'atténuation du changement

climatique. Elles renferment 662 milliards de tonnes de carbone, soit plus de la moitié du stock mondial de carbone dans les sols et la végétation.

La déforestation est l'une des plus graves menaces qui pèsent aujourd'hui sur la biodiversité et sur la santé de notre planète. Elle consiste à raser ou à éclaircir des forêts afin d'en récupérer les terres pour d'autres usages. Il s'agit donc d'abattre des arbres et de défricher des terres pour en faire des surfaces agricoles, par exemple, ou pour construire des routes et des zones d'habitation.

La déforestation représente un enjeu écologique majeur, qui met en péril l'équilibre des écosystèmes, du climat et de la biodiversité (Rodrigues et al., 2022). Elle peut être une réduction importante et permanente du couvert forestier au-dessous du seuil minimal de 10 % (FAO, 2012 ; WWF, 2019).

La déforestation n'arrive pas subitement, elle résulte d'un processus qui passe par des étapes successives de dégradation, et qui finalement va déboucher sur une déforestation nette et visible à partir de l'imagerie satellitaire. Blavignat (2017) souligne que c'est le phénomène de la régression des surfaces forestières résultant des actions de déboisement puis de défrichement par et pour des activités anthropiques. Quand ces changements diminuent la capacité et altèrent les qualités de la forêt à fournir des produits et services écosystémiques, on parle alors de « dégradation forestière » (FAO, 2012 ; WWF, 2019).

La dégradation des forêts se définit comme les changements au sein des catégories forestières (exemple d'une forêt dense à une forêt claire), qui affectent négativement le peuplement ou le site en réduisant, notamment, la capacité de production. Ce phénomène se réfère à la réduction de la capacité d'une forêt de produire des biens et des services. La dégradation forestière est généralement provoquée par des perturbations dont l'ampleur, la sévérité, la qualité, l'origine et la fréquence sont variables (FAO, 2006 ; Schoene et al., 2007 ; Bogaert et al., 2013).

1.1.Les causes de la déforestation

1.1.1. L'exploitation du bois

Elle entraîne non seulement la disparition d'un nombre élevé d'essences d'arbres, mais également d'espèces végétales, de millions d'insectes et de multitudes d'animaux (Pendrill et al., 2022).

1.1.2. L'expansion des terres agricoles

Depuis que l'homme maitrise l'agriculture (environ 10 000 ans), et surtout depuis le dernier siècle, 10 millions d'hectares/an de forêts ont disparu. L'augmentation de la superficie des terres agricoles est l'une des principales causes de la perte continue de la biodiversité. En effet, lors de la transformation d'une forêt en champs cultivés, les espèces forestières sauvages disparaissent, remplacées par de nouvelles espèces propres aux milieux agricoles, mais en général moins nombreuses que celles présentes au départ ; tandis que les écosystèmes sont réduits et fragmentés (Lévêque & Mounolou, 2008).

1.1.3. L'élevage

L'élevage et la déforestation sont fortement liés, surtout dans les régions tropicales comme l'Amazonie, l'Afrique centrale ou l'Asie du Sud-Est. En effet, la conversion des forêts en pâturages pour des fins d'élevage du bétail (surtout bovin) sur de vastes zones forestières, contribue à l'abattage de ces écosystèmes puis les transformés en prairies et en parcours de pâturage. Ainsi, la culture des plantes fourragères telles que le soja, où la production de ces aliments dans le monde (notamment au Brésil) s'étale sur de vastes surfaces forestières pour satisfaire les besoins en alimentation des animaux d'élevage. Par ailleurs, l'expansion des infrastructures pour construire des routes, des abattoirs et des entrepôts liés à l'élevage entraînent aussi une fragmentation des forêts.

1.1.4. Les incendies

Les incendies de forêts influencent de nombreuses façons la diversité biologique. A l'échelle mondiale, ils sont une importante source d'émission de carbone et contribuent au réchauffement de la planète, ce qui pourrait entrainer des changements dans la biodiversité. Au niveau régional et local, ils altèrent le cycle hydrologique, réduisent la matière organique, influencent le cycle de vie des végétaux, réduisent de façon notable la photosynthèse et compromettent souvent la santé des animaux et des humains (Lévêque & Mounolou, 2008).

Les incendies, qu'ils soient spontanés ou d'origine anthropique, contribuent également à la déforestation. Le danger des incendies spontanés est qu'ils peuvent rapidement s'étendre par temps sec. Mais de nombreux incendies sont directement causés par l'homme, pour défricher des terres à des fins agricoles ou de développement urbain.

1.1.5. L'extraction minière

Les activités extractives nécessitent d'abattre des forêts pour accéder aux ressources qui se trouvent dans les sols, qu'il s'agisse de minerais, de pétrole ou de gaz (Sonter et al., 2017).

1.1.6. L'urbanisation

Depuis le début du siècle, l'urbanisation des milieux naturels est toujours en constante progression. Cela implique non seulement une perte du sol mai aussi de milieux écologiquement intéressants, tels que les terres arables, les terres agricoles, les surfaces pionnières, mais aussi les milieux semi-naturels. L'explosion démographique mondiale s'accompagne d'une urbanisation galopante (Santos et al., 2022). Dans le monde, la croissance des villes grignote plus de $13m^2$ de compagne chaque seconde. Cette croissance représente une surface de 110 km^2/jour. Si le développement intensif des villes continu ainsi, il n'y aura bientôt plus de villes reliées entre elles, où la biodiversité aura disparu (Boucher & Fontaine, 2010).

L'extension urbaine implique forcément l'extension des réseaux routiers, ferrés et électriques qui fractionne de plus en plus les habitats (Barber et al., 2014 ; da Silva et al., 2023 ;

Engert et al., 2025). Elle est considérée comme un facteur important de la pollution par la production des déchets solides ou liquides rejetés dans la nature. Cette urbanisation intensive provoque un problème au niveau de la faune et de la flore.

1.2. Les conséquences de la déforestation

La déforestation a de nombreuses conséquences sur les écosystèmes naturels et cela pose de sérieux problèmes de résilience.

1.2.1. Conséquences de la déforestation sur la biodiversité

La conséquence la plus connue de la déforestation est la menace de la biodiversité. En effet, la forêt est un habitat très dense en biodiversité mondiale, certaines forêts étant même de véritable hub de biodiversité parmi les plus riches du monde. Qu'il s'agisse de mammifères, d'oiseaux ou encore d'insectes, d'amphibiens ou de végétaux, la forêt abrite des espèces parfois rares, souvent fragiles. En détruisant ces milieux naturels, les activités humaines menacent donc l'existence de ces espèces et cela peut avoir des conséquences importantes sur les équilibres naturels. Par exemple, dans certaines régions d'Afrique, les grands singes comme les gorilles argentés sont en voie de disparition à cause de la réduction progressive de leur habitat naturel, notamment à cause de la déforestation.

1.2.2. Conséquences de la déforestation sur les sols

La déforestation fragilise aussi les sols. En effet, la présence d'une forêt sur un sol tend à rendre ce sol plus riche en matière organique, mais aussi plus résistant aux intempéries ou à l'érosion. De ce fait, lorsqu'un espace forestier est détruit, le sol se fragilise peu à peu et rend l'écosystème plus vulnérable aux catastrophes naturelles comme les glissements de terrain ou les inondations.

1.2.3. Conséquences de la déforestation sur le changement climatique

La déforestation a aussi un impact très fort sur le changement climatique. En effet, les arbres sont des puits de carbone stockent du CO_2 tout au long de leur vie. En détruisant ces

arbres, on réduit donc la capacité de l'écosystème mondial à stocker du CO_2. Moins d'arbres, c'est moins de CO_2 absorbé et donc plus d'effet de serre. De ce fait, on estime que la déforestation est responsable à l'échelle mondiale de l'équivalent de 11.3% des émissions de CO_2 d'origine anthropique, ce qui en fait l'un des plus gros facteurs de réchauffement climatique à peu près à égalité avec le transport routier et la consommation énergétique des bâtiments. Dans les derniers rapports du GIEC, la lutte contre la déforestation est présentée comme un levier essentiel de la lutte contre le réchauffement climatique.

1.3. La perte d'habitat

L'habitat d'une espèce regroupe l'ensemble des conditions physiques, chimiques et biologiques nécessaires à son développement : climat, végétation, ressources alimentaires, disponibilité en eau et interactions avec les autres organismes. La perte des habitats correspond à la disparition, à la réduction ou à la dégradation des milieux naturels indispensables à la survie, à la reproduction et à l'alimentation des espèces vivantes. Elle peut être totale (destruction complète du milieu) ou partielle (altération des conditions écologiques).

1.3.1. Causes principales de la perte d'habitat

La perte d'habitat est considérée comme la principale cause du déclin de la biodiversité à l'échelle mondiale. Elle résulte de la destruction et de la dégradation des milieux naturels sous l'effet des activités humaines et des changements environnementaux (IPBES, 2019).

Urbanisation : L'expansion des villes entraîne l'artificialisation des sols ; la destruction des espaces naturels et la réduction des zones agricoles et forestières.

Agriculture intensive : L'augmentation des besoins alimentaires provoque le défrichement des forêts, le drainage des zones humides et l'utilisation massive de pesticides et d'engrais.

Déforestation : Elle est particulièrement importante dans les régions tropicales pour l'exploitation du bois ; l'agriculture et l'élevage. Dans l'Amazonie, environ 14 à 17 % de la

forêt originelle a déjà disparu, augmentant le risque d'atteinte d'un point de basculement écologique (Lovejoy & Nobre, 2019).

Changements climatiques : Ils entraînent le déplacement des aires de répartition, la désertification, la montée du niveau marin et la modification des régimes hydrologiques.

Pollution : Les pollutions industrielles, agricoles et domestiques altèrent les habitats aquatiques et terrestres.

Espèces exotiques envahissantes : Certaines espèces introduites modifient profondément les habitats naturels via plusieurs mécanismes, tels que la compétition avec les espèces indigènes, la modification des réseaux trophiques, ou par l'altération des caractéristiques physiques du milieu.

***Comment la déforestation cause la perte d'habitat* ?**

La déforestation est l'un des principaux moteurs de la perte d'habitat. Elle consiste à supprimer durablement le couvert forestier pour convertir les terres à d'autres usages (agriculture, élevage, urbanisation, exploitation minière ou infrastructures).

- Suppression des arbres : les arbres abritent oiseaux, insectes, mammifères et champignons. Leur disparition élimine les abris et les sources de nourriture.
- Fragmentation des forêts : même si une partie de la forêt reste, elle est souvent isolée, rendant difficile la migration/le déplacement et la reproduction des espèces (l'échange génétique des espèces).
- Modification du microclimat : la coupe des arbres modifie la température, l'humidité et la luminosité, perturbant les écosystèmes forestiers.
- La disparition de la couverture végétale favorise l'érosion des sols et la pollution des cours d'eau.

2. Pollution de l'eau et des sols

2.1. Pollution de l'eau

La pollution de l'eau désigne la dégradation des masses d'eau (lacs, nappes phréatiques, rivières, réservoirs, océans) par l'introduction de substances nocives. Ces contaminants altèrent les propriétés physiques, chimiques et biologiques de l'eau, la rendant dangereuse pour les écosystèmes aquatiques, la santé humaine et l'environnement dans son ensemble (Laskotra et al., 2026). Ces polluants sont des agents physiques ou chimiques introduits dans une masse d'eau et altérant ses caractéristiques naturelles. Parmi ces polluants, on trouve notamment les ETM, les déchets radioactifs, les nutriments, les halogènes, les microplastiques, les perturbateurs endocriniens, les contaminants microbiens, les polluants organiques, les matières en suspension et les sédiments (Madhav et al., 2020).

La forte pression surtout anthropique exercée sur ces écosystèmes aquatiques a pour conséquence une perturbation de ses fonctions de production, de régulation écologique et de ses fonctions culturelles (Mojisola, 2008). De même, la mauvaise gestion des déchets solides et liquides autours de ces hydro-écosystèmes due à l'augmentation de la croissance démographique des populations riveraines contribuent aussi à l'enrichissement de ces milieux en polluants et autres éléments indésirables ou potentiellement dangereux pour la santé. Les ressources en eaux sont donc menacées par une pollution liée aux déchets solides, effluents urbains, agricoles et même industriels (Bouih et al., 2004).

La pollution des cours et plans d'eau compromet la qualité de l'eau, qui elle-même dépend tant de la qualité des bandes riveraines et de la plaine inondable, que des activités humaines conduites sur le territoire environnant. Cette pollution se présente sous différente forme et retient l'attention du fait de ses effets sur la qualité et les fonctions de l'eau. Elle bouleverse les écosystèmes de façon dommageable.

2.1.1. Les différentes sources de la pollution des eaux

Les exigences de l'homme vis-à-vis de l'eau qu'il consomme dans ses diverses activités vont en croissant, tant au point de vue de la qualité que de la quantité. Il dispose de réserves naturelles superficielles et souterraines, souvent mal réparties. Il a commis l'imprudence de laisser polluer ses ressources locales par des déchets, le plus souvent biodégradables, mais parfois toxiques, provenant de sa vie domestique, agricole et industrielle.

2.1.1.1. L'industrie

Les activités industrielles représentent une source importante de pollution des eaux en raison des rejets d'effluents contenant des ETM, des hydrocarbures, des substances chimiques toxiques et des matières en suspension. Ces contaminants altèrent la qualité des milieux aquatiques, perturbent les communautés biologiques et peuvent s'accumuler dans les chaînes trophiques, compromettant ainsi la biodiversité et les services écosystémiques associés.

Les rejets industriels peuvent contenir :

- Des ETM (mercure, plomb, cadmium, chrome, arsenic) ;
- Des hydrocarbures et dérivés pétroliers ;
- Des solvants organiques ;
- Des produits chimiques toxiques ;
- Des nutriments (azote et phosphore) ;
- Des matières en suspension ;
- Des microplastiques et contaminants émergents.

2.1.1.2. L'agriculture moderne

Elle joue un rôle essentiel dans les économies en développement en garantissant la sécurité alimentaire et nutritionnelle et en soutenant les moyens de subsistance de millions de personnes (Sachdev et al., 2021). Les innovations technologiques, telles que les cultures génétiquement modifiées, les engrais minéraux et l'irrigation par submersion, ont permis une

intensification agricole, améliorant considérablement la productivité et l'efficacité. Cependant, malgré les avantages de ces interventions, leur durabilité et leur impact environnemental suscitent des inquiétudes (Rehman, 2015 ; Eliazer Nelson et al., 2019).

L'utilisation excessive et inefficace d'engrais a dégradé la structure du sol, provoqué des déséquilibres nutritionnels et accroît la pollution (FAO, 2022). À l'échelle mondiale, l'agriculture contribue à hauteur d'environ 10 à 12 % aux émissions totales de GES.

2.1.1.3. La pollution domestique

Les eaux usées urbaines sont constituées de matière organique biodégradable certes mais de grandes consommatrices d'oxygène, de germes pathogènes et de produits chimiques (Becker & Durfor, 1972). Ces eaux se caractérisent par de fortes teneurs en matières organiques, des sels minéraux, dont l'azote et le phosphore, des détergents et des germes fécaux (Genin et al., 2003).

Les effluents domestiques contiennent généralement :

- de la matière organique biodégradable ;
- des nutriments (azote et phosphore) ;
- des détergents et tensioactifs ;
- des agents pathogènes (bactéries, virus, parasites) ;
- des résidus pharmaceutiques ;
- des microplastiques ;
- des produits cosmétiques et d'hygiène.

2.1.1.4. La pollution par les eaux pluviales

Elles peuvent constituer la cause de pollutions importantes des cours d’eau, notamment pendant les périodes orageuses. L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l’air, puis, en ruisselant des résidus déposés sur les toits et les chaussées villes (huiles de vidange, carburants, résidus de pneus et métaux lourds...). En outre, lorsque le système d'assainissement

est dit "unitaire", les eaux pluviales sont mêlées aux eaux usées domestiques. En cas de fortes précipitations, les contraintes de préservation des installations d'épuration peuvent imposer un déversement ("délestage") de ce "mélange" très pollué dans le milieu naturel. Enfin, dans les zones urbaines, les surfaces construites rendent les sols imperméables et ajoutent le risque d'inondation à celui de la pollution (Herteman, 2010).

2.1.1.5. La pollution d'origine naturelle

La pollution d'origine naturelle résulte de phénomènes géologiques, climatiques ou biologiques tels que les éruptions volcaniques, les incendies naturels et les tempêtes de poussière. Bien qu'elle fasse partie du fonctionnement naturel de la biosphère, son intensification peut affecter la qualité des milieux, la biodiversité et la santé humaine.

Certaines substances naturellement présentes dans l'environnement entraînent parfois des problèmes de contamination de l'eau potable. Des composés inorganiques comme le baryum, l'arsenic, les fluorures, le sodium, les chlorures, le mercure, le cadmium et les cyanures peuvent contaminer l'eau potable. L'eau souterraine est particulièrement vulnérable lorsqu'il y a présence de métaux dans les formations géologiques environnantes.

2.1.1.6. La pollution par les substances associées au traitement de l'eau

La chloration de l'eau dans le but de la rendre potable est un procédé très répondu et reconnu efficace. La chloration est même considérée par les experts comme étant l'une des plus importantes initiatives de santé publique du XXe siècle. Cependant, bien qu'il soit efficace pour contrôler principalement les virus et les bactéries, le chlore en présence de matières organiques entraîne la formation de plusieurs sous-produits de chloration (SPC) potentiellement cancérigènes comme par exemple les trihalométhanes (THM). Le sulfate d'aluminium est un produit utilisé pour coaguler les substances contenues dans l'eau. L'eau ainsi traitée présente des concentrations d'aluminium plus élevées que dans l'eau non traitée. La toxicité de

l'aluminium a été étudiée en relation avec la maladie d'Alzheimer qui influe sur la mémoire et le comportement des personnes atteintes.

2.1.2. La pollution des eaux de surface et des eaux souterraines

2.1.2.1. La pollution des eaux de surface

La pollution des eaux de surface correspond à l'altération de la qualité des eaux présentes à la surface de la Terre, telles que les rivières, les fleuves, les lacs, les étangs, les zones humides et les réservoirs. Elle résulte de l'introduction de substances ou d'organismes susceptibles de modifier les caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques de ces milieux aquatiques (WHO, 2023).

- Cette pollution provient de plusieurs sources d'origine anthropique, les principales sont : Les activités agricoles, à travers les apports d'engrais, de pesticides et d'effluents d'élevage,
- Les activités industrielles, par le rejet de métaux lourds, d'hydrocarbures, de solvants et d'autres substances toxiques,
- Les eaux usées domestiques, contenant de la matière organique, des nutriments et des microorganismes pathogènes,
- Le ruissellement urbain, transportant huiles, déchets, microplastiques et contaminants divers,
- Les activités minières, génératrices de drainage acide et de contamination métallique.

  Les eaux de surface peuvent contenir des matières organiques biodégradables, de l'azote et du phosphore, des ETM (cadmium, plomb, mercure, chrome), des hydrocarbures, des pesticides, des détergents, des microplastiques et des agents pathogènes.

2.1.2.2. La pollution des eaux souterraines

Les eaux souterraines constituent une part importante du patrimoine hydraulique. Elles présentent des avantages certains sur le plan de la couverture des besoins par rapport aux eaux de surface, en raison de leur régularité et de leurs faibles couts de mobilisation comparativement aux

eaux de surface. Il s'agit aussi d'une ressource moins vulnérable aux aléas climatiques et à la pollution et mieux répartie géographiquement.

Parmi les caractéristiques spécifiques intervenant dans la pollution des eaux souterraines et le transport d'un contaminant, 1'adsorption spécifique du contaminant sur la matrice rocheuse ou encore la vitesse de dégradation du contaminant peuvent largement influencer la vulnérabilité des eaux (Meyzonnat, 2012). Les principaux phénomènes susceptibles d'intervenir sont de types géochimiques (réactions acides bases, d'oxydoréduction de désorption, ...), biochimiques (biodégradation, synthèse cellulaire, …), physiques (diffusion, évaporation, filtration, …), ou biophysiques (transport de germes…).

La contamination des eaux souterraines par les nitrates est aujourd'hui à l'origine des problèmes de santé publique. Les fortes concentrations en NO^-_3 seraient directement liées aux activités humaines et plus particulièrement aux activités agricoles, et notamment des excédents de fertilisant azoté qui représentent les plus importantes sources anthropiques de contamination (Éric, 2017). Contrairement aux polluants organiques susceptibles d'être dégradés dans l'environnement, les ETM sont persistants, et peuvent s'accumuler dans les eaux souastriens et les sédiments.

2.1.3. Types de la pollution des eaux

2.1.3.1. Pollution physique

Elle résulte de différents éléments solides entraînés par les rejets domestiques et industriels. On distingue :

- Pollution solide : elle provient des particules solides apportées par les eaux industrielles ainsi que les eaux de ruissellement et issue des décharges de déchets à ciel ouvert.

- **Pollution thermique** : causée généralement par les eaux des circuits de refroidissement des usines, en effet tout changement de température de l'eau a des conséquences significatives sur l'équilibre écologique du milieu aquatique naturel et la survie des organismes vivants (Madhav et al., 2020), entraînant une perte massive d'espèces due au choc thermique, la migration des

organismes en raison des variations de température de l'eau, la formation de milieux anaérobies, le blanchissement des coraux et une accélération du métabolisme des organismes sous l'effet de la hausse des températures (Vallero, 2019). De plus, l'augmentation de la température de l'eau peut causer des dommages physiques aux poissons, modifier leurs comportements de reproduction et d'alimentation, diminuer la capacité des rivières à assimiler les déchets et provoquer l'eutrophisation.

- **Pollution radioactive** : liée aux rejets des éléments radioactifs par les installations et les centrales nucléaires ainsi que les usines de traitement de déchets radioactifs. Les déchets radioactifs figurent parmi les déchets les plus dangereux, car ils contiennent des matières hautement radioactives. Ces déchets peuvent être intrinsèquement radioactifs ou contaminés par la radioactivité, les rendant inutilisables (Deng et al., 2020). Ils proviennent de diverses sources, telles que le retraitement du combustible nucléaire et des armes nucléaires, les déchets industriels, les déchets médicaux et les matières radioactives naturelles.

2.1.3.2. Pollution chimique

Elle est due aux polluants chimiques de nature organique et minérale générés par les différentes activités anthropiques. Ce type de pollution regroupe les :

- Les solvants,
- Les métaux (Zn, Pb, Cd, ...),
- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP),
- Les polychlorobiphényles (PCB),
- Les produits pharmaceutiques,
- Les pesticides,
- Les sels, etc…

2.1.3.3. Pollution microbiologique

Elle provient de plusieurs sources comme les rejets des hôpitaux, l'agriculture ainsi que les rejets d'eaux usées. L'eau se charge alors de microorganismes pathogènes (bactéries, virus, parasites) qui peuvent être dangereux pour l'environnement et pour la santé humaine.

2.2. Pollution des sols

Le sol est une ressource non renouvelable car sa vitesse de formation est habituellement comprise entre 100 et 400 an/cm, et donc, à la différence de l'eau, le renouvellement du sol n'est pas visible à échelle de temps humaine ; un compartiment complexe, un carrefour multifonctionnel en relation avec la lithosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère. Il est le résultat de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie et des échanges d'énergie qui s'y manifestent (Gobat et al., 1998).

La notion de sol vivant n'apparaît pas discutable, si l'on considère que le nombre d'organismes présents dans une cuillère à café (10 g) de sol fertile peut excéder 9 milliards, et est supérieur au nombre d'êtres humains présents sur la planète (Doran et al., 1999). C'est une entité vivante et dynamique, qui est nécessaire au fonctionnement des écosystèmes terrestres. Ainsi, la protection de la biodiversité vise à préserver les organismes du sol, pour leur utilité dans la formation du sol (amélioration de la structure, dégradation des débris végétaux), mais aussi pour leur diversité génétique.

Le tassement, l'imperméabilisation et les mouvements des terrains sont des processus concernant la dynamique physique du sol, et ce dernier est jugé dégradé lorsqu'il perd une partie de ses fonctions, comme celle de nourrir les plantes ou les animaux, de filtrer les eaux ou encore d'abriter une importante biodiversité.

2.2.1. Définition de la pollution des sols

La pollution du sol peut être due à l'accumulation sur le sol des substances non biodégradables, ou à l'accumulation des substances biodégradables mais dont la vitesse d'accumulation excède le taux biodégradabilité. Alors ces substances peuvent être stockées sur le sol ou être lessivées par les eaux de ruissèlement vers les cours d'eau voisins ou vers la nappe phréatique ; ou encore s'évaporer vers l'atmosphère (Rinklebe et al., 2024).

Autrement dit, la pollution d'un sol est l'accumulation notable d'éléments minéraux, organiques ou de pathogènes dans celui-ci, en quantité telle que leur présence peut revêtir un danger pour les organismes vivants ou compromettre une ou plusieurs grandes fonctions du sol et l'usage qui est habituellement fait de ce milieu (Figure 8).

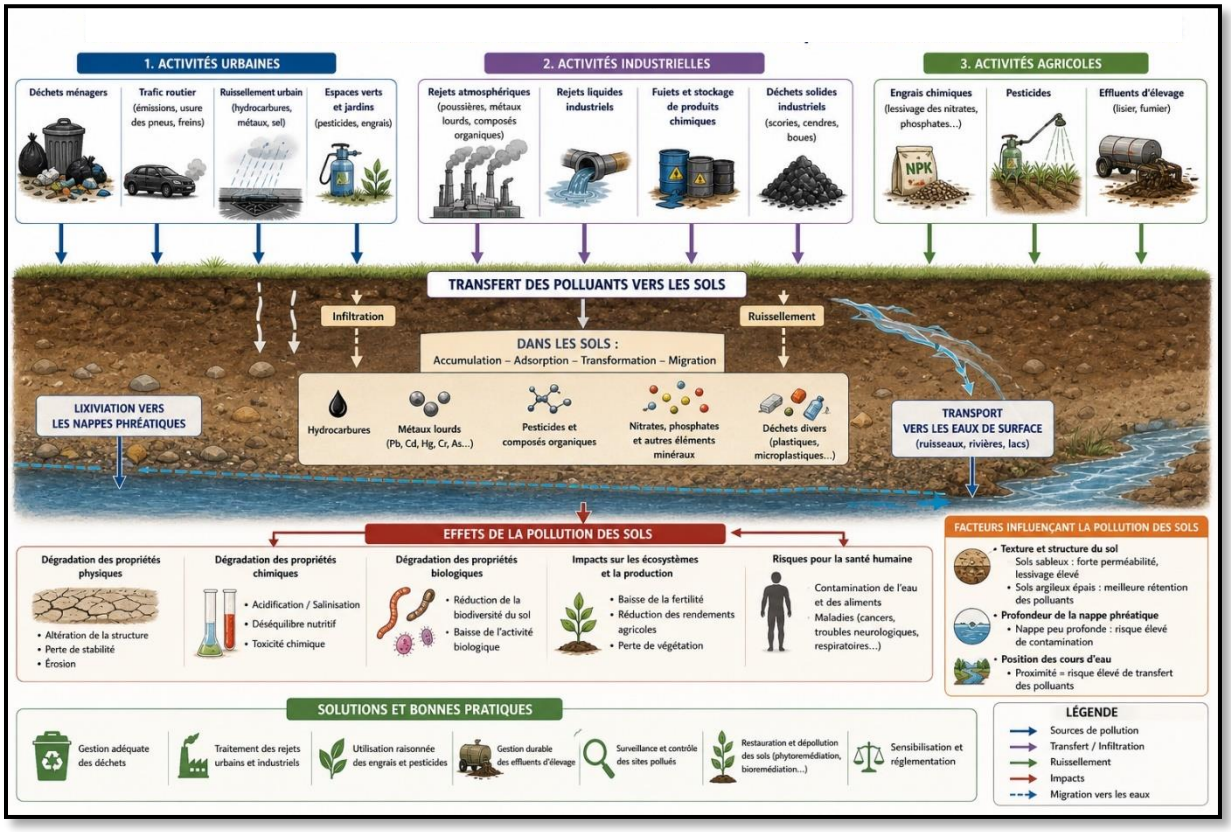


Figure 8. Pollution des sols à travers les activités urbaines, industrielles et agricoles.

Certains sols sont souvent utilisés comme décharge pour les déchets ménagers et industriels (Roy et al., 2022 ; Zhang et al., 2023). Dans beaucoup de régions cultivées, le lessivage des engrais et des effluents d'élevage épandus en excès provoque une augmentation importante de teneur en nitrate et autres éléments minéraux dans les nappes phréatiques.

Les effets de la pollution des sols dépendent de leur structure et de leur texture. Certains sols ont la capacité de filtrer, d'absorber et de recycler des quantités importantes de déchets ; dans d'autres sols, certains constituants toxiques ne sont pas retenus et se retrouvent dans les fleuves et dans les nappes phréatiques. Les sols sableux sont favorables au lessivage, alors que les sols argileux épais retiennent mieux les déchets. Ainsi toutes les activités humaines sur les sols doivent tenir compte des propriétés des sols et de la position de la nappe et des cours d'eau du milieu.

La pollution des sols résulte également des activités urbaines et industrielles, qui constituent des sources multiples de contaminants (déchets, hydrocarbures, ETM, rejets liquides et atmosphériques) (FAO & UNEP, 2021 ; Hou et al., 2023). Ces polluants sont transférés vers le sol par infiltration et ruissellement, où ils peuvent s'accumuler, être adsorbés par les particules du sol ou migrer vers les eaux souterraines et superficielles.

Cette contamination entraîne une dégradation des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, se traduisant par une baisse de fertilité, une altération de la structure et une réduction de la biodiversité édaphique. Les impacts s'étendent également aux écosystèmes et à la santé humaine, notamment par la contamination de la chaîne alimentaire et des ressources en eau (Saini, 2022 ; Bünemann et al., 2024).

2.2.2. Comportement des polluants dans les sols

Le sol agit en effet comme un réservoir en accumulant les dépôts venant de l'atmosphère mais, en raison de la baisse des émissions anthropiques, le sol peut également contribuer à

enrichir l'atmosphère en polluants via les réémissions. Celles-ci dépendent du comportement des polluants dans les sols, des conditions météorologiques et des propriétés du sol.

Il peut s'agir de fuites à partir de dispositifs de stockage de matières premières, de déversement d'huiles de vidange ou de décharges. Parmi les sources diffuses, on retrouve des applications directes comme l'épandage qui peut constituer une source de pesticides pour les sols agricoles.

Une fois déposés au sol, le devenir des polluants dans ce milieu dépend de deux facteurs : la rétention et la persistance (Lemière, 2001). Le premier correspond à la capacité du polluant à migrer ou non dans le sol. La rétention dépend de propriétés intrinsèques au polluant comme sa capacité à interagir avec les particules du sol ou les ligands en solution. Un certain nombre de processus influencent le comportement et la migration des contaminants dans les sols.

Il s'agit essentiellement de (Figure 9) :

Réactions d'échange : (volatilisation, adsorption-désorption, complexation, dissolution-précipitation…) entre les phases solides (constituants minéraux et organiques du sol), liquides (eau interstitielle) et gazeuses (porosité non remplie d'eau) du sol.

Réactions de dégradation *:* photolyse, hydrolyse chimique, biodégradation.

Phénomènes de transfert des polluants et de leurs produits de dégradation : vers l'atmosphère par volatilisation, vers les eaux de surface par ruissellement, vers les eaux souterraines par lixiviation ou écoulement gravitaire, vers les plantes par absorption racinaire.

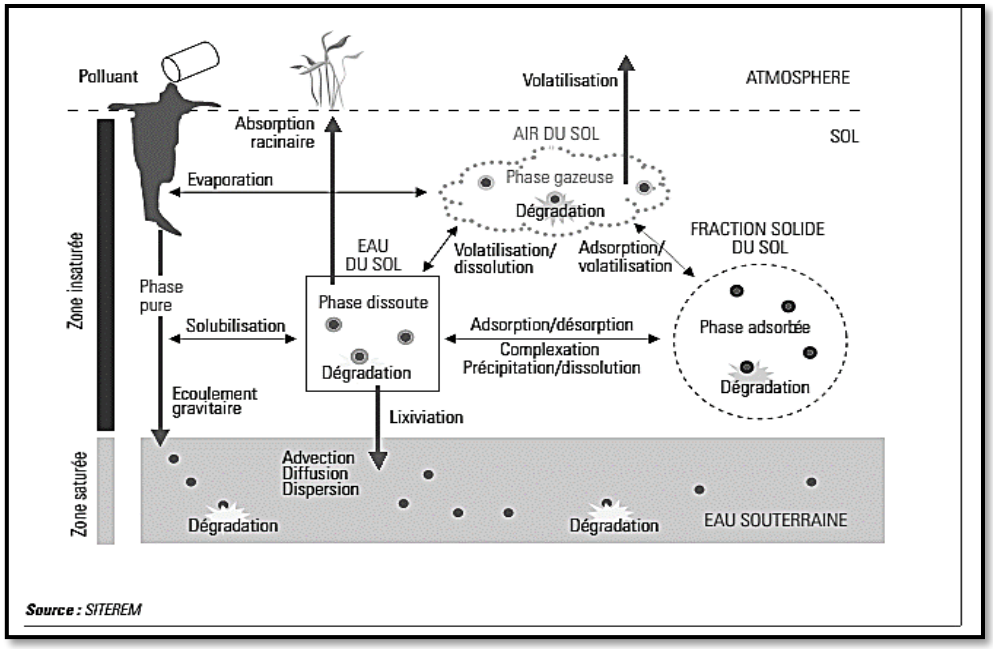


Figure 9. Comportement des polluants dans le sol.

Pour un polluant donné, la résultante de ces processus dépend de :

- Ses propriétés physico-chimiques (solubilité, volatilité, hydrophobicité, densité, viscosité…),
- Des caractéristiques du sol (teneur en matière organique, pH, porosité, activité biologique…),
- De l'hydrogéologie (profondeur de la nappe, conductivité hydraulique, sens des écoulements souterrains…),
- Des conditions locales (pluviométrie, topographie, couvert végétal…).

La résultante de ces processus détermine leurs devenirs dans le sol : sa persistance, sa biodisponibilité, son accumulation préférentielle dans certains horizons du sol, son immobilisation par la biomasse (stockage dans la biomasse), sa vitesse de migration dans le profil, sa capacité à atteindre la nappe …

3. Surexploitation des ressources naturelles

La gestion des ressources naturelles compte parmi les défis critiques auxquels les pays en développement sont confrontés aujourd'hui. En effet, les ressources naturelles sont souvent considérées comme des actifs essentiels qui stimulent le développement économique et la création de richesses et également un élément des droits de l'homme. Au fil du temps et avec la progression de l'industrialisation, l'exploitation des ressources a augmenté.

Pour satisfaire les besoins humains, les ressources de la planète sont utilisées quotidiennement. Même si ces ressources peuvent se renouveler, elles ne sont pas illimitées. Lorsque le prélèvement d'une ressource dépasse sa capacité à se reconstituer naturellement « régénération », on parle alors de surexploitation. Une telle surexploitation menace en fin de compte les moyens de subsistance et le bien-être des personnes qui dépendent de ces ressources, et met en péril la santé des écosystèmes (causes d'extinctions, dérives génétiques, consanguinité…).

Ce risque d'épuisement des ressources, qui se manifeste notamment sous la forme d'effondrements des richesses biologiques, démontre la nécessité de réguler l'exploitation des ressources naturelles de manière à mieux préserver les ressources et leurs écosystèmes. La toute première conférence des Nations Unies sur les questions environnementales, la Conférence des Nations Unies sur l'environnement humain de 1972 tenue à Stockholm, en Suède, a adopté des principes fondamentaux à cet égard.

La surexploitation correspond à l'utilisation ou au prélèvement des ressources naturelles à un rythme supérieur à leur capacité de renouvellement naturel. Elle constitue l'une des principales causes de l'érosion de la biodiversité et de la dégradation des écosystèmes à l'échelle mondiale (IPBES, 2019).

La surexploitation des ressources naturelles participe fortement à l'érosion de la biodiversité par :

- La destruction d'habitats naturels ;
- La réduction des ressources disponibles dont dépendent de nombreuses espèces sauvages ;
- Les différents types de pollution ;
- La perturbation et la mortalité de certaines espèces sauvages voir même protégées (récolte/chasse/pêche intensive).

3.1. Les causes de la surexploitation des ressources

Deux facteurs principaux sont à l'origine de la surexploitation des ressources :

- Les modes de production des ressources : Les principaux modes de production des ressources ne sont pas durables (les pratiques agricoles intensives, la surpêche et l'exploitation forestière excessive).
- La croissance démographique et l'augmentation de la consommation, qui entraînent une demande accrue de nourriture, d'eau, d'énergie et de matériaux qui se traduit par une forte pression sur les ressources naturelles.
- La réduction de la taille des populations. En Afrique, ce sont plus de la moitié des espèces d'oiseaux et de mammifères qui seront perdues d'ici 2100 si rien n'est envisagé pour stopper cette spirale infernale. La Terre est confrontée à une extinction massive d'espèces, la première depuis la disparition des dinosaures il y a environ 65 millions d'années et la sixième en 500 millions d'années.

Les autres facteurs renforcent l'impact de cette surexploitation. En effet, si les effets croissants du changement climatique continuent de se faire sentir cette perte pourrait atteindre 40 % d'ici 2050 même si les principales causes de la diminution des espèces restent

la fragmentation de leurs habitats (urbanisation, déforestation…) et la surexploitation via notamment la chasse et la pêche.

Ces facteurs conjugués entrainent une autre conséquence néfaste sur la biodiversité : le déplacement des populations vers des habitats moins adaptés. Cette migration des espèces provoque une diminution du taux de survie et se manifeste via un frein à la reproduction. Certaines espèces sont contraintes à se déplacer en dehors de leur habitat optimal vers un habitat de moindre qualité et cela entraîne une baisse du taux de survie mais également une réduction de la viabilité de la population.

3.2. Équilibrer les droits et les intérêts sur les ressources naturelles

La détermination des voies et moyens dont les gens peuvent et devraient accéder aux ressources naturelles, en bénéficier, participer à la prise de décision et en assumer la responsabilité a été façonnée par des concepts tels que la propriété et les droits. D'une part, les droits de propriété divisent les terres et les territoires en :

- Propriété privée, où les droits sont détenus par des individus ou des entreprises ;
- Propriété commune, où les droits sont partagés par une communauté ;
- Propriété publique, où les droits sont détenus par l'État ; et les zones d'accès libre, où aucun droit spécifique n'est attribué (Aggrawal & Elbow, 2006).

Les droits de propriété sont étroitement liés aux droits sur les ressources naturelles, qui comprennent le droit d'exploiter une ressource, comme la chasse dans une forêt ; ou des droits de gestion qui accordent le pouvoir de décider de l'exploitation, par exemple, en imposant des restrictions de chasse saisonnières.

3.3. Besoin d'un changement transformateur

Malgré les efforts consentis depuis les années 70, les tendances actuelles de l'exploitation des ressources naturelles ne sont pas viables et produisent des résultats potentiellement dévastateurs.

Le Rapport d'évaluation mondial de l'IPBES (2019) a souligné que des changements transformateurs sont nécessaires pour protéger les ressources dont dépendent la vie et le bien-être du genre humain. Le rapport reconnaît également que, de par sa nature même, le changement transformateur est souvent opposé par ceux qui ont intérêt au maintien du statu quo. Les acteurs de la société civile soulignent l'importance pour les gouvernements de prendre en compte les intérêts acquis et de favoriser une prise de décision inclusive, ainsi qu'un rééquilibrage des priorités en ce qui concerne les droits et les intérêts, afin de garantir et l'intégrité écologique et la justice sociale (Allan et al., 2019).

4. Changement climatique et ses impacts

Le changement climatique est l'un des plus grands défis à relever pour les sociétés humaines au XXI^{ème} siècle. La biodiversité, l'agriculture et même l'ensemble de notre système économique sont menacés par le dérèglement climatique. Pour réduire au maximum la hausse de la température globale de la planète, nous allons devoir transformer radicalement nos sociétés en réduisant nos émissions de gaz à effet de serre. Cela aura un impact sur notre production et notre consommation énergétique et alimentaire, notre façon de nous loger, de travailler, de nous déplacer…

4.1. Définition du changement climatique

Le changement climatique est défini comme « un changement dans l'état du climat identifié par des changements dans la moyenne et/ou la variabilité des propriétés du climat qui persistent pendant une période prolongée, généralement plusieurs décennies ou plus. Les changements peuvent être dus à des causes naturelles, mais depuis le milieu du XXe siècle, l'activité humaine a

été la principale cause des modifications observées (GIEC, 2021). Autrement dit, il est défini comme les modifications de la température de la terre et des conditions météorologiques qui se produisent au fil du temps. Le changement climatique peut résulter de processus naturels, mais est maintenant largement attribué à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone, dû aux activités humaines comme la combustion de combustibles fossiles et la déforestation (ONU, 2024).

4.2. Conséquences des changements climatiques sur l'écosystème et la planète

Une augmentation des températures à cause du réchauffement climatique affecte l'ensemble de l'écosystème mondial. Il n'est pas seulement question de la chaleur ressentie. La météo elle-même est influencée par le changement climatique, avec une augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes et des changements conséquents dans les modèles météorologiques habituels.

La capacité de régulation des océans est également affectée par une augmentation des températures. Si les températures globales augmentent de façon très importante, nous devrons faire face à l'augmentation du niveau des océans, l'acidification et la désoxygénation des zones océaniques. En outre, une acidification des océans trop prononcée limite la capacité des mers de la planète à produire de l'oxygène et à stocker le CO_2, participant ainsi à accroître encore davantage le réchauffement climatique.

Enfin, cela peut affecter des zones de forêts et les écosystèmes fragiles (barrière de corail, forêt amazonienne) ainsi que la biodiversité (les coraux, certains insectes et même des mammifères pourraient ne pas survivre).

4.2.1. Impacts des changements climatiques sur l'écosystème

En modifiant les équilibres naturels (températures, cycle de l'eau, courants marins et aériens …), le dérèglement climatique est responsable de perturbations importantes. Parmi les conséquences les plus immédiates : l'augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité

des événements météorologiques extrêmes (inondations, tempêtes, cyclones, sécheresses et feux de forêts, épisodes caniculaires …).

D'autres phénomènes à évolution plus lente sont aussi perceptibles : la fonte des glaces et l'élévation du niveau des mers, l'érosion progressive des côtes, la désertification, la raréfaction des ressources, le bouleversement des écosystèmes et la disparition de certaines espèces. En effet, le changement climatique représente une menace très grave et ses conséquences ont une incidence sur de nombreux aspects différents de notre vie.

4.2.2. Impact sur l'aire de répartition

Il est indéniable que les changements climatiques modifient les conditions des milieux terrestres. En raison du réchauffement des températures, les niches écologiques se déplacent de près de 100 kilomètres vers le nord tous les 20 ans. Les espèces animales et végétales cherchent à retrouver un climat plus frais, favorable à leur survie. Ces déplacements ont toutefois des conséquences sur la santé des écosystèmes pouvant entraîner une difficulté d'adaptation, une propagation des maladies, une augmentation des espèces exotiques envahissantes et des changements dans les réseaux trophiques. Un réseau trophique correspond au déplacement de l'énergie et des ressources au sein d'un écosystème lors des interactions alimentaires entre les espèces.

Certaines espèces vulnérables pourront même être menacées d'extinction en raison de leur incapacité à s'adapter aux conditions changeantes, telles que le caribou forestier, la tortue des bois, la rainette faux-grillon de l'ouest et le noyer cendré. Les changements de répartitions pourraient donc aussi se traduire par la contraction de l'habitat, diminuant l'espace nécessaire à une population suffisamment importante et en santé.

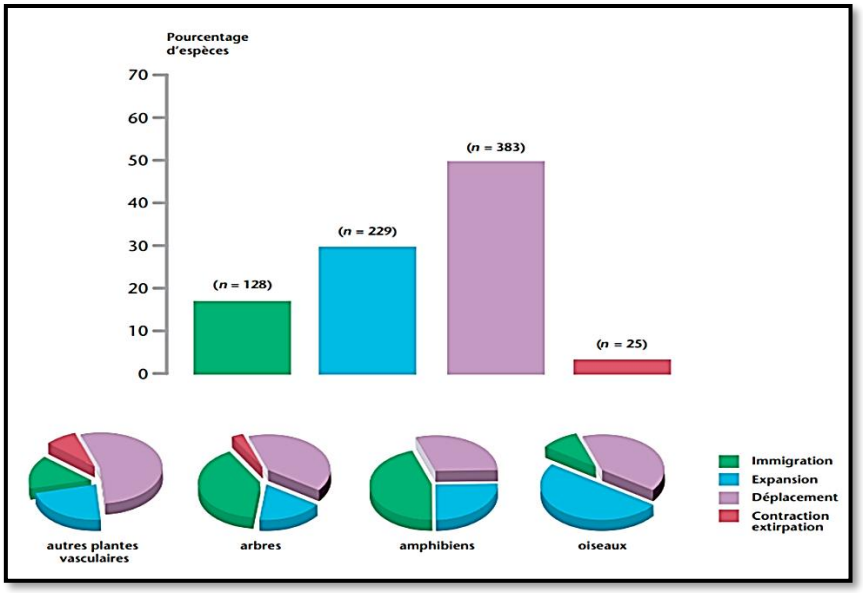


Figure 9. Nombre d'espèces qui verront leur aire de répartition changer en raison des changements climatiques.

Les migrations forcées des espèces : les espèces peuvent être obligées de se déplacer pour survivre, atteindre des altitudes plus élevées, des eaux plus profondes …

- Le changement climatique peut aussi *désynchroniser les cycles* entre une proie et son prédateur, une plante et son pollinisateur, une espèce animale et la plante dont il se nourrit. Ainsi, alors que la période de naissance des faons coïncidait avec la reprise de la végétation, l'arrivée du printemps plus précoce menace leur survie.
- *Les événements extrêmes* peuvent également être la cause directe d'extinctions. Tempêtes, pluies intenses, canicules, etc. fragilisent ou détruisent certaines espèces. Les sécheresses rendent ainsi les forêts plus vulnérables aux tempêtes et aux incendies. Le changement climatique accentue le risque de disparitions d'espèces. C'est le cas pour le crapaud doré, disparu dans les années 1990 à la suite d'inondations extrêmes au Costa Rica.
- Enfin, le changement climatique peut *modifier les caractéristiques* des espèces, réduire leur taille, changer leur physiologie ... Comme par exemple au-dessus de 31°C, les œufs des

tortues se transforment en tortues femelles. Au nord de la Grande barrière de corail, 87% sont aujourd'hui des femelles. La tortue européenne cistude rencontre le même problème.

4.2.3. Impact sur les espèces

Les changements climatiques représentent une menace majeure pour la biodiversité mondiale. La protection des habitats naturels, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la conservation des espèces sont essentielles pour limiter ces impacts. En effet, le dérèglement du climat accélère l'effondrement de la biodiversité par la modification des conditions de vie des espèces, en les forçant à migrer ou à adapter leur mode de vie, ce que toutes ne sont pas capables de faire (Pecl et al., 2017). Enrayer cet effondrement est crucial : nous avons besoin de la nature dans toute sa diversité pour respirer, nous nourrir, mais aussi réguler le climat et nous préserver de ses aléas extrêmes.

Les principaux impacts des changements climatiques sur les espèces

Exemple 1. Le corail corne de cerf (*Acropora cervicornis*)

Selon l'UNESCO, les dérèglements climatiques, entrainant l'augmentation de la température de l'eau et l'acidification des océans, sont responsables du phénomène de blanchissement des coraux, notamment dans les caraïbes. Le blanchissement se produit quand les coraux, stressés par l'augmentation de la température de l'eau, expulsent les algues microscopiques avec lesquelles ils vivent en symbiose, les zooxanthelles. Ce sont elles qui fournissent aux coraux leur nourriture et donnent leurs couleurs à leur squelette calcaire. Si les zooxanthelles ne retournent pas dans le tissu corallien, le corail meurt.

Exemple 2. L'Ours polaire (*Ursus maritimus*) :

L'ours polaire est fortement menacé par la fonte de la banquise arctique causée par le réchauffement climatique. La réduction de son habitat limite la chasse aux phoques, provoque un manque de nourriture et diminue la reproduction et la survie des jeunes. À long terme, cette situation risque d'entraîner une baisse importante des populations d'ours polaires. Selon le

GIEC (IPCC, 2023), l'Arctique pourrait connaître des étés presque sans glace avant la fin du siècle si les émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter.

4.2.4. Changement du rythme saisonnier et déséquilibre écologique

Le cycle de vie des espèces est également perturbé par l'arrivée de plus en plus tardive de la neige en hiver et par sa fonte hâtive au printemps. Cela a notamment un impact sur certaines espèces qui usent de tactiques de camouflage pour se protéger de leurs prédateurs. En effet, le pelage de l'hermine devient blanc en hiver en raison de la diminution de la durée journalière d'ensoleillement. L'arrivée de plus en plus tardive de la neige rend inefficace cette technique de camouflage, l'exposant plus facilement face à ses prédateurs. Le petit mammifère doit ainsi migrer vers le nord pour adapter son cycle de vie aux changements dans les conditions du milieu.

Les variations dans la disponibilité des ressources végétales nécessaires à la survie des espèces forcent également les animaux qui en dépendent à se déplacer. Cela peut entraîner des déséquilibres écologiques comme des changements dans les stades de développement et dans les relations alimentaires des espèces et ultimement, une perte de biodiversité.

En milieu marin l'augmentation hâtive des températures de l'eau au printemps en milieu aquatique perturbe le cycle de vie des espèces. Cette hausse de la température favorise d'ailleurs la floraison du plancton. Si la hausse des températures survient hâtivement et que le plancton fleurit trop tôt, certains crustacés et poissons ne seront pas assez développés pour s'en nourrir, causant ainsi de la mortalité chez plusieurs espèces. Pour survivre, celles-ci doivent migrer vers le nord.

Le réchauffement des températures favorise également la présence et la prolifération d'espèces envahissantes dont certaines sont exotiques. Au détriment d'autres espèces, les espèces envahissantes s'approprient les ressources et l'espace et peuvent causer une perte de biodiversité. Certaines d'entre elles peuvent même provoquer davantage de problèmes liés aux

allergies chez l'humain. C'est d'ailleurs le cas de l'herbe à poux dont l'aire de répartition risque de s'agrandir tout comme sa production de pollen.

5. Invasions biologiques

5.1. Les invasions biologiques et leurs impacts sur les niveaux de biodiversité

Une espèce exotique envahissante est une espèce introduite par l'homme, volontairement ou de manière fortuite dans un écosystème dont elle ne faisait pas partie historiquement et dans lequel elle s'établit, se disperse et a des impacts (IUCN/SSC, 2000 ; Blackburn et al., 2011).

Autrement dit, il s'agit d'une espèce introduite à partir d'une aire biogéographique distincte de celle étudiée et capable d'avoir une descendance fertile, de se multiplier et de s'étendre géographiquement dans sa nouvelle aire de distribution (Wilson et al., 2009 ; Richardson et al., 2011). D'autres auteurs insistent sur le fait que l'élément central de la définition d'une invasion repose sur la disparition des barrières limitant la prolifération de l'espèce, lui conférant alors la capacité de se multiplier dans le milieu (Blackburn et al., 2011). Cette définition ne semble pas exclure que les espèces natives puissent être considérées comme envahissantes, dès lors qu'une modification du milieu leur confère un avantage compétitif leur permettant de coloniser de nouveaux territoires et ainsi d'accroître durablement leur aire de répartition (Valery et al., 2009 ; Gilroy et al., 2017 ; Nackley et al., 2017).

Si l'on adopte à présent une approche écologique ou sociologique de la définition, une espèce envahissante est définie comme une espèce introduite qui connaît une explosion démographique et géographique entrainant des impacts d'ordre écologique, sanitaire et/ou économique (Thevenot 2013 ; Blackburn et al., 2014 ; Kumschick et al., 2015).

5.2. Impacts des invasions biologiques sur différents niveaux de la biodiversité

Les invasions biologiques ont des conséquences sur tous les niveaux d'organisation du vivant, du gène au fonctionnement des écosystèmes (Simberloff et al., 2013). Au niveau moléculaire, les croisements entre espèces (ou hybridations) peuvent conduire aux transferts de gènes d'une espèce à une autre et ainsi à la régression de caractères spécifiques à une des deux espèces.

Les effets des EEE (Espèces exotiques envahissantes) sur les populations d'espèces natives ont été largement étudiés, notamment les introductions de prédateurs terrestres dans les systèmes insulaires qui ont conduit à de nombreuses extinctions locales ou globales (McCreless et al., 2016). Néanmoins ces effets ne sont pas limités aux îles, les EEE peuvent causer des déclins de population dans tous les types de systèmes dans lesquels elles sont introduites.

Exemple 1. Le canard de Hawaii (ou Koloa) (*Anas wyvilliana*) est actuellement menacé par la présence du canard colvert (*Anas platyrhynchos*) qui a été introduit pour la chasse et l'ornement des mares (Uyehara et al., 2007). Les canards colverts se sont établis sur les îles hawaïennes en populations autonomes, adaptées aux environnements anthropisés. Ils sont capables de se reproduire avec les Koloa, similaires en apparence mais très différents sur le plan génétique et comportemental (Figure 10). Les hybrides issus du croisement entre les deux espèces de canards sont fertiles et peuvent, en se reproduisant et en remplaçant les populations de Koloa, conduire à la perte du matériel génétique unique de cette espèce.

Les EEE (Espèces exotiques envahissantes) sont aussi responsables de changements comportementaux à l'échelle des individus. Les variations comportementales les plus fréquemment observées et décrites chez les espèces natives d'animaux concernent l'évitement des prédateurs (comportements de défense) et les habitudes alimentaires (changement de stratégie de nourrissage) (Ruland & Jeschke, 2020), avec potentiellement des effets en cascades sur les autres espèces.

Exemple 2. Dans le sud de l'Angleterre l'arbuste envahissant *Rhododendron ponticum* offre aux souris des bois natives (*Apodemus sylvaticus*) une protection contre leur principal prédateur, la chouette hulotte (*Strix aluco*), mais diminue par ailleurs la disponibilité en nourriture en empêchant la croissance des plantes natives desquelles la souris se nourrit (Figure 10). Cette introduction a donc des effets sur le comportement de fourragement de la souris, son comportement de défense face à la chouette mais aussi sur le comportement de la chouette qui devra adapter ses techniques de chasse (Stewart et al., 2022).

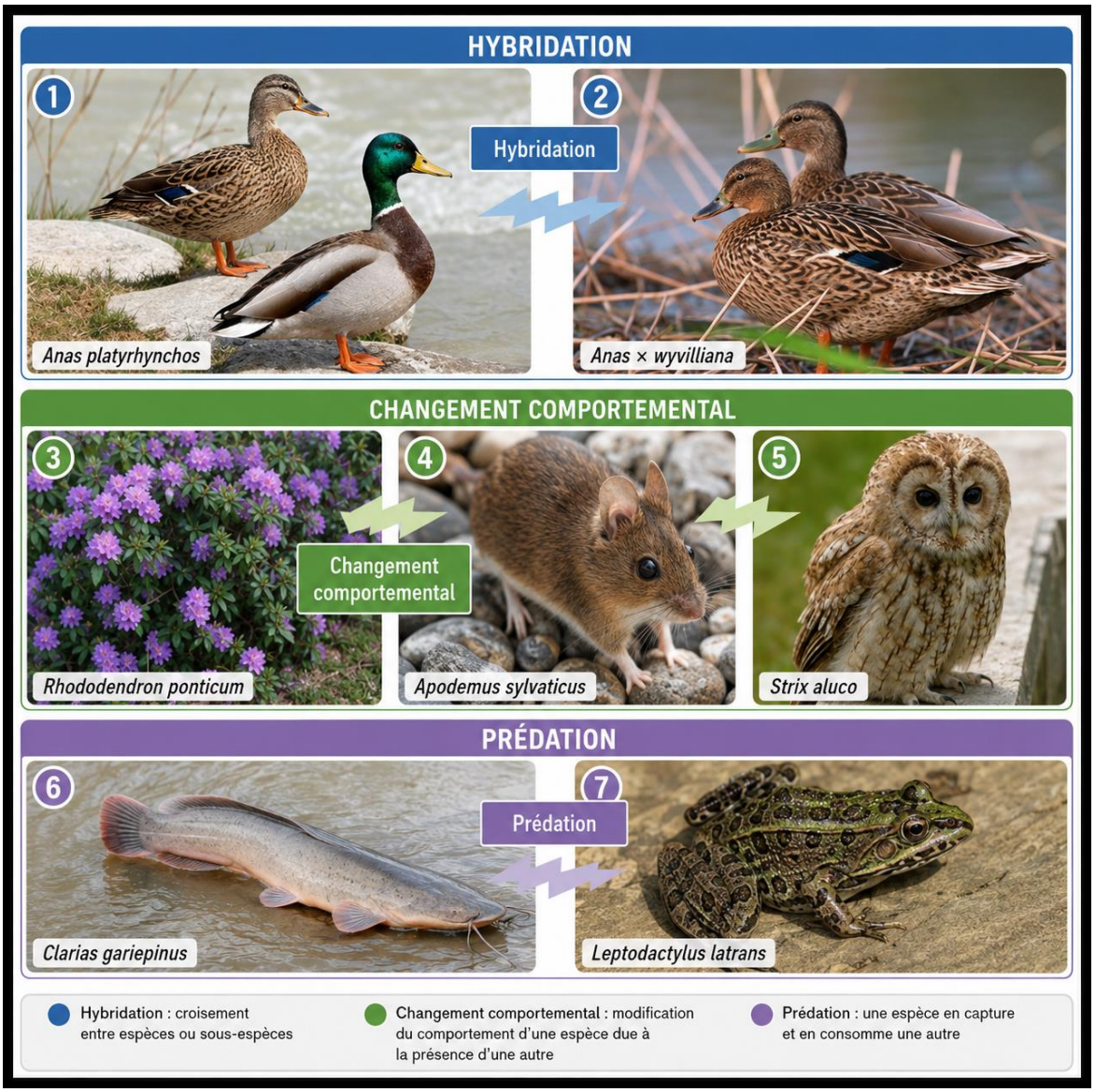


Figure 10. Exemples d'impact d'espèces exotiques envahissantes sur des espèces natives.

Exemple 3. Le poisson chat africain *Clarias gariepinus* a été introduit dans de nombreux cours d'eau à travers le monde. Au Brésil où il est exotique, il a été observé comme consommateur direct de diverses espèces natives de poissons, arthropodes et amphibiens (Figure 10).

En particulier, le poisson-chat est un prédateur de la grenouille native *Leptodactylus latrans*, connue pour résister aux habitats dégradés et anthropisés mais visiblement sensible à l'introduction de prédateurs exotiques (Vitule et al., 2008). Ces impacts négatifs sur les populations d'espèces natives peuvent ensuite avoir des conséquences en cascade sur les communautés, les écosystèmes et les processus associés.

Exemple 4. L'introduction du serpent arboricole (*Boiga irregularis*) sur l'île de Guam dans le Pacifique Ouest. Son introduction non-intentionnelle sur l'île dans les années 1940 a conduit à l'extinction locale de 10 des 12 espèces d'oiseaux présentes, les deux dernières étant en effectifs si faibles qu'elles sont considérées comme fonctionnellement éteintes.

Ces extinctions ont été associées à la perte totale du service de dispersion de graines des arbres à fruits charnus, assuré uniquement par les oiseaux. En comparant l'île de Guam avec des îles voisines contenant encore ce groupe fonctionnel, Rogers et al., (2017) ont noté une perturbation de l'écosystème allant jusqu'à la structure de la forêt même, du fait d'un recrutement et une dispersion des graines en déclin par rapport aux autres îles.

Exemple 5. Le cas du frelon asiatique (*Vespa velutina*), une espèce invasive originaire d'Asie du Sud-Est, notamment de Chine, introduite accidentellement en Europe au début des années 2000, probablement via le transport de marchandises. Détecté pour la première fois en France en 2004, il s'est ensuite propagé rapidement à travers une grande partie de l'Europe occidentale grâce à sa forte capacité de dispersion et à l'absence de prédateurs naturels efficaces (Arca et al., 2015).

Le frelon asiatique représente une menace importante pour la biodiversité et les activités humaines. Il exerce une forte pression de prédation sur les insectes pollinisateurs, en particulier l'abeille domestique (*Apis mellifera*), dont il capture les ouvrières à l'entrée des ruches. Cette prédation peut provoquer un affaiblissement des colonies, une diminution de la production de miel et parfois l'effondrement complet des ruchers. L'espèce perturbe également les réseaux trophiques locaux et peut entrer en compétition avec les insectes indigènes pour les ressources alimentaires.

Par ailleurs, l'expansion du frelon asiatique est favorisée par les changements environnementaux et climatiques, notamment l'augmentation des températures qui facilite sa survie hivernale et l'extension de son aire de répartition. Sa présence constitue ainsi un exemple emblématique des conséquences écologiques, économiques et sanitaires liées aux espèces exotiques envahissantes (Monceau et al., 2014 ; Bertolino, 2016).

A travers une méta-analyse, Gallardo et al., (2016) ont montré que les introductions d'espèces exotiques en milieu aquatique causent systématiquement des diminutions d'abondance de certaines espèces natives. Cela n'affecte pas nécessairement le nombre d'espèces présentes (la richesse taxonomique est la même) mais altère significativement les fonctions remplies par les populations en déclin (David et al., 2017).

5.3. Les introductions d'espèces à l'échelle globale

Les travaux de Dawson et al., (2017) et Seebens et al., (2018) ont dressé un état des lieux clair sur les introductions d'espèces à l'échelle mondiale :

(1) Les introductions d'espèces à travers le monde ne cessent d'augmenter et ne semblent pas montrer de saturation malgré la prise de conscience du déclin de la biodiversité (Seebens et al., 2017) ;

(2) Ces introductions sont d'autant plus nombreuses que les espèces sont introduites dans plusieurs régions, avec une accélération des déplacements interrégionaux après les années 1800 pour tous les groupes taxonomiques (Seebens et al., 2021) ;

(3) Le pool d'espèces introduites est toujours en extension, avec notamment une forte proportion des introductions enregistrées dans les dernières décennies qui concernent des espèces n'ayant jamais été introduites auparavant (entre la moitié et un quart des introductions, en fonction du groupe taxonomique considéré) (Seebens et al., 2018) ;

(4) Les introductions d'espèces concernent tous les groupes taxonomiques (plantes, animaux, champignons, microbes), toutes les régions du monde (îles, continents, océans, pôles) et tous les types d'écosystèmes (terrestre, aquatique, marin) ;

(5) Les points chauds d'invasions dépendent des groupes taxonomiques mais sont principalement localisés sur les îles océaniques et les régions côtières des continents, avec une prédominance sur l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Australie.

La richesse en espèces exotiques établies est positivement corrélée à la densité de population humaine, au produit intérieur brut et à l'aire de distribution native des espèces (Dawson et al., 2017). Partant de ces constats, il est tentant de faire l'hypothèse que les conséquences des invasions sur la biodiversité native à l'échelle globale sont proportionnelles à l'accumulation d'espèces exotiques (Walsh et al., 2012) et donc aux activités humaines (Early et al., 2016). Néanmoins, les impacts des invasions dépendent de bien plus de paramètres que de la simple présence d'espèces exotiques.

Pyšek et al., (2020) identifient trois types de facteurs contribuant au succès d'une invasion biologique et, par conséquent, à l'impact de cette dernière :

- Des facteurs liés à l'événement d'introduction (quantité d'individus introduits, voie d'introduction),
- Des traits des espèces exotiques et

- Des caractéristiques du milieu d'introduction. Ce dernier aspect comprend notamment les conditions environnementales, la préadaptation de l'espèce exotique à ces conditions, la disponibilité de ressources et la communauté d'espèces en place dans le milieu.

5.4. Les étapes du processus d'invasion

Le processus d'invasion est divisé en plusieurs étapes (Leroy, 2025) :

- ✓ Etape de transport et d'introduction qui va amener une espèce non native dans un nouvel endroit. Nous la qualifions d'espèce exotique.
- ✓ Ensuite, une petite partie des espèces exotiques peut survivre et se reproduire dans le nouveau milieu, appelée étape de l'établissement.
- ✓ Et parmi les espèces exotiques établies, une petite partie peut se propager et avoir des impacts. Elles deviennent alors des espèces exotiques envahissantes (Figure 11).

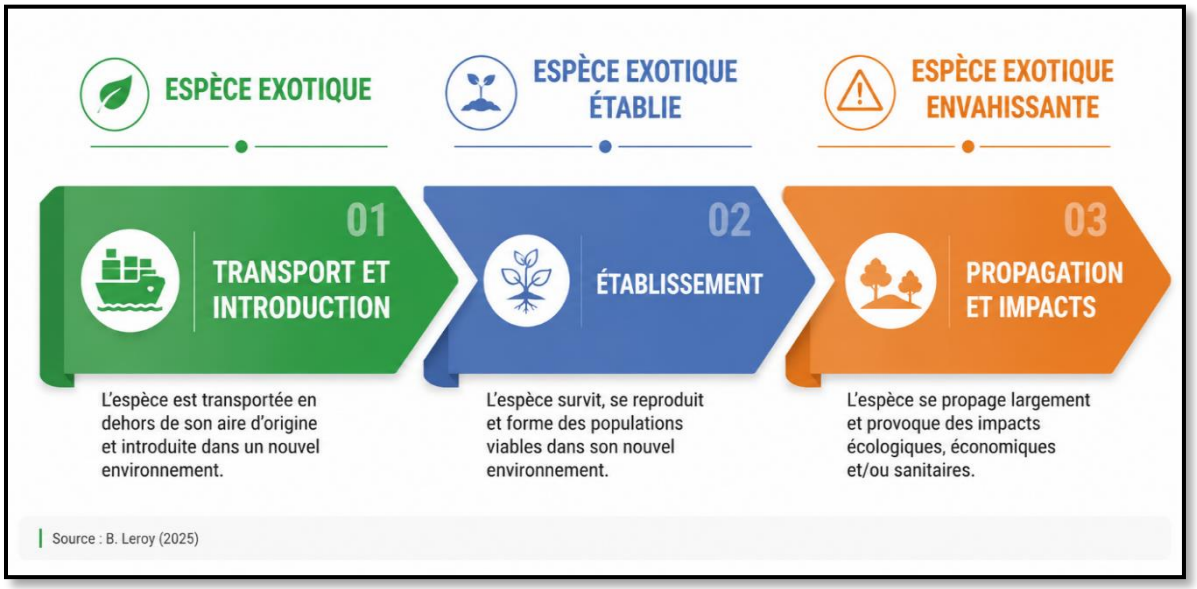


Figure 11. Les étapes d'une invasion biologique (Leroy, 2025).

➢ Les principaux facteurs indirects qui expliquent le transport et l'introduction sont les activités humaines qui créent les voies d'introduction. C'est-à-dire qu'il va s'agir essentiellement du commerce international et de son intensification, ainsi que de la globalisation des échanges commerciaux.

***Exemple* :** Chez les poissons d'eau douce, les flux d'introduction montrent que les principales régions sources et réceptrices d'espèces sont l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie. Ces régions, qui concentrent une grande partie du commerce mondial, jouent un rôle majeur dans les échanges d'espèces introduites.

5.5. Conséquences des invasions biologiques

Les impacts imputés aux espèces envahissantes sont généralement classés en trois catégories : socio-économiques, sanitaires ou écologiques.

A. Conséquences économiques

- Pertes agricoles : Des ravageurs peuvent détruire les cultures, entraînant des pertes financières importantes pour l'agriculture.
- Dégâts sur les infrastructures : Des espèces envahissantes comme les moules zébrées ou les termites peuvent endommager les infrastructures.

Coûts élevés : Le coût mondial des invasions biologiques est estimé à des centaines de milliards de dollars par an, rivalisant avec celui des catastrophes naturelles

B. Conséquences sanitaires

- Maladies et allergies : Elles peuvent introduire des pathogènes, des virus ou provoquer des allergies.
- Risques de toxicité : Certaines espèces peuvent être toxiques ou causer des envenimations.

- Impact sur la qualité de vie : Elles peuvent altérer les conditions de vie humaine et favoriser des nuisances comme la prolifération d'insectes dans les habitations.

C. Conséquences écologiques

- Perte de biodiversité : Les espèces envahissantes peuvent causer l'extinction d'espèces indigènes par compétition, prédation ou transmission de maladies, représentant la deuxième cause d'extinction mondiale.
- Modification des écosystèmes : Elles peuvent modifier les chaînes alimentaires, détruire des habitats, altérer la qualité des sols et de l'eau, et changer les cycles d'incendie.
- Homogénéisation : Elles conduisent à une uniformisation des communautés, entraînant une perte de diversité et de fonctions écologiques.

Chapitre 3. Causes de la dégradation des écosystèmes

Introduction

Les écosystèmes constituent la trame de la vie sur terre. Un écosystème est constitué de tous les organismes vivants et des interactions entre eux et avec leur environnement dans un milieu donné. Ils existent à tous les échelles, partant du moindre grain de sol jusqu'à la planète toute entière, et ils comprennent les forêts, les cours d'eau, les zones humides, les prairies, les estuaires et les récifs coralliens. Les villes et les terrains agricoles contiennent des écosystèmes modifiés par l'homme.

Les écosystèmes nous procurent des avantages inestimables. Parmi ces bénéfices nous avons un climat stable et un air respirable ; la fourniture en eau, en nourriture et en matériaux de toutes sortes ; et la protection contre les catastrophes et les maladies. Les écosystèmes naturels sont importants pour notre santé physique et mentale, et pour notre identité. Ils abritent une faune précieuse. Nombreux les considèrent comme une source de merveilles et de spiritualité.

Partout dans le monde, les écosystèmes font face à de sérieuses menaces. Des forêts sont détruites, des rivières et des lacs sont pollués, les zones humides et les tourbières sont drainées, les côtes et les océans sont dégradés et subissent la surpêche, les sols montagneux sont érodés, et les terres agricoles et les prairies sont surexploitées.

À moins que nous changions nos attitudes et restaurions nos écosystèmes, nous ne ferons pas que détruire les paysages que nous aimons, nous mettrons également en péril les fondations de notre propre bien-être et lèguerons une planète dégradée et inhospitalière aux générations futures.

1. Activités humaines

Malgré la grande interdépendance entre les êtres humains et leur environnement, la plupart des activités humaines ont et continuent de modifier plus ou moins profondément le fonctionnement des écosystèmes ou l'état de certains éléments de l'environnement. Le développement des sociétés contribue ainsi à l'extension des activités humaines ayant des incidences sur l'environnement.

D'après Mézard (2018), la perturbation anthropique est considérée comme des actions intentionnelles ou non faites par l'homme qui ont, à leur tour, des impacts néfastes sur la biodiversité et les écosystèmes. De ce fait, toutes modifications de l'écosystèmes résultant de l'activité humaine, qu'elles soient conscientes ou inconscientes, portent le nom d'anthropisation (Betsch et al., 1998). Ces actions ont les mêmes conséquences que celles des perturbations naturelles.

La dégradation des écosystèmes par l'activité humaine est causée par la destruction des habitats (déforestation, urbanisation, agriculture intensive), la pollution (chimique, plastique), la surexploitation des ressources (chasse, pêche), le changement climatique et l'introduction d'espèces exotiques envahissantes. Ces actions entraînent la perte de biodiversité, l'érosion des sols, l'acidification des océans et des menaces pour la santé humaine.

1.1. Changement d'usage des sols et des terres

1.1.1. La déforestation

La déforestation est définie comme étant la conversion de la forêt à d'autres types d'occupation de sol (agriculture, pâturage, création de réservoirs d'eau ou de centres urbains, etc.). A titre d'exemple, les activités humaines mettent en danger les forêts tropicales, car elles réduisent leur biodiversité et perturbent les cycles naturels essentiels comme celui du carbone.

Les forêts tropicales s'appauvrissent, ces forêts abritent 75 % de la biodiversité terrestre et les deux tiers de celles-ci sont concentrés dans les forêts tropicales. Or, c'est justement parce

qu'elles sont riches d'arbres et de végétaux variés qu'elles sont d'importantes réserves de carbone. L'appauvrissement des forêts tropicales nuit donc à la fois à leur biodiversité et à leur bon fonctionnement. À cause des perturbations des forêts liées à l'activité humaine, les cycles naturels (comme celui du carbone) et les relations entre les plantes et les animaux risquent de se détériorer. Pourtant, ces processus essentiels participent, notamment, à réguler le climat et la production d'oxygène.

1.1.2. L'agriculture exerce la pression la plus forte sur les écosystèmes

L'agriculture traditionnelle permettait à une grande diversité d'animaux et de plantes de coexister avec les cultures, l'évolution des pratiques agricoles depuis 1950, dans le sens de l'intensification et de la spécialisation, a contribué à une forte perte de biodiversité. L'utilisation accrue d'engrais, de l'irrigation et de pesticides, ainsi que la modification intense des terres, constituent des pressions importantes sur la faune et la flore locales, et notamment sur les oiseaux.

L'une des pressions les plus importantes est l'abandon de la gestion traditionnelle des prairies. Les pollinisateurs, tels que les abeilles, les bourdons et les papillons, en sont fortement affectés. La fragmentation des terres et le drainage, à des fins agricoles, détruisent les habitats où les oiseaux, les reptiles et les petits mammifères avaient l'habitude de se nourrir, de s'abriter et de se reproduire.

1.2. Pollution

La pollution, notamment celle provenant des produits chimiques et des déchets, est un facteur majeur de modification de la biodiversité et des écosystèmes, avec des effets directs particulièrement dévastateurs sur les habitats.

Nous associons également souvent la pollution à l'industrie, aux transports et à la production d'énergie, qui sont des sources importantes, mais près de 50 % des pressions sur la nature et les écosystèmes sont liées à la pollution proviennent des émissions agricoles dans l'air,

l'eau et le sol. La pollution par les pesticides utilisés dans l'agriculture est la principale cause de la diminution inquiétante du nombre d'oiseaux insectivores et d'oiseaux des terres agricoles.

La pollution par les pesticides touche également les amphibiens, tels que les grenouilles, les crapauds et les salamandres, les insectes et les petits mammifères. Les populations de plantes et d'insectes diminuent en raison de l'utilisation persistante d'insecticides hautement dangereux et non sélectifs.

La pollution plastique marine a été multipliée par dix depuis 1980, affectant au moins 267 espèces animales, dont 86 % des tortues marines, 44 % des oiseaux de mer et 43 % des mammifères marins. La pollution de l'air et des sols est également en hausse.

À l'échelle mondiale, le dépôt d'azote dans l'atmosphère est l'une des menaces les plus graves pour l'intégrité de la biodiversité mondiale. Lorsque l'azote se dépose sur les écosystèmes terrestres, une cascade d'effets peut se produire, entraînant souvent un déclin général de la biodiversité.

1.3. Fragmentation et détérioration des habitats

Les habitats jouent un rôle essentiel dans le maintien de la biodiversité et des services écosystémiques. Ils abritent des communautés d'espèces qui fournissent un large éventail de services écosystémiques. Les tourbières et les marais, par exemple, stockent le carbone ; les zones riveraines et les zones humides atténuent le ruissellement des eaux de pluie, tamponnent les inondations et fournissent de l'eau propre, empêchant l'érosion des sols et rechargeant les nappes phréatiques. Les forêts de montagne protègent les infrastructures situées dans les vallées alpines des avalanches, des chutes de pierres ou des coulées de boue, et fournissent du bois pour de nombreux usages tels que la construction ou l'énergie. En outre, de nombreuses espèces menacées sont liées à des habitats spécifiques. Or, ce n'est pas seulement la présence d'un habitat qui est importante pour garantir la survie de ses habitants, mais aussi sa superficie.

La fragmentation se caractérise généralement par une diminution de la surface totale de l'habitat et sa division en fragments, ou plus simplement, la rupture de la continuité (Burel & Baudry, 2003 ; Fahrig, 2017). L'un des impacts anthropiques les plus importants est la suppression de la couverture végétale originale et son remplacement par un autre type d'occupation de sol. Celui-ci se matérialise par la fragmentation et la diminution de la surface des écosystèmes qui modifient la structure spatiale du paysage initiale. Elle conduit également à une diminution de la capacité à pourvoir aux ressources nécessaires dans chaque fragment entraînant ainsi une diminution du nombre d'espèces ou d'individus par espèce (Douglas et al., 2000).

L'urbanisation constitue également une autre pression importante sur les écosystèmes, mais, de manière peut-être surprenante, la plupart des dommages ne proviennent plus de la conversion de zones naturelles en territoire urbain, mais plutôt des activités sportives, touristiques et de loisirs (25% des pressions urbaines). Cependant, la construction et la modification au sein de zones urbaines affectent également de nombreuses espèces habituées à vivre dans ces habitats urbains (environ 10 % des pressions urbaines).

1.4. Pratiques forestières et chasse non durables, et surpêche

Les pratiques forestières non durables constituent une menace majeure pour les écosystèmes terrestres et la biodiversité. L'exploitation excessive du bois, la coupe illégale, les incendies volontaires et la conversion des forêts en terres agricoles entraînent une dégradation importante des habitats naturels (UNEP, 2023). Ces activités provoquent une fragmentation des écosystèmes, une diminution de la couverture végétale et une perte de nombreuses espèces animales et végétales.

En effet, la quasi-totalité des forêts dans le monde ont été transformées par des interventions humaines. Même après reboisement, la nature des forêts gérées par l'homme est différente. Par exemple, l'habitat peut être affecté négativement s'il y a moins d'arbres

d'espèces et d'âges différents. Par ailleurs, l'enlèvement d'arbres morts et vieux et la réduction des forêts anciennes affectent de nombreuses espèces d'insectes, d'oiseaux, d'amphibiens, de reptiles, de chauves-souris et de petits mammifères, comme la barbastelle commune, l'écureuil de Perse et le lérotin commun.

La chasse non durable exerce une forte pression sur la faune sauvage. Le braconnage, la chasse excessive et le commerce illégal d'espèces menacent particulièrement les grands mammifères, les oiseaux et plusieurs espèces endémiques. La réduction des populations animales perturbe les chaînes trophiques et compromet l'équilibre écologique des écosystèmes.

Selon la FAO (2022), près de 10 millions d'hectares de forêts disparaissent chaque année dans le monde sous l'effet des activités humaines. De plus, l'IPBES (2019) souligne que l'exploitation directe des organismes figure parmi les principales causes du déclin mondial de la biodiversité.

La surpêche correspond à une exploitation des ressources halieutiques à un rythme supérieur à leur capacité naturelle de renouvellement. Elle résulte principalement de l'augmentation de la demande mondiale en produits de la mer, de l'intensification des techniques de pêche et du manque de gestion durable des stocks marins.

Les techniques de pêche intensive, telles que le chalutage de fond, provoquent non seulement une diminution des populations de poissons, mais également une destruction importante des habitats marins, notamment des récifs coralliens et des fonds benthiques. La capture accidentelle d'espèces non ciblées affecte également les tortues marines, les oiseaux et les mammifères marins (WWF, 2024).

La FAO (2024) indique qu'environ un tiers des stocks mondiaux de poissons sont exploités à des niveaux biologiquement non durables. Cette situation menace la sécurité alimentaire, les économies côtières et la biodiversité marine.

1.5. Le changement climatique

Provoqué par la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère du fait des activités humaines, le changement climatique modifie en profondeur les cycles de vie de l'ensemble des êtres vivants. Il impacte la répartition géographique des espèces et donc la chaîne alimentaire.

Le dérèglement est global : températures, incendies, tempêtes, montée des eaux, inondations… nous les voyons par le prisme des dommages causés à nos vies humaines, mais ces évènements impactent tous les écosystèmes et les êtres vivants.

1.6. Les espèces exotiques envahissantes

Les espèces exotiques envahissantes (EEE) sont des animaux, des plantes, des champignons et des micro-organismes qui ont pénétré et se sont établis dans l'environnement en dehors de leur habitat naturel. Les EEE ont des effets dévastateurs sur la vie végétale et animale indigène, provoquant le déclin, voire l'extinction, des espèces indigènes et affectant

L'introduction volontaire ou involontaire par l'Homme d'espèces exotiques envahissantes est à l'origine de la disparition de nombreuses espèces indigènes dans les écosystèmes qu'elles parasitent. Écrevisse de Louisiane, frelon asiatique, ragondin ou tortue de Floride, mais aussi bon nombre de plantes terrestres ou aquatiques sont chaque année déplacée par les activités humaines hors de leur zone d'origine et importées dans de nouveaux écosystèmes où elles font des ravages.

L'économie mondiale, avec l'augmentation du transport de marchandises et des déplacements, a facilité l'introduction d'espèces exotiques sur de longues distances et au-delà des frontières naturelles. Les effets négatifs de ces espèces sur la biodiversité peuvent être intensifiés par les changements climatiques, la destruction des habitats et la pollution.

Les EEE ont contribué à près de 40 % de toutes les extinctions d'animaux depuis le 17e siècle, lorsque la cause est connue. Parallèlement, les pertes environnementales dues aux

parasites introduits en Australie, au Brésil, en Inde, en Afrique du Sud, au Royaume-Uni et aux États-Unis sont estimées à plus de 100 milliards de dollars par an. Les EEE sont un problème mondial qui nécessite une coopération et une action internationales. La prévention du mouvement international de ces espèces et la détection rapide aux frontières sont moins coûteuses que le contrôle et l'éradication.

2. Les facteurs socio-économiques

Les facteurs socio-économiques, comme l'agriculture intensive, l'urbanisation, la pauvreté et la croissance démographique non maîtrisée génèrent une pression sur les écosystèmes sous l'effet de l'expansion urbaine qui risque de reconfigurer les espaces, les territoires et la distribution des populations. Ainsi, ces facteurs conduisent à la surexploitation des ressources naturelles, à la pollution, à la destruction des habitats et aux changements climatiques, ce qui compromet les services écosystémiques essentiels à l'économie et au bien-être humain. En retour, la dégradation des écosystèmes aggrave la pauvreté et les inégalités, créant une spirale négative qui affecte les populations les plus vulnérables et menace le développement durable.

2.1. Facteurs Socio-économiques directs

- **Agriculture intensive et élevage** : L'agriculture mondiale est confrontée à des pressions croissantes dues aux changements climatiques, à la dégradation des ressources et aux inégalités socio-économiques, ce qui rend nécessaire la mise en œuvre de pratiques agricoles durables favorisant la résilience et la viabilité à long terme (Mirzabaev et al., 2023). D'autre part, la déforestation pour les terres agricoles et l'utilisation excessive de pesticides et d'engrais entraînent la perte de biodiversité, la dégradation des sols et la pollution de l'eau et de l'air.
- **Urbanisation** : La transformation des habitats naturels en zones urbaines réduit la surface des écosystèmes et leur capacité à fournir des services.

- **Exploitation des ressources** : La surpêche, l'exploitation forestière et la surexploitation des nappes phréatiques conduisent à la disparition des ressources et à l'épuisement des écosystèmes.
- **Pauvreté et démographie** : Une pauvreté élevée et une forte croissance démographique, particulièrement dans les zones arides ou rurales, peuvent accroître la pression sur les écosystèmes, car les populations dépendent davantage des ressources naturelles pour leur survie.

2.2. Facteurs Socio-économiques indirects

- **Politiques économiques** : Les politiques monétaires, de commerce et d'investissement peuvent favoriser des pratiques économiques non durables qui entraînent la dégradation des écosystèmes.
- **Mondialisation** : Elle peut exacerber l'exploitation des ressources et augmenter le risque de propagation des maladies et des espèces envahissantes.

3. Facteurs environnementaux

Les facteurs environnementaux de la dégradation des écosystèmes sont nombreux et souvent interdépendants. Les principaux sont :

3.1. Changement climatique

- Augmentation des températures.
- Modification des régimes de précipitations.
- Multiplication des événements extrêmes (sécheresses, inondations, canicules, tempêtes).
- Élévation du niveau de la mer et acidification des océans.

3.2. Perte et fragmentation des habitats

- Déforestation.
- Urbanisation et artificialisation des sols.

- Construction d'infrastructures (routes, barrages).
- Conversion des milieux naturels en terres agricoles.

3.3. Pollution

- Pollution de l'air par les émissions industrielles et les transports.
- Pollution des eaux par les rejets domestiques, industriels et agricoles.
- Pollution des sols par les pesticides, métaux lourds et déchets.
- Pollution plastique et microplastiques.

3.4. Surexploitation des ressources naturelles

- Déforestation excessive.
- Surpêche.
- Chasse non durable.
- Extraction minière intensive.
- Surexploitation des ressources en eau.

3.5. Introduction d'espèces exotiques envahissantes

- Compétition avec les espèces indigènes.
- Prédation et transmission de maladies.
- Modification des habitats et des réseaux trophiques.

3.6. Dégradation des sols

- Érosion.
- Salinisation.
- Compactage des sols.
- Désertification.
- Perte de fertilité et de matière organique.

3.7. Perturbation des cycles biogéochimiques

- Excès d'azote et de phosphore provenant des engrais.
- Eutrophisation des milieux aquatiques.
- Modification du cycle du carbone et de l'eau.

4. Conséquences sur les écosystèmes et les populations

Parmi ces conséquences nous citons :

- **Perte de services écosystémiques** : La dégradation des écosystèmes affecte la qualité de l'air et de l'eau, la disponibilité des aliments et des ressources médicinales, et la régulation du climat.
- **Impact sur les moyens de subsistance** : Les populations les plus pauvres et les plus vulnérables sont les plus touchées, car leur survie et leur santé dépendent fortement de la nature.
- **Menace pour le développement durable** : L'effondrement des écosystèmes peut entraîner une diminution du PIB, une augmentation des maladies infectieuses, des famines et des déplacements de population, créant un cercle vicieux de dégradation environnementale et de pauvreté.

Chapitre 4. Conséquences de la dégradation des écosystèmes

1. Perte de biodiversité et extinction des espèces

Selon le rapport de l'ONU 2024 sur la biodiversité -sur lesquels 150 experts travaillent depuis 3 ans- 500 000 à 1 million d'espèces animales et végétales pourraient être menacées d'extinction, dont beaucoup dans les prochaines décennies.

Les chiffres sont alarmants : environ 75 % de l'environnement terrestre et 66 % des milieux marins ont été profondément altérés par les activités humaines. Un million d'espèces végétales et animales sont aujourd'hui menacées d'extinction, mettant en péril l'équilibre fragile des écosystèmes dont dépend l'humanité.

1.1.Perte de biodiversité

La dégradation des écosystèmes peut entraîner la mortalité, la réduction de la croissance, la modification de la reproduction et des modes de migration des espèces, menant à leur disparition. La perte de biodiversité ce n'est pas seulement la disparition des éléphants ou des rhinocéros. C'est bien plus que ça, selon les estimations de la Convention sur la Diversité Biologique, entre 150 et 200 espèces sauvages disparaissent tous les jours. Sachant qu'il y pourrait y avoir jusqu'à 100 millions d'espèces animales vivantes sur la terre (selon les estimations les plus élevées), cela veut dire que nous pourrions détruire absolument toute la biodiversité animale de la planète en moins de 1500 ans (soit moins de 0.5% du temps depuis lequel l'*Homo Sapiens* existe.

Une étude du WWF estimait il y a peu que depuis 40 ans, 60% des animaux de la planète auraient disparu (parmi les populations des 3706 espèces vertébrées surveillées par le WWF). Alors bien sûr, on pourrait arguer que la biodiversité fluctue en permanence : c'est l'un des principes de l'évolution. À certaines périodes, des espèces disparaissent, d'autres apparaissent et certaines évoluent. Mais ce qui est inquiétant aujourd'hui, c'est que le rythme de disparition

de la biodiversité est environ 1000 fois supérieur au taux normalement observé. C'est le taux de disparition le plus rapide depuis l'extinction des dinosaures il y a 65 millions d'années.

Mais alors, pourquoi est-ce si grave que des espèces disparaissent ? Tout simplement parce que le fonctionnement des écosystèmes terrestres repose largement sur la diversité des formes de vie qui les composent. En d'autres termes, chaque espèce sur la planète participe d'une manière ou d'une autre au fonctionnement de l'écosystème global. On pourrait dire qu'elles jouent toutes un rôle dans l'équilibre des écosystèmes (même si ce terme est galvaudé car en tant que tel il n'existe pas d'équilibre écosystémique). Or, si elles disparaissent, ce rôle n'est plus assuré et cela perturbe le fonctionnement global, et cela a forcément des conséquences sur l'humanité.

Il est très difficile d'évaluer avec précision les effets concrets de la perte de biodiversité. En effet, puisque la biodiversité fonctionne en termes d'écosystèmes, les effets peuvent rapidement avoir des conséquences insoupçonnées : effets de rétroaction, effets en chaîne, effets papillon … Ainsi, la disparition d'une espèce de prédateur peut entraîner la multiplication d'une espèce de ses proies, qui elle-même va interagir avec l'écosystème et avoir de nouvelles conséquences (par exemple la surconsommation des ressources végétales). Au final, la disparition ou l'ajout d'une seule espèce dans un écosystème peut entraîner des effets gravissimes et y compris modifier la géographie de l'écosystème.

1.2. L'extinction des espèces

De très nombreuses espèces animales sont désormais obligées de vivre dans des habitats naturels de plus en plus réduits et fragmentés. Elles se retrouvent isolées, courant le risque de manquer de nourriture et de ne plus pouvoir trouver de partenaires pour se reproduire. La fragmentation des habitats naturels diminue aussi la capacité des animaux à se cacher et à fuir. Ils deviennent alors des proies plus faciles pour les braconniers.

Le changement climatique a des répercussions majeures sur l'extinction d'espèces, qui devrait s'intensifier (Pimm et al., 2014), d'autant que ces espèces subiront les effets du réchauffement bien après l'atteinte du pic (Meyer et al., 2022). Arneth et al., (2020), établissent qu'une fraction importante des espèces marines, aquatiques et terrestres pourrait être en danger d'extinction au 21e siècle en raison des modifications du climat. Ces risques d'extinction sont basés sur la diminution prévue de l'aire de répartition ou de la taille des populations, avec de grandes variabilités selon les régions, les groupes taxonomiques, la prise en compte de l'inertie temporelle appelée "dette d'extinction", et la réduction de la vulnérabilité de certaines espèces en raison de leurs capacités d'adaptation dues à la diversité intraspécifique ou leur évolution rapide.

De même, les différences de potentiel adaptatif chez les différentes espèces feront que certaines souffriront du changement climatique et d'autres en profiteront, car mieux adaptées, et bénéficieront des niches écologiques libérées par les espèces qui disparaitront de leurs aires de répartition (Jackson et al., 2022). Les espèces endémiques sont ainsi plus à risque (Manes et al., 2021), alors que le potentiel des espèces invasives pourra être renforcé par le changement climatique (Gervais et al., 2020 ; Adhikari et al., 2022),

Par exemple, les changements de la période de floraison des plantes et de la période d'activité des insectes pollinisateurs peuvent entraîner des déséquilibres entre les niveaux trophiques pouvant mener à des extinctions (Toby Kiers et al., 2010).

Depuis deux-cents ans, les extinctions d'espèces sont 10 à 1000 fois plus rapides que le rythme naturel (un effondrement de la biodiversité). A ce rythme-là, la planète va perdre 75 % de ses espèces en 500 ans. Cependant, les extinctions massives précédentes ont éliminé entre 60 % et 95 % de toutes les espèces.

L'influence humaine sur les extinctions concerne particulièrement les espèces insulaires, notamment les oiseaux. Les premiers contacts avec des humains ont ainsi provoqué la disparition de 70 à 90 espèces endémiques d'oiseaux dans les îles Hawaii, sur une faune de 125 à 145 espèces. Certaines îles ont même perdu l'ensemble de leurs oiseaux terrestres et les colonies d'oiseaux marins ont été fortement réduites ou anéanties en de nombreuses îles. Il faut des millions d'années pour que les écosystèmes se rétablissent après un tel événement.

Selon de Rapport de l'IPBES (2019).

- 68 % des populations de vertébrés (mammifères, poissons, oiseaux, reptiles et amphibiens) ont disparu entre 1970 et 2016, soit en moins de 50 ans.
- 40 % des insectes sont en déclin au niveau mondial. Depuis 30 ans, la masse des insectes diminue sur Terre de 2.5 % chaque année, alors qu'au moins 75 % des cultures alimentaires en Europe dépendent des insectes pollinisateurs.
- 41 % des amphibiens et 27 % des crustacés risquent de disparaître à brève échéance de la surface de la Terre ou du fond des océans.
- 75 % des milieux terrestres sont altérés de façon significative et plus de 85 % des zones humides ont été détruites.
- 66 % des milieux marins sont détériorés.
- 30 % de la superficie des herbiers marins qui offrent nourriture et nurserie à la faune marine ont été détruits au cours du 20ème siècle.
- 33 % des récifs coralliens et plus d'1/3 des mammifères marins sont menacés.
- 15 milliards d'arbres sont abattus chaque année dans le monde.
- 46 % de la couverture forestière a disparu depuis la préhistoire.

2. Impact sur les services écosystémiques

La qualité et la disponibilité des services écosystémiques dépendent souvent de l'état de la biodiversité. Ainsi, la perte d'espèces peut avoir des conséquences directes sur les écosystèmes et donc sur les services fournis par ces derniers. Si l'utilité d'espèces individuelles est souvent difficile à démontrer, celles-ci n'en sont pas moins indispensables à l'équilibre et à la résilience des écosystèmes. L'homme dépendant de la diversité de la nature, la conservation de cette dernière est capitale.

La biodiversité et les écosystèmes produisent un vaste assortiment d'avantages que les gens apprécient et dont ils dépendent, souvent appelés « services écosystémiques » (MEA, 2005) ou « contributions de la nature aux sociétés » (IPBES, 2018). Parmi les exemples de services écosystémiques, citons la régulation du climat, la régulation de la qualité de l'eau douce et de l'eau côtière, la séquestration du carbone et la régulation des risques et des phénomènes extrêmes (IPBES, 2018). Bien que les services écosystémiques et la biodiversité soient liés, il s'agit là de concepts distincts.

Par exemple, la gestion des services écosystémiques peut parfois avoir des effets positifs sur la biodiversité (***Exemple*** : La promotion de services de régulation, comme le contrôle de l'érosion, peut avoir une influence positive sur la biodiversité en sauvegardant l'habitat), alors que d'autres mesures de gestion peuvent avoir des répercussions négatives sur la biodiversité (la sélection d'espèces d'arbres basée uniquement sur l'optimisation de la séquestration du carbone, qui peut entraîner des changements au sein d'un écosystème ayant un effet négatif sur la biodiversité).

Les services écosystémiques sont générés par l'organisation et la structure d'un écosystème, ainsi que par les processus et fonctions écologiques (Figure 12). Les processus écologiques désignent tout changement ou réaction (physique, chimique ou biologique) qui se

produit dans un écosystème, comme la décomposition et le cycle des nutriments (MEA, 2005). Les fonctions des écosystèmes, qui constituent un sous-ensemble des interactions entre les structures biophysiques, la biodiversité et les processus écosystémiques, représentent le potentiel ou la capacité d'un écosystème à fournir des services (TEEB, 2010).

Exemple : Les terres humides (une structure écosystémique) offrent une forme de régulation (une fonction écosystémique) qui contribue à limiter les impacts négatifs des inondations ou des phénomènes climatiques extrêmes sur les collectivités environnantes (un service écosystémique) (de Groot et al., 2010a).

2.1. L'indice de biodiversité et de services écosystémiques

Le déclin de la biodiversité et des services écosystémiques engendre des coûts élevés. En 2024, le Forum économique mondial (WEF) a déclaré qu'il considère le déclin de la biodiversité comme le troisième risque mondial le plus grave pour le monde les dix prochaines années.

L'indice de biodiversité et de services écosystémiques du Swiss Re Institute : Conscient de l'importance de la contribution de la nature à la qualité de vie et à l'économie, le Swiss Re Institute a récemment lancé un indice de biodiversité et de services écosystémiques (Indice BSE1), qui regroupe des données provenant de dix catégories, dont l'intégrité des habitats, la qualité de l'air local, la régulation du climat local, le contrôle de l'érosion et la protection des côtes, et ce, à une résolution de 1 km² (Figure 12).

Cette approche permet une analyse localisée de dix catégories de biodiversité et de services écosystémiques, ainsi que des évaluations à l'échelle nationale et régionale. L'indice permet également de mettre en évidence les liens entre les BSE et les secteurs économiques (Gray, 2020).

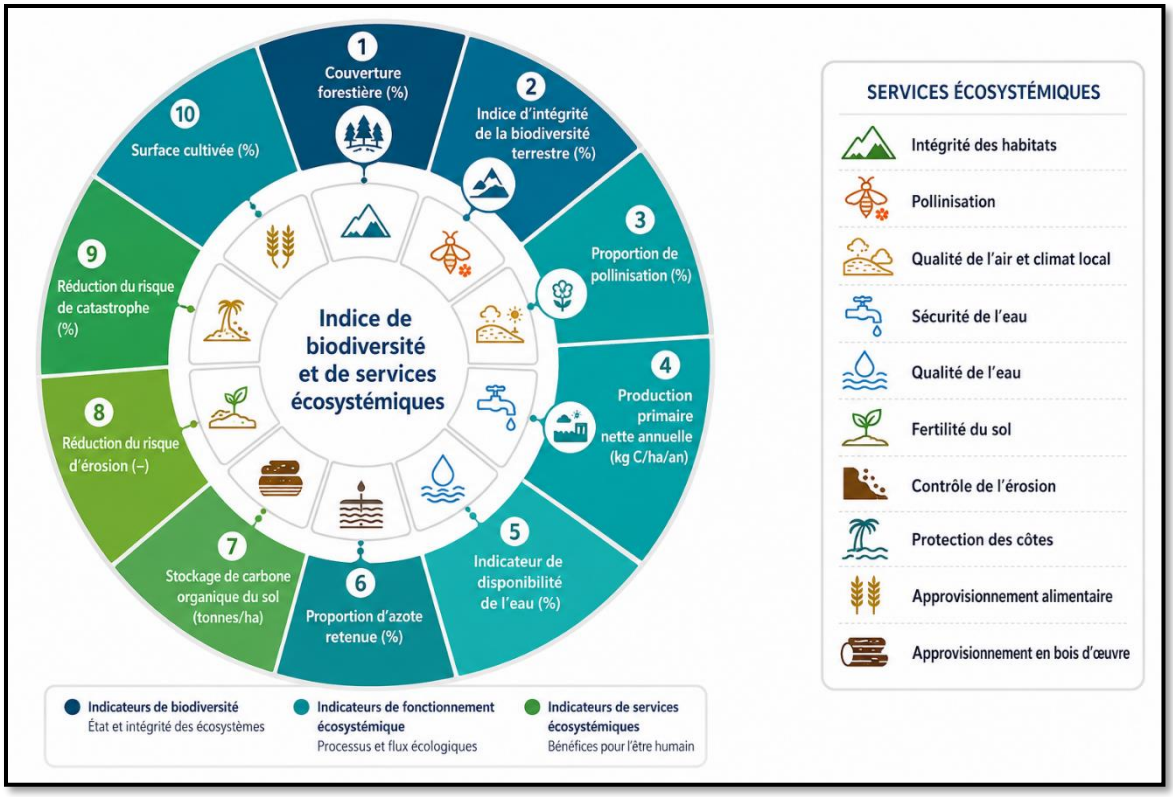


Figure 12. Les dix catégories prises en compte dans le nouvel indice de biodiversité et de services écosystémiques mis au point par le Swiss Re Institute, qui permet d'évaluer l'état de la biodiversité et des services écosystémiques à l'échelle nationale ou régionale (modifier d'après Gray, 2020).

Le Swiss Re Institute considère que les sites présentant des indices BSE élevés (c.-à-d. se situant dans le 15e percentile supérieur à l'échelle mondiale) sont des écosystèmes intacts, dotés d'une grande capacité à fournir des services écosystémiques (Figure12). En revanche, les sites présentant des indices BSE faibles (c.-à-d. dans le 15e percentile inférieur à l'échelle mondiale) sont considérés comme des écosystèmes fragiles, dont la capacité à fournir des services écosystémiques a été relativement compromise par la perte de biodiversité et la dégradation des écosystèmes (Retsa et al., 2020).

L'indice BSE peut aider à orienter la prise de décision sur l'utilisation des actifs naturels pour rendre les entreprises et les investissements plus résilients aux impacts des changements climatiques en évaluant l'état de la biodiversité et des services écosystémiques, ainsi que la

dépendance de l'activité économique à l'égard de ces services (Retsa et al., 2020). L'indice BSE peut également être utile pour orienter la prise de décision des gouvernements sur les efforts de restauration et de préservation des écosystèmes, sauvegardant ainsi les services qu'ils fournissent.

2.2. Facteurs de changements directs et indirects dans les services écosystémiques

Les écosystèmes et les services qu'ils rendent aux sociétés humaines sont soumis à l'influence de nombreux facteurs directs et indirects. Parmi les principaux facteurs directs responsables de leur dégradation figurent la conversion des habitats naturels, la fragmentation des milieux et la surexploitation des ressources biologiques. Selon l'IPBES (2018), les changements climatiques amplifient les effets de ces pressions et sont appelés à devenir l'un des principaux moteurs de l'érosion de la biodiversité et de la dégradation des services écosystémiques.

En modifiant les conditions environnementales, ils compromettent la viabilité, le fonctionnement et la résilience de nombreux écosystèmes naturels, ainsi que celle des communautés humaines qui dépendent de leurs ressources et de leurs services (Malhi et al., 2020). Toutefois, malgré les progrès de la recherche, les mécanismes complexes par lesquels les changements climatiques affectent les écosystèmes et les services qu'ils fournissent demeurent encore imparfaitement compris (GIEC, 2019a).

Les changements climatiques exercent des effets multiples sur la biodiversité et les services écosystémiques qu'elle soutient. En raison du rôle fondamental de la biodiversité dans le maintien du fonctionnement, de la stabilité et de la résilience des écosystèmes, l'évaluation des impacts climatiques doit être intégrée dans une approche globale des systèmes de soutien à la vie. Cette perspective permet de mieux comprendre les réponses des écosystèmes aux perturbations climatiques, d'élaborer des stratégies d'adaptation efficaces et de mettre en œuvre

des mesures d'atténuation visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en préservant les fonctions écologiques essentielles (Groupe de travail sur l'adaptation et la biodiversité, 2018).

Outre les changements climatiques, les écosystèmes sont soumis à de nombreuses pressions d'origine anthropique, notamment le changement d'utilisation des terres, la surexploitation des ressources naturelles, la pollution et les perturbations des régimes hydrologiques. À l'échelle mondiale, les infrastructures, les zones agricoles, les établissements humains et les réseaux de transport occupent désormais une part considérable des surfaces terrestres, entraînant une transformation profonde des habitats naturels. Les écosystèmes marins sont également fortement affectés par les activités humaines, en particulier par l'eutrophisation des eaux et la surexploitation des ressources halieutiques (Halpern et al., 2008). Ces pressions cumulées ont considérablement réduit les zones marines relativement préservées, si bien qu'à peine 13 % de la surface océanique mondiale peut encore être considérée comme peu affectée par les activités humaines (Jones et al., 2018).

Les facteurs indirects de changements dans les écosystèmes comprennent les tendances démographiques, les modèles de croissance économique, les faiblesses des systèmes de gouvernance et les inégalités (IPBES, 2018). Le fait de ne pas prendre en compte la valeur économique totale des services écosystémiques dans la prise de décision a été reconnu comme étant un facteur clé contribuant à leur perte et à leur dégradation (OCDE, 2019).

2.3. Lien entre biodiversité, fonctionnement des écosystèmes et fourniture de services

La qualité et la disponibilité des services écosystémiques dépendent souvent de l'état de la biodiversité. Ainsi, la perte d'espèces peut avoir des conséquences directes sur les écosystèmes -et donc sur les services fournis par ces derniers. Si l'utilité d'espèces individuelles est souvent difficile à démontrer, celles-ci n'en sont pas moins indispensables à l'équilibre et à la résilience des écosystèmes. L'homme dépendant de la diversité de la nature, la conservation

de cette dernière est capitale. En effet, rares sont les services assurés par une seule espèce car les fonctions écologiques qui les sous-tendent reposent le plus souvent sur la diversité du vivant.

De très nombreux travaux ont montré que la biodiversité à quelque niveau que ce soit (génétique, taxonomique ou fonctionnelle) est souvent nécessaire à l'efficacité et la stabilité du fonctionnement des écosystèmes. Ces travaux concernent une large gamme de groupes (plantes, microorganismes, animaux…) et de fonctions écologiques à l'origine de services (productivité primaire, pollinisation, résistance aux maladies, dispersion des graines, contrôle biologique, recyclage de matière organique, bioturbation …). En conséquence, si un petit nombre d'espèces peut suffire pour un service dans un contexte particulier, toute la biodiversité, ou presque, est nécessaire pour que l'ensemble des services soient disponibles dans des contextes variés (IPBES, 2019).

Par ailleurs, il résulte de cette relation forte entre diversité du vivant, fonctionnement des écosystèmes et fourniture de services que l'érosion actuelle de la biodiversité engendre une diminution de la fourniture de la plupart des services, à l'exception notable des services d'approvisionnement (Figure 13).

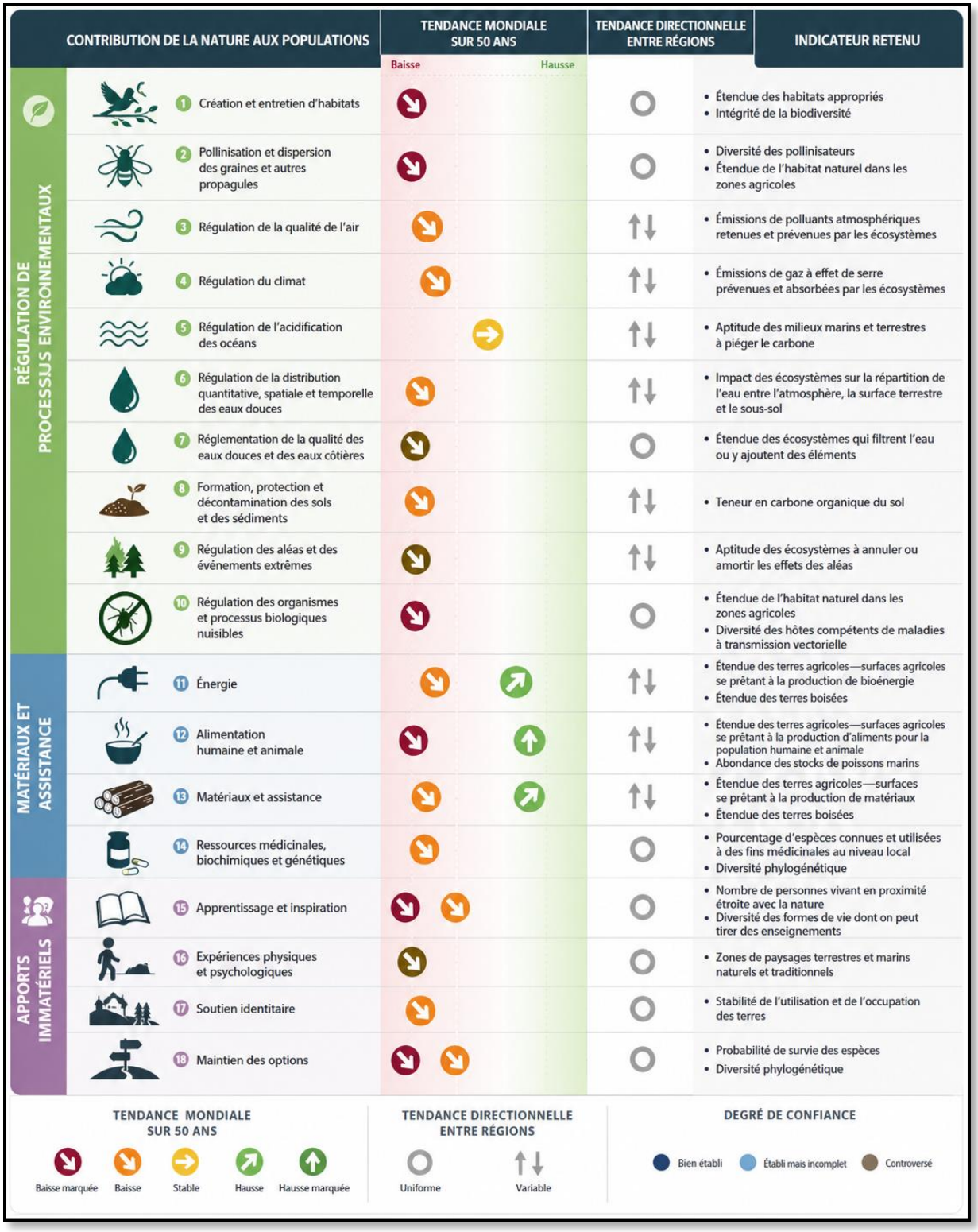


Figure 13. Tendances mondiales de la capacité de la nature à maintenir ses contributions à une bonne qualité de vie, de 1970 à aujourd'hui, illustrant un déclin pour 14 des 18 catégories analysées (IPBES, 2019).

La capacité des écosystèmes à générer les services de régulation, culturels et de soutien, et à produire des ressources médicinales a fortement diminué depuis 1970. Seuls les services d'approvisionnement en alimentation, en énergie et en matériaux ont augmenté. Ils entraînent la conversion des espaces naturels et leur exploitation. Or, lorsque la superficie d'espaces naturels est réduite, les services de soutien (régénération des écosystèmes) et de régulation (fertilité des sols, pollinisation, lutte antiparasitaire) diminuent, ce qui compromet la pérennité des services d'approvisionnement.

La plupart des services écosystémiques sont irremplaçables, et les solutions humaines de substitution n'apportent pas les mêmes bénéfices. Sans changements majeurs des modes de vie, de consommation et de régulation, les projections d'ici 2050 montrent que le déclin de la biodiversité et des services écosystémiques se poursuivront.

3. Effets sur la santé humaine et la sécurité alimentaire

La dégradation des écosystèmes affecte la santé humaine en limitant l'accès à l'eau et à l'air purs, en favorisant la propagation des maladies (infectieuses et non transmissibles) et en nuisant à la sécurité alimentaire par une moindre production de ressources et une diminution de leur qualité. Ces impacts sont plus marqués chez les populations vulnérables (pauvres, jeunes, âgés) et peuvent entraîner des décès prématurés, des retards de croissance et des maladies chroniques.

3.1. Effets sur la santé humaine

3.1.1. Qualité de l'environnement

La pollution de l'air, des sols et de l'eau, causée par la dégradation des écosystèmes avec plus de 6 800 sites ou sols pollués, (zones humides, bords de rivières, littoral, bords de routes, etc…) de dimensions variées, sont répertoriés comme pouvant présenter un risque pour la santé humaine ou l'environnement, toute en augmentant les risques d'intoxications, de troubles

neurologiques, cancers, pathologies respiratoires, allergies, asthmes et maladies cardiovasculaires. En effet, 25 % des décès dans les régions en développement sont attribuées à des causes environnementales, surtout liées à l'insalubrité de l'eau, la pollution de l'air intérieur et le paludisme. Ce taux de décès attribués à l'environnement atteint 17 % dans les régions développées (AEE, 2022).

3.1.2. La menace de malnutrition

L'effondrement de la biodiversité menace la production des ressources alimentaires au niveau mondial. Une mauvaise alimentation altère la santé, causant des maladies et des décès prématurés. Dans le monde, plus de 815 millions de personnes souffrent de faim et de malnutrition.

3.1.3. Propagation de maladies

La perte d'habitats et le rapprochement des humains et des animaux augmentent le risque de zoonoses (maladies transmises par les animaux), comme la COVID-19. De plus, la dégradation des infrastructures sanitaires et l'augmentation des risques d'inondations liés au changement climatique entravent la lutte contre les maladies infectieuses. En effet, entre 540 000 et 850 000 virus présents dans la nature pourraient infecter les êtres humains. Mais le fait qu'un agent infectieux passe d'une espèce à une autre et devienne transmissible aux humains ou plus de 70 % des maladies infectieuses émergentes chez l'humain sont d'origine animale. Ces zoonoses ne sont pas de simples fatalités : elles sont directement liées à nos modes de vie et à nos interactions croissantes avec la faune sauvage.

3.1.4. Maladies non transmissibles

Les changements climatiques exacerbent les maladies non transmissibles comme l'obésité et le diabète, ainsi que les problèmes de santé mentale, souligne l'OMS.

- A mesure que la population urbaine va augmenter, il deviendra plus difficile de conserver et d'étendre un système efficace de distribution des produits alimentaires. Il pourra

s'ensuivre une aggravation de l'insécurité alimentaire des ménages, de la malnutrition qui lui est liée et des risques d'atteinte à la santé chez des populations urbaines démunies, en nombre croissant ;

- Les maladies microbiennes, virales et parasitaires engendrées par la contamination de la nourriture et de l'eau continueront de poser de graves problèmes sanitaires. L'apparition de nouveaux agents importants pour l'hygiène publique va se poursuivre. Les maladies diarrhéiques liées aux aliments et à l'eau, qui provoquent une mortalité infantile et une morbidité générale élevées, prendront de l'ampleur ;
- Les maladies transmises par vecteur, résultant de l'irrigation, d'autres aménagements et d'eaux usées non traitées, vont se multiplier. Le paludisme, la schistosomiase, la filariose et les maladies dues aux arbovirus demeureront de graves fléaux ;
- Les problèmes susmentionnés se traduiront par un maintien ou une accentuation de la malnutrition et de la mortalité des nouveau-nés et des jeunes enfants, ainsi que de la morbidité à tous les âges, mais surtout chez les pauvres, les jeunes, les personnes âgées et les malades ;
- Les maladies chroniques liées à de mauvaises habitudes de vie, au tabagisme et à l'alimentation (comme l'obésité, le diabète ou la coronaropathie), caractéristiques des pays riches, commencent aussi à se manifester, d'une façon sensible, dans les pays en développement et l'urbanisation croissante ne fera qu'accélérer cette tendance ;
- A mesure que la production alimentaire va s'intensifier, les risques de maladies et d'accidents professionnels chez les travailleurs de ce secteur et des secteurs connexes croîtront nettement si l'on ne prend pas de mesures de sécurité et de prévention suffisantes.

3.2. Répercussions sanitaires de l'exposition aux contaminants d'origine alimentaire

Malgré les progrès scientifiques et technologiques réalisés dans les domaines de l'agriculture, de la transformation alimentaire et du contrôle sanitaire, la contamination des aliments et de l'eau demeure un important problème de santé publique à l'échelle mondiale. Les maladies d'origine alimentaire figurent parmi les affections les plus répandues dans le monde et constituent une cause majeure de morbidité, de mortalité et de réduction de la productivité économique. Elles sont provoquées par une grande diversité d'agents biologiques et chimiques et peuvent se manifester sous des formes très variables, allant de troubles digestifs bénins à des pathologies graves, voire mortelles.

Cependant, une grande partie des cas échappe aux systèmes de surveillance sanitaire. On estime que dans les pays industrialisés, seulement environ 10 % des cas sont déclarés, tandis que dans les pays en développement, cette proportion pourrait être inférieure à 1 %, ce qui conduit à une sous-estimation importante de l'ampleur réelle du problème.

Les aliments peuvent être contaminés tout au long de la chaîne alimentaire, depuis la production primaire jusqu'à la consommation. Les contaminants peuvent être de nature biologique, tels que les bactéries, virus, parasites et champignons, ou de nature chimique, comme les pesticides, les métaux lourds, les résidus de médicaments vétérinaires, les polluants organiques persistants et les mycotoxines. Leur présence dans les aliments constitue une menace sérieuse pour la santé humaine.

Les contaminants biologiques représentent l'une des principales causes des maladies d'origine alimentaire. Des agents pathogènes tels que *Salmonella spp.*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* ou *Campylobacter* peuvent provoquer des gastro-entérites, des infections systémiques et diverses complications parfois sévères. Les enfants, les personnes âgées, les femmes enceintes et les individus immunodéprimés sont particulièrement vulnérables

à ces infections. Selon l'Organisation mondiale de la Santé, près de 600 millions de personnes contractent chaque année une maladie d'origine alimentaire et environ 420 000 en meurent.

Les contaminants chimiques constituent également une préoccupation croissante. Une exposition chronique aux pesticides, aux métaux lourds tels que le plomb, le mercure, le cadmium et l'arsenic, ainsi qu'à d'autres substances toxiques, peut entraîner des effets néfastes sur la santé, notamment des troubles neurologiques, endocriniens, cardiovasculaires, rénaux et hépatiques. Certains de ces contaminants sont également reconnus pour leur potentiel cancérogène. Les enfants sont particulièrement exposés aux effets de ces substances en raison de leur développement physiologique encore incomplet.

Le changement climatique risque d'aggraver davantage ces problèmes sanitaires. L'augmentation des températures, les modifications des régimes de précipitations et la fréquence accrue des événements météorologiques extrêmes favorisent la prolifération des agents pathogènes et des moisissures productrices de mycotoxines. Les inondations peuvent contaminer les cultures et les ressources en eau par des microorganismes pathogènes ou des substances chimiques, tandis que les sécheresses peuvent concentrer certains contaminants dans les sols et les denrées alimentaires. Par ailleurs, l'augmentation des ravageurs agricoles peut conduire à un recours accru aux pesticides, augmentant ainsi le risque de résidus chimiques dans les aliments.

Face à ces enjeux, le renforcement des systèmes de surveillance sanitaire, l'application rigoureuse des normes de sécurité alimentaire, l'adoption de bonnes pratiques agricoles et industrielles ainsi que la sensibilisation des consommateurs sont essentielles pour réduire l'exposition aux contaminants alimentaires et protéger la santé publique. Une approche intégrée associant sécurité alimentaire, santé publique et adaptation au changement climatique apparaît aujourd'hui indispensable pour limiter les risques liés aux contaminants d'origine alimentaire.

3.3. Effet sur la sécurité alimentaire

L'agriculture est la pierre angulaire de la sécurité alimentaire. Céréales, fruits, légumes, viandes et produits laitiers, elle assure la production des aliments nécessaires pour nourrir les populations du monde entier, quand à la sécurité alimentaire se définit comme une situation dans laquelle tous les êtres humains ont, en tout temps, un accès physique, social et économique à une alimentation suffisante, saine et nutritive qui réponde à leurs besoins et préférences alimentaires pour mener une vie active et saine (FAO, 2018). Elle englobe des dimensions telles que la disponibilité, l'accès, l'utilisation, la stabilité dans le temps, ainsi que l'autonomie et la durabilité des aliments (HLPE, 2020).

Le risque lié aux changements climatiques pour la sécurité alimentaire se traduit par la désorganisation des systèmes alimentaires (cultures, élevage et pêche) et par des perturbations de la distribution alimentaire, dues au réchauffement climatique , à la sécheresse, aux inondations et à la variabilité et aux extrêmes des précipitations. Ce risque est particulièrement préoccupant pour les populations déjà vulnérables à l'insécurité alimentaire en raison de faibles revenus, d'un accès limité à une alimentation nutritive, de discriminations sociales ou d'autres facteurs (O'Neill et al., 2022).

La consommation alimentaire d'environ 1 milliard de personnes dépend d'aliments prélevés en milieu naturel : gibiers, insectes et produits végétaux comestibles, champignons et poissons (Burlingame, 2000). Selon certaines études, dans les pays en développement, les ménages dépendant le plus de ces ressources alimentaires forestières sont dans les tranches de population aux revenus les plus faibles. Ces ressources forestières sont aussi essentielles pour s'alimenter durant la période de soudure (période de l'année précédant les premières récoltes, durant laquelle les produits des dernières récoltes viennent à manquer).

La dégradation des écosystèmes réduit la sécurité alimentaire en diminuant la fertilité des sols, en affaiblissant la biodiversité et en perturbant les services écosystémiques essentiels

à l'agriculture et à la pêche. Cela entraîne une baisse des rendements agricoles, des pénuries alimentaires, une hausse des prix, et expose les populations vulnérables à la faim et à la malnutrition.

3.3.1. Réduction de la productivité agricole

L'agriculture mondiale est confrontée à des pressions croissantes dues aux changements climatiques, à la dégradation des ressources et aux inégalités socio-économiques, ce qui rend nécessaire la mise en œuvre de pratiques agricoles durables favorisant la résilience et la viabilité à long terme (Mirzabaev et al., 2023), citons ainsi :

La dégradation des sols : L'érosion des sols retire la couche arable la plus fertile, réduisant la disponibilité des nutriments pour les plantes et diminuant les rendements des cultures, potentiellement jusqu'à 50%.

L'impact des pratiques agricoles : L'utilisation intensive d'engrais et de pesticides peut appauvrir les sols et les rendre moins fertiles, conduisant à une moindre qualité nutritionnelle des cultures.

La diminution de la biodiversité : La perte de diversité génétique des plantes et du bétail rend les cultures plus vulnérables aux maladies et aux changements climatiques.

Les effets du réchauffement climatique sur les rendements des cultures **:** Les sécheresses, les inondations, les tempêtes et les vagues de chaleur sont de plus en plus fréquents dans de nombreux pays. Ces phénomènes perturbent l'agriculture et réduisent les rendements des cultures. Les cultures ont besoin d'une température optimale pour pousser. Une hausse des températures peut donc réduire leur rendement. Le maïs, le blé et le riz y sont particulièrement sensibles, ce qui peut avoir des conséquences désastreuses sur la production alimentaire mondiale. Selon le GIEC, le réchauffement climatique pourrait réduire la production mondiale de cultures de base telles que le maïs, le riz et le blé de jusqu'à 2% chaque décennie d'ici 2100.

Les maladies et les ravageurs **:** Les cultures peuvent être plus vulnérables aux maladies et aux ravageurs en raison du stress causé par les conditions météorologiques extrêmes. D'autre part, les insectes et les champignons se propagent plus facilement dans des conditions plus chaudes et plus humides. Ces situations favorisent l'augmentation de l'utilisation de pesticides et d'autres produits chimiques nocifs pour l'environnement et la sécurité sanitaire des denrées alimentaires (Bebber et al., 2013 ; Deutsch et al., 2018 ; IPCC, 2022).

La pression sur l'élevage : Les ressources alimentaires et l'eau pour le bétail sont perturbés par le réchauffement climatique. Cela entraîne une diminution de la productivité, une augmentation des maladies chez les animaux et une vulnérabilité accrue des éleveurs (Thornton et al., 2009 ; IPCC, 2022).

La chute des rendements et hausse des prix **:** La diminution des rendements agricoles réduit la disponibilité des denrées alimentaires et peut entraîner une hausse des prix, affectant particulièrement les populations les plus vulnérables. Selon la FAO et ses partenaires, l'insécurité alimentaire mondiale demeure élevée et les événements climatiques extrêmes constituent l'un des principaux facteurs de cette situation (FAO, 2024). Les évaluations du GIEC montrent également que le changement climatique compromet déjà la productivité de nombreuses cultures, avec des répercussions sur les marchés alimentaires mondiaux (IPCC, 2022).

La baisse de la qualité des aliments : Le changement climatique et ses phénomènes météorologiques extrêmes peuvent affecter la qualité des denrées alimentaires. En effet, les inondations peuvent entraîner une contamination des cultures, tandis que les sécheresses peuvent réduire la teneur en nutriments des aliments (IPCC, 2022). Ces changements dans la qualité des aliments peuvent avoir des conséquences sur la santé humaine, en particulier chez les enfants et les personnes âgées. Selon l'OMS, environ 600 millions d'individus – soit près d'une personne sur dix dans le monde – tombent malades chaque année après avoir ingéré des

aliments contaminés. Plus de 420 000 personnes meurent chaque année à cause des maladies d'origine alimentaire.

3.3.2. Perturbation des services écosystémiques

Pollinisation : La perte de pollinisateurs, comme les abeilles, affecte directement la production de nombreuses cultures.

Régulation de l'eau : La déforestation et la dégradation des sols réduisent la capacité de la terre à absorber, stocker et filtrer l'eau, ce qui affecte l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable.

Régulation climatique : Les écosystèmes dégradés sont moins efficaces pour réguler les phénomènes météorologiques extrêmes, comme les sécheresses et les inondations, qui détruisent les récoltes.

Chapitre 5. Stratégies de restauration et de protection des écosystèmes

1. Méthodes de restauration écologique

Le bon fonctionnement des écosystèmes est essentiel à la vie des populations humaines et aux activités économiques. Les traités, accords et autres conventions alertent et appellent le monde à l'action depuis plusieurs décennies. Du Sommet de la Terre de Rio en 1992 aux COP, la quasi-totalité des Etats considèrent la conservation de la biodiversité comme étant une préoccupation commune à l'humanité. Il y a certes des avancées, mais encore insuffisantes au regard des risques d'effondrement irréversible qui menacent les écosystèmes (Chazdon, 2008).

Les efforts de conservation se sont traditionnellement concentrés sur la protection des zones où le couvert terrestre n'a pas été fortement modifié par l'homme, et ces efforts doivent demeurer une priorité. Compte tenu de l'ampleur des changements d'utilisation et de couverture des sols induits par l'homme à l'échelle mondiale, les efforts de conservation privilégient de plus en plus la régénération naturelle et la restauration active des écosystèmes dégradés afin de rétablir à la fois les services écosystémiques et la biodiversité (Aronson et al., 2007 ; Rey Benayas et al., 2008).

La restauration des écosystèmes peut potentiellement produire de multiples avantages sociaux et environnementaux. La restauration est une approche qui peut renforcer les capacités de gestion avisée de l'environnement au sein des communautés (Kittinger et al., 2016), améliorer la santé mentale et physique, et le bien-être des populations (Aronson et al., 2020 ; Breed et al., 2020), aider à atténuer les effets du changement climatique et à s'y adapter, améliorer la qualité de l'eau (Acreman et al., 2021), réduire l'érosion des sols (Teng et coll., 2019), restaurer la fertilité des sols et empêcher l'extinction des espèces (Newmark et al., 2017).

Dans de nombreux cas, les avantages peuvent être durables et rentables (Reij et Garrity, 2016), ce qui élargit l'éventail d'options relatives aux écosystèmes pour les futures générations.

1.1. Concepts clés de la restauration de la nature

La restauration écologique ou 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. Un continuum d'interventions peut être mené selon le niveau de dégradation et ses causes :

- ✓ Les pressions ayant mené aux dégradations sont levées ou atténuées à un niveau permettant la récupération naturelle de l'écosystème, et
- ✓ 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.

Autrement dit, la restauration de la nature ou la restauration écologique est un processus volontaire qui vise le rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit (Gann et al., 2019). La restauration des écosystèmes consiste donc à favoriser la régénération des écosystèmes qui ont été dégradés ou détruits, ainsi que la conservation des écosystèmes encore intacts. Des écosystèmes plus sains, avec une diversité biologique plus riche, offrent de plus grands avantages, tels que des sols plus fertiles, de meilleurs rendements de bois et de poissons et de plus grandes réserves de gaz à effet de serre.

Concrètement, des mesures de restauration de la nature peuvent être prises au niveau national, comme l'interdiction d'épandre des pesticides dans les sites Natura 2000 ou les lieux de captage de notre eau potable par exemple. Elles peuvent être également prises à l'échelle d'un site local :

- ✓ L'enlèvement de barrages qui fracturent une rivière et empêchent les migrations de poissons ;

- ✓ La plantation de haies pour créer des refuges de biodiversité et permettre la pollinisation des cultures ;
- ✓ La création de petites zones humides qui filtrent l'eau.
- ✓ Les activités de restauration pourraient également alléger l'atmosphère de 13 à 26 gigatonnes de gaz à effet de serre. Les bénéfices économiques de ces interventions sont dix fois supérieurs aux coûts d'investissement nécessaires.

D'ici à 2030, la restauration de 350 millions d'hectares d'écosystèmes terrestres et aquatiques dégradés pourrait générer des services écosystémiques estimés à 9 000 milliards de dollars.

1.2. Les différentes méthodes de restauration

Selon la nature et l'état des écosystèmes, les actions de restauration à engager vont demander une intervention humaine plus ou moins importante :

1.2.1. La restauration passive

Également appelée régénération naturelle assistée, cette approche s'appuie sur la capacité de résilience des écosystèmes. Sans intervention humaine autre que celle où elle implique de réduire ou de supprimer les mécanismes à l'origine de la dégradation de l'écosystème pour permettre au milieu de se rétablir spontanément. Elle peut se faire par :

- ➢ Arrêt de l'exploitation forestière dans une zone pour laisser la forêt se régénérer d'elle-même.
- ➢ Protection d'une zone humide pour permettre sa recolonisation par des espèces végétales et animales.

La restauration passive 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 (Figure 14).

1.2.2. La restauration active

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.

Restaurer la nature repose donc sur un large éventail d'actions possibles, allant de ne rien faire pour laisser la nature se refaire une santé toute seule à des travaux lourds et longs nécessitant beaucoup d'expertise, de matériel et de main d'œuvre (Figure 14).

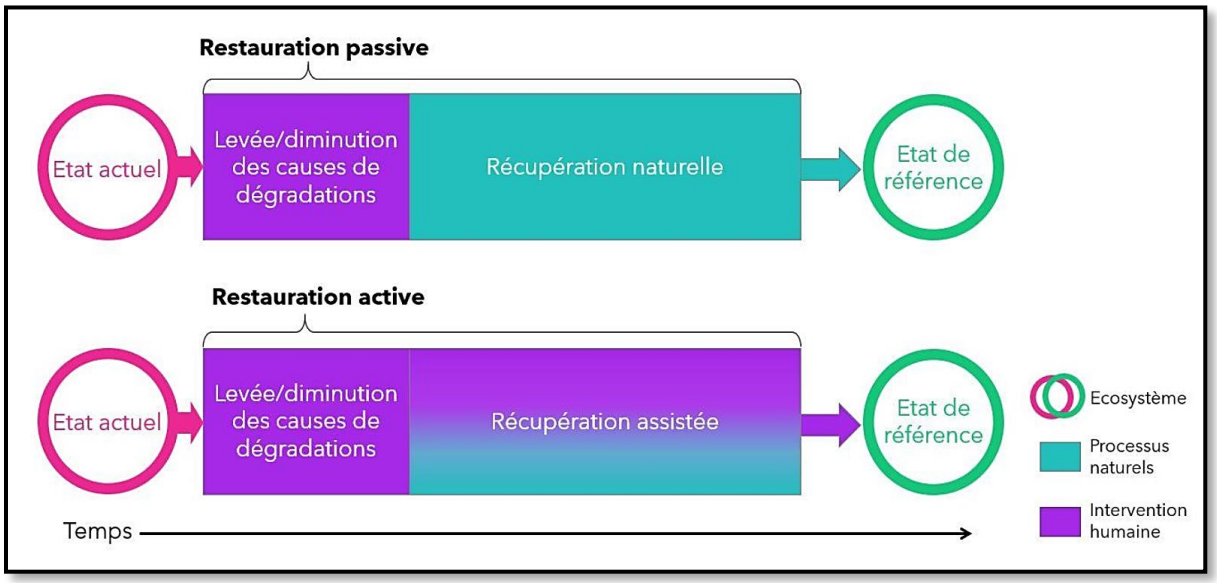


Figure 14. Comparaison des processus de restauration impliqués selon le choix d'une stratégie d'intervention de restauration passive ou active (Gann et al., 2019).

1.3. Critique de la catégorisation passive / active

Plusieurs auteurs soulignent que la distinction entre restauration passive et restauration active est souvent ambiguë et peut donner l'impression qu'il s'agit de stratégies opposées, alors

qu'elles sont en réalité complémentaires (Krishnan & Osuri, 2023). Le terme de restauration passive est particulièrement critiqué, car il peut être interprété comme une absence d'intervention, alors qu'il implique des actions concrètes visant à supprimer les causes de dégradation et à favoriser le rétablissement naturel des écosystèmes. Pour cette raison, l'expression restauration naturelle est jugée plus appropriée.

Par ailleurs, une attention excessive portée aux interventions de restauration active peut conduire à sous-estimer l'importance des mesures visant à prévenir la dégradation et à soutenir la régénération spontanée des écosystèmes. Cette tendance reflète davantage une préférence pour les actions visibles de « réparation » que la seule influence de la terminologie employée (Chazdon et al., 2021).

1.4. 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, nous favorisons la nomenclature d'Atkinson & Bonser (2020).

La restauration naturelle (ou régénération naturelle) 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) 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) 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).

1.5. Principales approches de restauration des écosystèmes

1.5.1. Restauration des terres et de végétation

La restauration des terres et de la végétation désigne l'ensemble des actions visant à rétablir les fonctions écologiques, la productivité et la biodiversité des écosystèmes dégradés. Elle cherche à améliorer la qualité des sols, à restaurer la couverture végétale et à renforcer la résilience des écosystèmes face aux perturbations naturelles et anthropiques (IPBES, 2018 ; FAO, 2024).

Les mesures de contrôle se font par :

- La réglementation de la densité d'animaux utilisant les terres et dans certains cas interdire totalement le pâturage pour donner à la végétation une chance de récupérer. Interdire aussi les feux, en particulier dans les zones marginales.
- L'interdiction de l'abattage d'arbres et d'arbustes sur les terres marginales, que ce soit pour la collecte de bois de feu ou pour d'autres raisons, et sur les aires de captage.

Les méthodes d'intervention active par :

- La fixation du sable et des dunes par semis artificiel d'espèces arborescentes, arbustives et herbacées.
- L'implantation de rideaux-abris sur des terres irriguées et cultivées en sec, ainsi que pour la protection des habitations et des infrastructures.

- L'installation de plantations sur les terres dégradées, en particulier sur les terres dégradées irriguées (salinité et saturation en eau) qui offrent de grandes possibilités pour la création d'activités fondées sur le bois dans les terres arides.
- L'installation de plantations d'arbres, arbustes et graminées de valeur pour rendre leur fertilité aux terres dégradées là où l'on pratique la culture pluviale (utilisation de l'acacia et de légumineuses pour restaurer la fertilité du sol).
- La création de coupe-feu et de haies vives vertes pour la protection des savanes boisées.
- L'ensemencement et plantation sur les aires de captage et les berges des cours d'eau permanents et saisonniers pour réguler le débit d'eau et lutter contre l'érosion.

Enfin, pour exécuter toutes ces activités sur les terres dégradées aussi bien que sur les bonnes terres, il faut mobiliser les moyens de réaliser la production optimum à partir des ressources disponibles. Ces moyens sont notamment l'utilisation d'espèces et de variétés améliorées, des soins culturaux efficients et des systèmes de gestion efficaces.

1.5.2. Restauration des écosystèmes aquatiques et côtiers

Elle regroupe les actions visant à rétablir la structure, le fonctionnement et les services écosystémiques des milieux aquatiques dégradés, tels que les rivières, les lacs, les zones humides, les estuaires, les mangroves, les herbiers marins et les récifs coralliens. Elle a pour objectif de restaurer la biodiversité, d'améliorer la qualité de l'eau et de renforcer la résilience des écosystèmes face aux pressions anthropiques et aux changements climatiques. La restauration se manifeste par :

La restauration hydromorphologique : Amélioration de la structure des cours d'eau pour leur rendre leur fonctionnement naturel, ce qui améliore la qualité de l'eau et la biodiversité.

L'élimination des espèces invasives : Suppression des espèces exotiques envahissantes.

La transplantation d'espèces : Déplacement de certaines espèces comme la posidonie vers des zones plus protégées.

1.6. Choix de la stratégie de restauration

Le choix de la stratégie de restauration doit s'appuyer sur une connaissance approfondie des mécanismes naturels de récupération ainsi que de la dynamique propre à l'écosystème concerné. Cette analyse permet d'évaluer sa résilience, c'est-à-dire sa capacité à retrouver son fonctionnement après une perturbation, et d'identifier les obstacles à son rétablissement, qu'il s'agisse des causes directes de dégradation ou des effets persistants qui limitent sa régénération Figure 15). En fonction de ce diagnostic, le niveau d'intervention peut être ajusté en déterminant s'il est nécessaire d'agir sur les composantes biotiques, abiotiques ou sur les deux à la fois (Gann et al., 2019 ; Chazdon et al., 2021).

Dans certains cas, notamment lorsque l'écosystème est confronté à des phénomènes d'hystérésis, des approches de restauration plus interventionnistes peuvent être nécessaires et venir compléter les stratégies fondées sur la restauration naturelle. Toutefois, des recherches comparatives menées sur le terrain demeurent indispensables afin d'évaluer l'efficacité relative des différents niveaux d'intervention appliqués à un même écosystème (Jones et al., 2018).

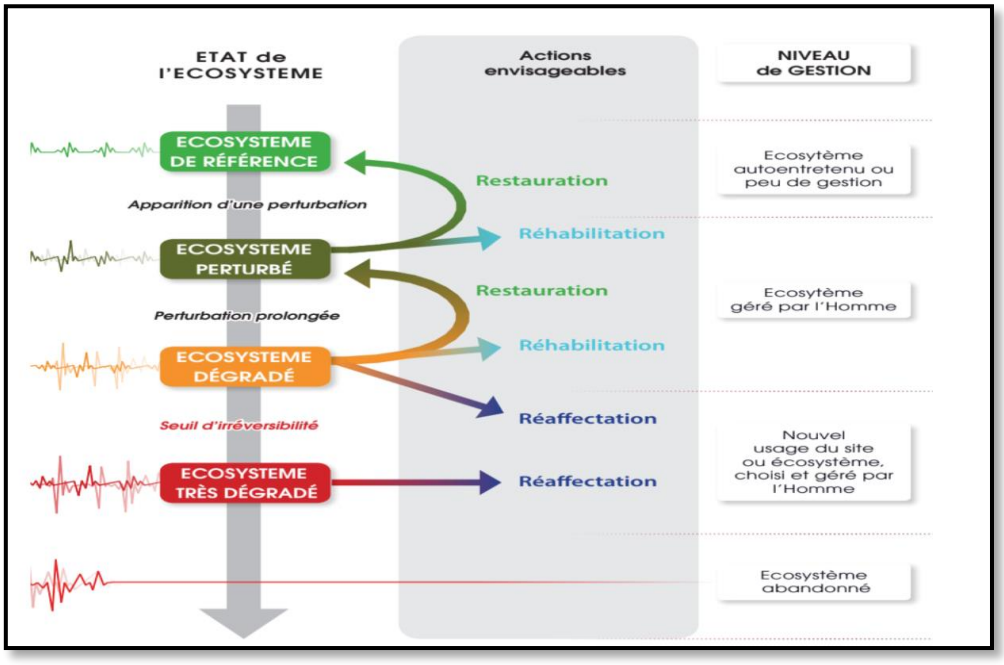


Figure 15. Classement des actions envisageables sur l'écosystème en prenant en compte son niveau de dégradation et les objectifs de l'action mise en œuvre (Lenfant et al., 2015).

1.7. 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 (Tonn et al., 1990). Selon les auteurs, les catégories de filtres distinguées varient (Hobbs et al., 2004 ; Lortie et al., 2004). Nous considérerons trois grandes catégories :

- Les filtres liés à la dispersion,
- Les filtres liés aux conditions abiotiques du site,
- Les filtres d'ordre biotique (Figure 16).

Ces filtres vont ainsi induire un assemblage local d'espèces (sur le site restauré) constituant un sous ensemble plus ou moins représentatif du pool d'espèces régional selon la perméabilité des filtres pour les espèces (Rahel, 2002). Par ailleurs, d'après cette perméabilité du filtre (ses caractéristiques de sélectivité), certains traits d'histoire de vie des espèces seront favorisés au sein de l'assemblage local (Keddy, 1992). L'identification des traits d'histoire de vie sensibles aux différents filtres liés à une restauration écologique peut améliorer la compréhension de la régulation de la distribution des espèces dans le paysage (Poff, 1997).

La Figure 16 représente le processus d'assemblage des communautés écologiques à travers une succession de filtres qui sélectionnent les espèces capables de s'établir localement. 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 local d'espèces sur un site restauré.

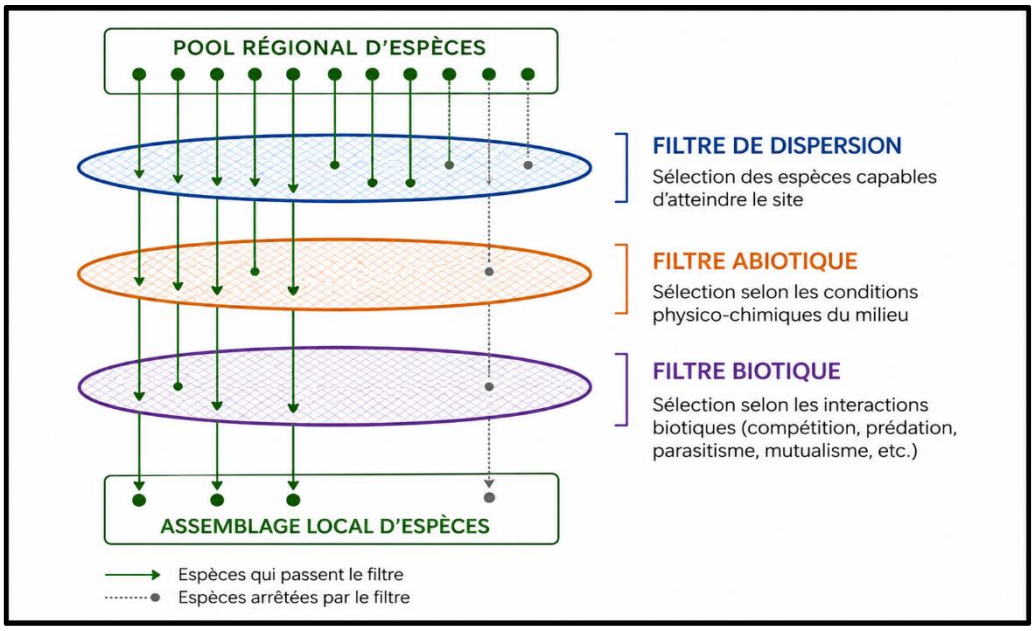


Figure 16. Du pool régional d'espèces à la communauté locale : effet des filtres écologiques.

1.7.1. Filtres de dispersion

Les végétaux et animaux se dispersent par le vent et l'eau, à l'aide d'autres espèces, ou par leurs propres mouvements. 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 (Dulière, 2001). 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.

1.7.2. Filtres abiotiques

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.

1.7.3. Filtres biotiques

Lorsqu'une espèce du pool régional parvient à franchir les filtres de dispersion (*i.e.* 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 (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 (Lockwood et al., 2004).

1.8. Comment évaluer la réussite d'une restauration ?

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).

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 :

- L'écosystème restauré contient un ensemble caractéristique d'espèces de l'écosystème de référence qui procure une structure communautaire appropriée.
- L'écosystème restauré est constitué pour la plupart d'espèces indigènes.

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

Il est donc important d'évaluer le stade de dégradation de l'écosystème et ses capacités de régénération afin de faire le bon choix dans le type de restauration à entreprendre :

Régénération naturelle (ou restauration passive) : lorsque la dégradation est faible et que les conditions biotiques et abiotiques sont réunies pour que le fonctionnement du milieu puisse s'autogénérer,

Régénération assistée (ou restauration active) : lorsque la dégradation abiotique est peu importante ou bien lorsqu'on peut en éliminer la cause (pollution par exemple),

Reconstruction : quand les dommages biotiques et abiotiques sont très importants. La combinaison des trois approches peut être utilisée dans l'espace et dans le temps.

1.9. Typologie des actions de restauration et de remise en état des écosystèmes

1.9.1. La remédiation

C'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.

1.9.2. La réhabilitation

C'est un processus visant à rétablir certaines fonctions spécifiques d'un écosystème dégradé (Gann et al. 2019), à rétablir certains processus, la productivité et certains services de l'écosystème (SER, 2004). L'objectif de la réhabilitation est donc purement fonctionnel : le milieu doit être apte à quelque chose qu'il n'est plus en capacité de faire. Réhabilitation et restauration ont en commun de viser l'amélioration d'un site ayant subi des dégradations 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).

1.9.3. La réaffectation

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. 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 (Lenfant et al., 2015) mais peut également qualifier la transformation volontaire d'un écosystème non dégradé (Exemple : la mise en culture d'un espace) (Le Floc'h & Aronson 1995).

1.9.4. Reboisement

Le reboisement consiste à planter des arbres au sein d'un peuplement déjà existant, ou sur un sol nu ou anciennement boisé pour remplacer les forêts détruites par la coupe ou les incendies. Si elle est réalisée en cohérence avec les intérêts biologiques locaux et les changements globaux, cette démarche a plusieurs avantages. Elle permet de maintenir l'équilibre de l'ensemble des services écosystémiques provenant des espaces forestiers, qu'ils soient économiques, culturels, environnementaux, ou sanitaires.

1.9.5. Re-végétalisation

Réintroduction de plantes dans des zones dégradées pour lutter contre l'érosion et recréer des habitats. Elle inclue des approches actives et passives, comme le reboisement et l'ensemencement. Les techniques spécifiques varient selon le site, mais elles visent généralement à restaurer le couvert végétal en préparant le sol, en choisissant des espèces adaptées, en plantant et en gérant l'érosion.

1.9.6. Agroforesterie

Combinaison de pratiques agricoles et forestières pour améliorer la biodiversité et la séquestration du carbone. En effet, l'augmenter de seulement 10% le nombre d'arbres sur les parcelles permettrait de séquestrer 18 milliards de tonnes de carbone par an. C'est presque l'équivalent des émissions annuelles du secteur de l'alimentation et des boissons. La présence d'arbres sur les parcelles agricoles impacte considérablement leur durabilité. Elle augmente le rendement des cultures, améliore la biodiversité et aide à lutter contre les parasites. Ce sont des avantages environnementaux importants pour les agriculteurs et les écosystèmes locaux.

Tableau 1. Principales interventions de restauration écologique.

Type d'intervention	Objectif principal	Exemples d'actions
Remédiation	Restaurer la qualité physico-chimique du milieu.	Dépollution des sols, phytoremédiation, traitement des eaux contaminées, bioremédiation.
Réhabilitation	Récupérer certaines fonctions et services écosystémiques.	Stabilisation des sols, réhabilitation de carrières ou de mines, amélioration des habitats dégradés.
Réaffectation (ou reconversion écologique)	Valoriser durablement les espaces dégradés.	Transformation d'anciennes friches industrielles en parcs urbains ou zones naturelles.
Reboisement	Restaurer la couverture forestière et les fonctions associées.	Plantation d'espèces forestières, création de ceintures vertes, restauration de bassins versants.
Revégétalisation	Stabiliser les sols et favoriser la recolonisation biologique.	Semis d'espèces herbacées, plantation d'arbustes, végétalisation de talus et de sites miniers.
Restauration écologique	Retrouver un écosystème fonctionnel proche de son état de référence.	Restauration de zones humides, réintroduction d'espèces indigènes, suppression de pressions anthropiques.
Régénération naturelle assistée	Accélérer les processus naturels de succession écologique.	Protection contre le pâturage, contrôle des espèces invasives, mise en défens.

2. Politiques de conservation et gestion durable des ressources

2.1. Politiques de conservation des écosystèmes

Les politiques internationales de conservation des écosystèmes sont des cadres juridiques et stratégiques, comme la Convention sur la diversité biologique, qui visent à protéger, restaurer et utiliser durablement les écosystèmes et la biodiversité. Cependant, les systèmes de gouvernance de nombreux pays fonctionnent comme des facteurs indirects de transformation des écosystèmes et de la biodiversité.

À l'heure actuelle, la plupart des politiques relatives à la biodiversité sont ciblées et manquent de cohésion. En outre, telles qu'elles sont conçues aujourd'hui, la gouvernance, les institutions et les politiques prennent rarement en considération les diverses valeurs de la biodiversité, et des difficultés majeures empêchent d'élaborer et de mettre en œuvre des initiatives transfrontières et régionales efficaces pour mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité, à la dégradation des écosystèmes, au changement climatique et au développement non durable.

L'élaboration de politiques efficaces dépend aussi de la mobilisation de ressources financières adéquates. Accroître les fonds versés par des sources tant publiques que privées et mettre en place des mécanismes de financement innovants, tels que les transferts fiscaux écologiques, aideraient à renforcer les capacités institutionnelles.

- Les options de gouvernance qui tirent parti de synergies sont les plus à même de conduire à la réalisation des ODD.
- Il convient de mobiliser davantage les parties prenantes aux mécanismes de gouvernance et de mettre en place des initiatives avec elles dans le cadre d'une coopération régionale et de partenariats avec le secteur privé.

- Placer la biodiversité au cœur des politiques, plans et programmes de développement peut améliorer les efforts déployés pour atteindre aussi bien les objectifs d'Aichi que les ODD.

Favorisant ainsi la gestion intégrée des écosystèmes mettant en relation les échelles locale et régionale, en particulier dans le cadre des réserves de biosphère, des sites du patrimoine mondial et des géo parcs mondiaux.

Le quinzième objectif vise à mettre en place une gestion durable des écosystèmes terrestres (forêts et montagnes) en préservant la biodiversité et les sols et limitant les impacts de long terme des catastrophes naturelles. Il appelle à ce que la protection des écosystèmes et de la biodiversité soit intégrée dans les planifications nationales et stratégies de réduction de la pauvreté. L'ODD15 souligne l'importance de protéger les espèces menacées via une coopération internationale renforcée pour lutter contre le braconnage et le trafic et mettre en place des mesures de contrôle, voire d'éradication, d'espèces exotiques envahissantes néfastes pour les écosystèmes.

Tableau 2. Cibles de l'Objectif de Développement Durable 15 (ODD 15) : Vie terrestre

Cible	Intitulé	Description
15.1	**Préservation des écosystèmes terrestres**	D'ici à 2020, garantir la conservation, la restauration et l'utilisation durable des écosystèmes terrestres et des écosystèmes d'eau douce ainsi que des services qu'ils fournissent, notamment les forêts, les zones humides, les montagnes et les zones arides, conformément aux accords internationaux.
15.2	**Gestion durable des forêts**	D'ici à 2020, promouvoir la gestion durable de tous les types de forêts, mettre fin à la déforestation, restaurer les forêts dégradées et accroître significativement le boisement et le reboisement à l'échelle mondiale.
15.3	**Lutte contre la dégradation des sols**	D'ici à 2030, combattre la désertification, restaurer les terres et les sols dégradés, y compris ceux affectés par la sécheresse, les inondations et la désertification, et tendre vers un monde sans dégradation des terres.
15.4	**Conservation des écosystèmes montagneux**	D'ici à 2030, assurer la conservation des écosystèmes montagneux et de leur biodiversité afin de préserver les services essentiels qu'ils rendent au développement durable.
15.5	**Protection de la biodiversité et des espèces menacées**	Prendre des mesures urgentes pour réduire la dégradation des habitats naturels, stopper l'érosion de la biodiversité, protéger les espèces menacées et prévenir leur extinction.
15.6	**Accès aux ressources génétiques et partage des avantages**	Garantir un partage juste et équitable des avantages découlant de l'utilisation des ressources génétiques et favoriser un accès approprié à ces ressources conformément aux accords internationaux.

15.7	**Lutte contre le braconnage et le trafic d'espèces**	Mettre fin au braconnage et au commerce illégal d'espèces sauvages protégées en agissant à la fois sur l'offre et sur la demande.
15.8	**Gestion des espèces exotiques envahissantes**	Empêcher l'introduction d'espèces exotiques envahissantes, réduire leurs impacts sur les écosystèmes terrestres et aquatiques et contrôler ou éradiquer les espèces prioritaires.
15.9	**Intégration de la biodiversité dans les politiques publiques**	Intégrer les valeurs liées aux écosystèmes et à la biodiversité dans les stratégies nationales, les politiques de développement, les mécanismes de réduction de la pauvreté et les systèmes de comptabilité.
15.a	**Financement de la biodiversité**	Mobiliser et accroître les ressources financières provenant de diverses sources afin de préserver la biodiversité, restaurer les écosystèmes et assurer leur gestion durable.
15.b	**Financement de la gestion durable des forêts**	Mobiliser des ressources suffisantes à tous les niveaux pour financer la gestion durable des forêts, soutenir la conservation forestière et encourager les activités de boisement et de reboisement, notamment dans les pays en développement.
15.c	**Renforcement des moyens de lutte contre le braconnage**	Renforcer le soutien international à la lutte contre le braconnage et le trafic d'espèces protégées, notamment en développant des moyens de subsistance durables pour les communautés locales.

Les ressources naturelles sont souvent considérées comme des actifs essentiels qui stimulent le développement et la création de richesses. Une telle surexploitation menace en fin de compte les moyens de subsistance et le bien-être des personnes qui dépendent de ces ressources, et met en péril la santé des écosystèmes. Ce risque d'épuisement des ressources, qui se manifeste notamment sous la forme d'effondrements des pêcheries, démontre la nécessité de réguler l'exploitation des ressources naturelles de manière à mieux préserver les ressources et leurs écosystèmes.

Ainsi, la Déclaration de Stockholm sur l'environnement humain a été adoptée le 16 juin 1972 lors de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement humain, tenue à Stockholm (Suède) du 5 au 16 juin 1972. Elle constitue le premier grand texte international consacrant la protection de l'environnement comme une préoccupation mondiale.

Ces principaux objectifs sont :

- Reconnaître le droit fondamental de l'être humain à vivre dans un environnement de qualité.
- Promouvoir la protection et l'amélioration de l'environnement pour les générations présentes et futures.
- Encourager la coopération internationale pour résoudre les problèmes environnementaux.
- Intégrer les considérations environnementales dans les politiques de développement économique et social (United Nations, 1972).

3. Rôle des communautés locales et de la participation citoyenne

3.1. Rôle des communautés locales

Les études montrent qu'une intégration des populations locales peut contribuer à une gestion plus durable, à la préservation de la biodiversité, à la résilience accrue face aux perturbations, à la conservation du carbone et à la réduction des conflits, ce qui bénéficie à long terme aux forêts et à l'environnement en général.

- De plus, les acteurs locaux ont une connaissance approfondie de la faune et de la flore locales. Leur implication permet d'orienter les projets vers la préservation des espèces endémiques et de restaurer les écosystèmes de manière plus ciblée. Elles permettent la plantation et la collecte d'essences locales qui peuvent être méconnues en dehors des communautés locales, favorisant ainsi la diversité génétique des forêts restaurées.
- C'est la raison principale de notre collaboration avec les acteurs locaux, les entités économiques et les ONG. Nos connaissances scientifiques s'ajoutent aux leur vaste expérience sur le terrain. Une illustration pratique de cette collaboration concerne la sélection des espèces végétales. Sur certains projets, à la suite de discussions avec les acteurs locaux, des ajustements ont été apportés à la liste des 25 espèces généralement plantées, y compris l'ajout ou le retrait de graines.

3.2. La participation citoyenne

Placer les citoyens au cœur de l'action publique suppose de considérer le temps, l'attention, les connaissances empiriques et l'énergie des individus comme des atouts précieux. Il faut également établir avec clarté les limites que l'on fixe à la participation citoyenne et de quelle manière sera assurée la redevabilité vis-à-vis des citoyens quant à leurs contributions.

3.2.1. Reconnaître les défis et les limites liés à la participation citoyenne à l'action publique.

La participation citoyenne est aujourd'hui considérée comme un élément essentiel de la gouvernance démocratique et du développement durable. Elle permet aux citoyens de contribuer à l'élaboration, à la mise en œuvre et à l'évaluation des politiques publiques. En intégrant les citoyens dans les processus décisionnels, les pouvoirs publics peuvent bénéficier de connaissances locales, d'expériences vécues et de perspectives diversifiées, ce qui favorise des décisions plus adaptées aux besoins réels des populations.

Cependant, placer les citoyens au cœur de l'action publique implique de reconnaître que leur temps, leur attention, leurs connaissances empiriques et leur énergie constituent des ressources précieuses et limitées. La participation ne doit donc pas être perçue comme une simple formalité administrative, mais comme un engagement nécessitant des efforts de la part des citoyens et des institutions (Fung, 2015 ; OECD, 2022).

Les principaux défis de la participation citoyenne renferme :

La représentativité des participants : Les personnes qui participent aux consultations publiques ne reflètent pas toujours la diversité de la population. Certains groupes, tels que les jeunes, les populations rurales, les personnes à faible revenu ou les minorités, peuvent être sous-représentés en raison de contraintes économiques, sociales ou culturelles.

L'inégalités d'accès à la participation : L'accès à l'information, aux outils numériques ou aux espaces de concertation peut être inégal. Ces disparités risquent de limiter la participation de certaines catégories de citoyens et d'accentuer les inégalités existantes.

Complexité des enjeux publics : De nombreuses politiques publiques concernent des sujets techniques ou scientifiques complexes (environnement, énergie, santé, urbanisme, etc.). Les citoyens peuvent éprouver des difficultés à comprendre certains aspects des dossiers, ce qui nécessite des efforts de vulgarisation et d'accompagnement.

Risque de participation symbolique : La participation citoyenne peut parfois se limiter à une consultation sans réelle influence sur les décisions finales. Cette situation, souvent qualifiée de « participation de façade » ou *tokenisme*, peut engendrer frustration et méfiance envers les institutions.

Contraintes de temps et de ressources : La participation exige du temps et un investissement personnel. Tous les citoyens ne disposent pas des mêmes disponibilités pour assister à des réunions, répondre à des enquêtes ou participer à des ateliers de concertation.

3.2.2. Déterminer les défis systémiques associés à la participation citoyenne en plaçant le citoyen au centre.

Quoiqu'elles restent fragmentées, les possibilités de participer au cycle de l'action publique dans les différents pouvoirs constitutifs de l'État et à différents niveaux de gouvernance se multiplient, créant de nouveaux défis, que ce soit pour les citoyens, les représentants élus ou les agents publics.

Toutefois, cette approche se heurte à plusieurs défis systémiques qui relèvent à la fois des institutions, des mécanismes de gouvernance, des inégalités sociales et des capacités des acteurs concernés.

A. Assurer une participation inclusive et représentative

L'un des principaux défis consiste à garantir que l'ensemble des groupes sociaux puisse participer aux processus décisionnels. Les inégalités socio-économiques, les différences de niveau d'éducation, les barrières linguistiques ou encore la fracture numérique peuvent limiter l'implication de certaines catégories de citoyens, créant ainsi des biais de représentation.

B. Renforcer la confiance entre citoyens et institutions

La méfiance envers les institutions publiques peut réduire l'engagement citoyen. Lorsque les citoyens estiment que leurs contributions ne sont pas prises en compte ou n'influencent pas réellement les décisions, ils peuvent se désengager des démarches participatives. Restaurer cette confiance nécessite davantage de transparence, de dialogue et de redevabilité.

C. Adapter les institutions à la participation citoyenne

Les administrations publiques sont souvent organisées selon des modèles hiérarchiques qui ne favorisent pas toujours la co-construction des politiques publiques. Intégrer efficacement la participation citoyenne suppose de développer de nouvelles compétences, de nouveaux outils

de concertation et des mécanismes permettant d'intégrer les contributions des citoyens dans les processus décisionnels.

D. Gérer la complexité des enjeux publics

Les problématiques contemporaines telles que le changement climatique, la gestion des ressources naturelles, la transition énergétique ou la santé publique sont souvent complexes et multidimensionnelles. Il est donc nécessaire de rendre l'information accessible et compréhensible afin que les citoyens puissent participer de manière éclairée.

E. Équilibrer expertise scientifique et savoirs citoyens

La prise de décision publique repose fréquemment sur des connaissances techniques et scientifiques spécialisées. Le défi consiste à articuler ces expertises avec les savoirs locaux, les expériences vécues et les connaissances empiriques des citoyens, sans marginaliser l'une ou l'autre source de savoir.

F. Assurer la pérennité de l'engagement citoyen

La participation citoyenne nécessite du temps, de l'énergie et une motivation durable. Le maintien de cet engagement constitue un défi majeur, notamment lorsque les résultats sont peu visibles ou lorsque les processus participatifs sont perçus comme trop longs ou inefficaces.

G. Réduire les effets de la fracture numérique

Le développement des plateformes numériques facilite la participation, mais peut également exclure les personnes ayant un accès limité aux technologies ou des compétences numériques insuffisantes. Une approche centrée sur le citoyen doit donc combiner dispositifs numériques et mécanismes de participation en présentiel.

H. Garantir la transparence et la redevabilité

Les citoyens doivent être informés de la manière dont leurs contributions influencent les décisions publiques. L'absence de retour sur les résultats des consultations peut affaiblir la crédibilité des dispositifs participatifs et réduire la confiance dans les institutions.

3.2.3. Envisager la dynamique des écosystèmes de la participation citoyenne.

Par un processus d'évolution graduel, plutôt qu'une révolution, des trajectoires hybrides de participation citoyenne émergent selon lesquelles des processus participatifs et délibératifs sont élaborés en parallèle, et déployés en association avec des mécanismes de démocratie représentative établis de longue date.

Pour favoriser une approche itérative de la participation citoyenne et une représentation récursive dans l'élaboration des politiques publiques, il sera nécessaire d'accorder davantage d'attention au suivi des performances et de l'impact au fil du temps, et de renouveler les efforts visant à stimuler l'inclusion et la flexibilité.

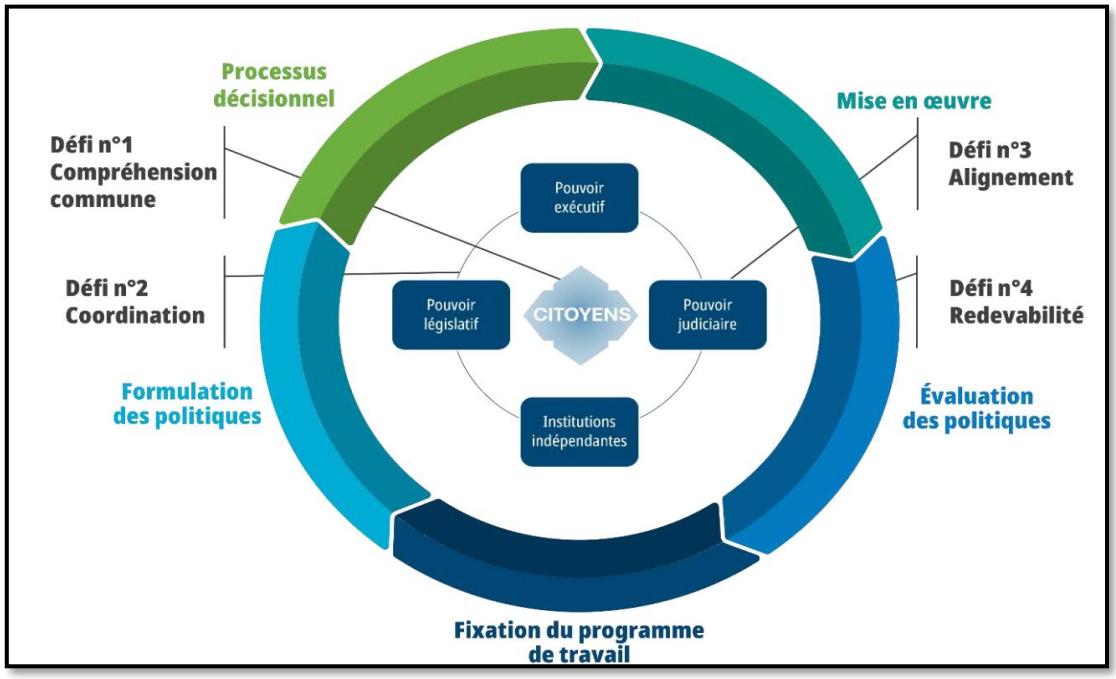


Figure 17. Défis systémiques associés à la participation citoyenne au cycle de l'action.

4. Rôle des politiques internationales et des accords environnementaux

4.1. Qu'est-ce que le droit international de l'environnement

Le droit international de l'environnement désigne les textes internationaux adoptés pour défendre et promouvoir l'environnement, sur un principe de solidarité. Il voit le jour au cours des années 1970, à la suite d'une prise de conscience des effets de l'activité humaine sur

l'environnement. En effet, en 1992, le Sommet de la terre organisé à Rio est considéré comme un tournant historique dans la prise de conscience par la communauté internationale de l'importance des enjeux environnementaux. À l'issue de ce sommet, est conclu le premier traité international sur le changement climatique.

Fondée sur un "partenariat mondial", la Convention Cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) précise qu'*il incombe aux Parties de préserver le système climatique dans l'intérêt des générations présentes et futures*". Elle engage la communauté internationale à lutter contre l'augmentation des gaz à effet de serre liés aux activités humaines. La branche du droit international se construit progressivement avec la conclusion de conventions et traités internationaux. Elle est majoritairement composée de principes et recommandations fondés sur des engagements volontaires, ce qui lui vaut le qualificatif de "droit mou" (peu contraignant).

Les textes les plus emblématiques - Protocole de Kyoto de 1997 et Accord de Paris de 2015 - ont contribué à limiter les émissions de gaz à effet de serre, mais les objectifs sont loin d'être remplis, faute de sanctions clairement définies.

Les politiques internationales et les accords environnementaux jouent un rôle central dans la gestion des défis écologiques qui transcendent les frontières nationales. L'objectif principal est de promouvoir la coopération entre les États pour protéger et restaurer l'environnement, garantir la durabilité et faire face aux problèmes environnementaux mondiaux.

Cette responsabilité partagée incite les nations à adopter des réglementations et des mesures d’application conformes aux normes internationales, conduisant à un contrôle les problèmes de dégradations des écosystèmes (surexploitation, déforestation, pollution, et changements climatiques ...) plus complet et plus efficace que ne pourraient l’être des efforts nationaux isolés.

4.2. Créer un cadre pour l'action collective

- **Établir des normes communes :** Les accords environnementaux multilatéraux (AEM) fixent des normes et des objectifs que les nations signataires s'engagent à respecter. Cela évite une "course vers le bas", où les pays pourraient affaiblir leurs réglementations environnementales pour attirer des entreprises et rester compétitifs sur le plan économique.
- **Coordonner les réponses aux problèmes transfrontaliers :** Les problèmes environnementaux comme le changement climatique, la perte de biodiversité et la pollution ne respectent pas les frontières. Les politiques internationales permettent de coordonner les actions de nombreux pays pour gérer des ressources partagées et atténuer les impacts environnementaux globaux.
- **Partager les connaissances et l'assistance :** Les accords facilitent l'échange d'informations scientifiques, de bonnes pratiques et de technologies propres entre les pays. Des mécanismes sont souvent inclus pour fournir une assistance financière et technique aux pays en développement, les aidant à respecter leurs obligations.
- **Inspirer et influencer la législation nationale :** Les accords et conventions internationales contribuent à orienter les politiques publiques et à renforcer les cadres législatifs nationaux en faveur de la protection de l'environnement et de la biodiversité.
- **Encourager l'innovation et la durabilité :** La pression internationale et les objectifs fixés par les accords peuvent inciter les gouvernements et les entreprises à développer des technologies et des pratiques plus durables et respectueuses de l'environnement.
- **Renforcer les lois nationales :** Les accords internationaux établissent des engagements qui influencent et renforcent les législations environnementales au niveau national. L'Inde, par exemple, a aligné ses politiques sur les efforts mondiaux pour la protection de l'environnement grâce à ces accords.

4.3. Responsabiliser les nations

- **Surveillance et reddition de comptes :** La plupart des accords incluent des mécanismes de suivi et de rapport, exigeant des pays de faire le point sur leurs progrès. Cette transparence permet à la communauté internationale d'évaluer la conformité et de tenir les nations responsables de leurs engagements.
- **Établir une obligation mutuelle :** Les accords créent une obligation mutuelle entre les nations de protéger les biens communs mondiaux, reconnaissant que l'environnement est un système unique et interconnecté.

4.4. Cas de contrôle de la pollution

La pollution traverse souvent les océans, descend les fleuves en franchissant les frontières et dérive à travers l'atmosphère. Y faire face nécessite donc plus que des politiques nationales isolées. La collaboration à travers des accords internationaux permet de mettre en place des stratégies coordonnées visant à cibler la pollution à sa source et à atténuer ses effets dans l'ensemble des régions touchées.

La responsabilité partagée devient le principe directeur, reconnaissant que les biens environnementaux communs appartiennent à tous, tandis que la charge de leur protection repose sur des États agissant de concert. Cette approche collective permet de tirer parti des diverses capacités et ressources nationales pour obtenir un impact global plus important.

4.5. Cas de suivi des changements climatiques

Créé en 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), IPCC en anglais, a pour fonction d'évaluer les données scientifiques disponibles sur l'évolution du climat, d'apprécier les incidences écologiques et socio-économiques de cette évolution et de formuler des stratégies possibles de prévention et d'adaptation. En effet, des

politiques et des mesures coordonnées pourraient représenter une alternative ou compléter des objectifs internationalement convenus pour la réduction des émissions.

Un certain nombre de politiques publiques ont fait l'objet de discussions dans la littérature, politiques qui pourraient atteindre cet objectif, y compris les taxes (comme les taxes sur le CO_2 ou sur l'énergie) ; la coordination / libéralisation des échanges ; la R&D ; les politiques sectorielles et les politiques qui modifient les investissements étrangers directs.

Selon l'une des propositions, toutes les nations participantes – industrialisées et en voie de développement sur pied d'égalité – taxeraient leurs usages domestiques du carbone à un taux commun, atteignant ainsi la rentabilité par rapport aux coûts. D'autres soulèvent que si un prix du carbone égal pour tous les pays est efficient d'un point de vue économique, il pourrait ne pas être politiquement possible dans le contexte des distorsions de taxes existantes (bon accord, nombreuses mises en évidence).

Tableau 3 . Évaluation des accords internationaux sur les changements climatiques

Approche	Efficacité environnementale	Rapport coût/efficacité	Faisabilité institutionnelle
Objectifs d'émissions nationaux et échanges internationaux d'émissions	Dépend de la participation et de la mise en conformité	Baisse avec la participation, avec le nombre de secteurs et de gaz pris en considération	Dépend de la capacité à préparer des inventaires et des mises en conformité. Les lacunes affaiblissent la stabilité du régime
Accords sectoriels	Tous les secteurs ne sont pas enclins à des accords de ce type, ce qui limite l'efficacité totale. L'efficacité dépend du	Le manque d'échanges entre les secteurs augmente les coûts totaux, bien que les accords puissent être d'un rapport coût/efficacité satisfaisant au	Nécessite de nombreuses décisions distinctes et une capacité technique. Chaque secteur peut avoir besoin d'institutions à

	caractère contraignant ou non de l'accord	sein de l'un ou l'autre secteur. Les questions de concurrence sont réduites au sein de chaque secteur	l'échelle du pays pour gérer les accords
Politiques et mesures coordonnées	Les mesures individuelles peuvent être efficaces ; les niveaux d'émissions peuvent être incertains ; le succès sera fonction de la mise en conformité	Dépend de la conception des politiques publiques	Dépend du nombre de pays (plus facile dans de petits groupes de pays qu'à l'échelle mondiale)
Coopération technologique sur la R&Db	Dépend du financement, du moment où les technologies sont développées et des politiques de diffusion	Varie avec le degré de risque de R&D. La coopération réduit le risque national particulier	Nécessite de nombreuses décisions séparées. Dépend de la capacité de recherche et du financement à long terme.
Actions orientées vers le développement	Dépend des politiques nationales et de la conception pour créer des synergies	Dépend de l'ampleur des synergies avec les autres objectifs de développement	Dépend de la priorité donnée au développement durable dans les politiques nationales et dans les objectifs des institutions nationales
Mécanismes financiers	Dépend du financement	Dépend du pays et du type de projet	Dépend des institutions nationales
Renforcement des capacités	Varie à travers le temps et dépend de la masse critique	Dépend de la conception du programme	Dépend du pays et du cadre institutionnel

4.6. Accord de Paris sur le climat

L'Accord de Paris, adopté le 12 décembre 2015 lors de la 21e Conférence des Parties (COP21) de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), constitue le premier accord universel sur le climat. Son objectif principal est de renforcer la lutte contre le changement climatique tout en favorisant un développement durable à l'échelle mondiale.

1. Limitation du réchauffement climatique : L'objectif central de l'Accord est de limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale :

- à moins de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels ;
- en poursuivant les efforts pour la limiter à 1.5 °C.

2. Financement (2020-2025) : Les pays développés doivent mobiliser 100 milliards de dollars par an à partir de 2020 pour soutenir les pays en développement dans leurs actions climatiques.

Les financements concernent notamment les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique, la gestion durable des ressources en eau, la restauration des écosystèmes et les infrastructures résilientes face aux catastrophes climatiques.

3. Différenciation des responsabilités : Les pays développés doivent continuer à montrer l'exemple en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Les pays en développement doivent renforcer progressivement leurs efforts d'atténuation en fonction de leurs capacités et de leur situation nationale.

4. Objectif d'émissions (horizon 2050) : Atteindre un plafonnement des émissions de GES dans les meilleurs délais. À partir de 2050, parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques de gaz à effet de serre et leur absorption par les puits de carbone.

5. Partage des efforts : L'Accord reconnaît que tous les pays doivent participer à l'action climatique. Les pays développés doivent fournir des ressources financières pour aider les pays en développement. Les autres pays sont encouragés à apporter un soutien volontaire.

6. Mécanisme de révision : Afin d'éviter que les engagements restent insuffisants, l'Accord prévoit un mécanisme de révision périodique. Les engagements climatiques sont révisés tous les cinq ans. Un premier bilan mondial était prévu en 2025 selon l'infographie. Chaque nouvelle révision doit représenter une progression par rapport à la précédente afin d'accroître l'ambition climatique.

7. Pertes et préjudices : Même avec des politiques ambitieuses, certains impacts climatiques sont inévitables. Les États reconnaissent la nécessité d'aider les pays les plus vulnérables à prévenir, réduire et gérer les pertes et préjudices liés aux effets du changement climatique.

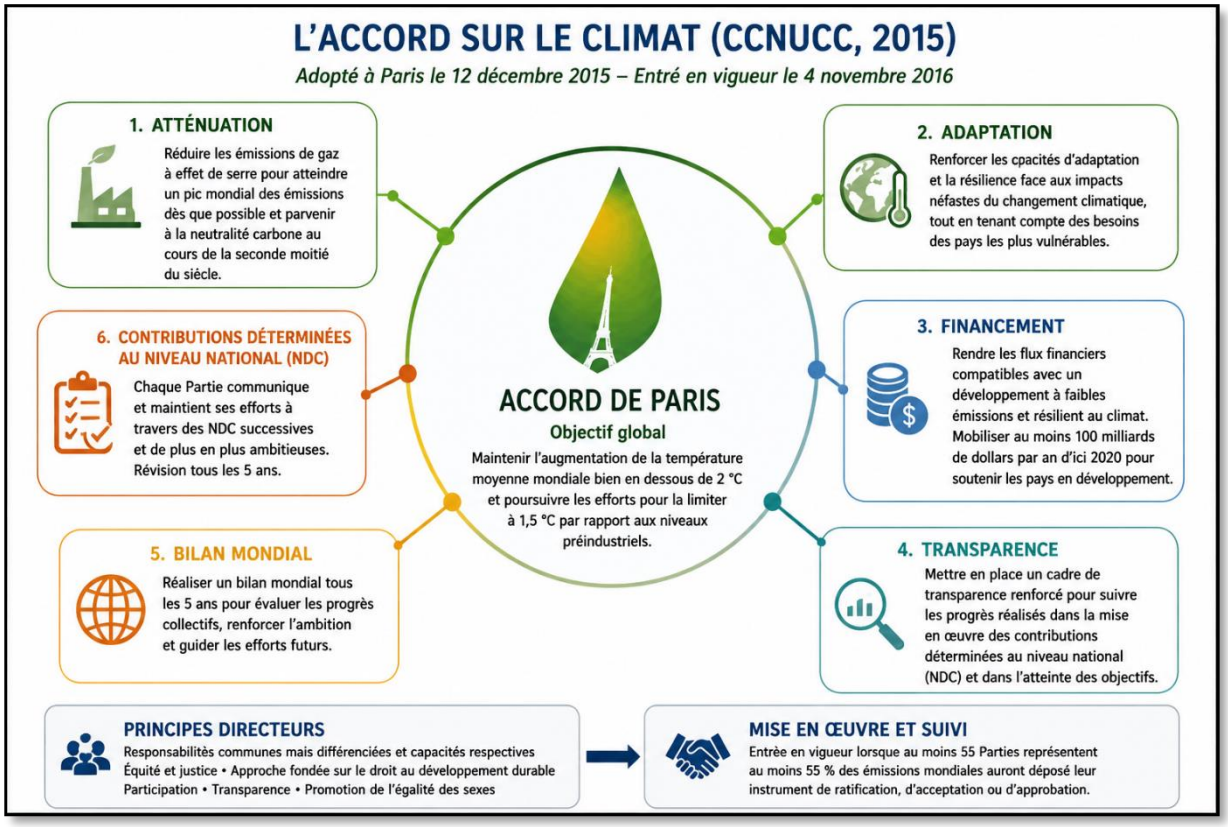


Figure 18. Les points clés de l'accord sur le climat (CCNUCC, 2015).

5. Perspectives d'avenir pour la durabilité des écosystèmes

Face à l'escalade des défis climatiques, l'adaptation basée sur les écosystèmes apparaît comme une approche pratique avec le potentiel de catalyser la résilience climatique, la préservation de la biodiversité et le développement durable. Cette approche stratégique – exploitant la biodiversité et les services écosystémiques pour aider les communautés à s'adapter aux effets néfastes du changement climatique – est de plus en plus reconnue pour ses multiples bienfaits, tant pour les populations que pour la nature (Global EbA Fund, 2025).

L'urgence de transposer à plus grande échelle les différentes solutions aux crises interconnectées du climat, des terres et de l'eau est reconnue dans de nombreux cadres internationaux, comme la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, le Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal de la Convention sur la diversité biologique, la Conférence des Nations Unies sur l'eau de 2023, le Sommet des ODD de 2023 et le Cadre mondial contre la pénurie d'eau dans l'agriculture. C'est aussi une priorité de la FAO, comme en témoigne l'adoption par l'Organisation du Cadre conceptuel pour la gestion intégrée des terres et des eaux (FAO, 2025). Ce cadre expose la vision de l'Organisation en matière de gestion intégrée des ressources en terres et en eau, ainsi que sa mission, ses cinq résultantes, les moyens de les atteindre et les liens avec les domaines prioritaires du Programme définis dans le Cadre stratégique de la FAO pour 2022-2031 (FAO, 2025).

Parmi les principales orientations figurent :

- **Le renforcement des actions de restauration écologique**, conformément à la Décennie des Nations Unies pour la restauration des écosystèmes (2021-2030), afin de restaurer les terres dégradées, les forêts, les zones humides et les écosystèmes marins.
- **La conservation de la biodiversité**, à travers l'extension des aires protégées, la préservation des habitats naturels et la lutte contre les espèces exotiques envahissantes.

- **L'adaptation au changement climatique**, en développant des solutions fondées sur la nature qui renforcent la résilience des écosystèmes et des sociétés humaines.
- **La gestion durable des ressources naturelles**, notamment l'eau, les sols, les forêts et les ressources halieutiques, afin de garantir leur disponibilité à long terme.
- **L'intégration des nouvelles technologies**, telles que la télédétection, les systèmes d'information géographique (SIG), l'intelligence artificielle et la génomique, pour améliorer le suivi et la gestion des écosystèmes.
- **Le renforcement de la gouvernance environnementale**, en favorisant la participation des communautés locales, des décideurs et des acteurs économiques dans les processus de gestion et de conservation.
- **La transition vers des modèles économiques durables**, intégrant les principes de l'économie circulaire, de l'agroécologie et de la valorisation des services écosystémiques.

La réussite de ces stratégies dépendra de la coopération internationale, de l'application effective des politiques environnementales et de la mobilisation de ressources financières suffisantes. La durabilité des écosystèmes ne constitue pas seulement un objectif de conservation, mais également une condition essentielle au maintien du bien-être humain et à la réalisation des objectifs de développement durable.

Références bibliographiques

- Arca, M., Mougel, F., Guillemaud, T. (2015). Reconstructing the invasion and the demographic history of the yellow-legged hornet, Vespa velutina, in Europe. Biol Invasions 17, 2357–2371. https://doi.org/10.1007/s10530-015-0880-9
- Bebber, D. P., Ramotowski, M. A. T., & Gurr, S. J. (2013). Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. Nature Climate Change, 3, 985–988.
- Bertolino S., Lioy S., Laurino D., Manino A., Porporato M. (2016). Spread of the invasive yellow-legged hornet Vespa velutina (Hymenoptera: Vespidae) in Italy. Applied Entomology and Zoology. 51. 10.1007/s13355-016-0435-2. Spread of the invasive yellow-legged hornet Vespa velutina Lepeletier, 1836, in Europe. EPPO Bulletin, 45(1), 7–14.
- Cardinale, B. J., Duffy, E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. Nature 486 :7401, 486, 59–67. http://doi.org/10.1038/nature11148
- Dawson, Wayne & Moser, Dietmar & van Kleunen, Mark & Kreft, Holger & Pergl, Jan & Pyšek, Petr & Weigelt, Patrick & Winter, Marten & Lenzner, Bernd & Blackburn, Tim & Dyer, Ellie & Cassey, Phil & Scrivens, Sally & Economo, Evan & Guénard, Benoit & Capinha, César & Seebens, Hanno & García, Pablo & Nentwig, Wolfgang & Essl, Franz. (2017). Global hotspots and correlates of alien species richness across taxonomic groups. Nature Ecology & Evolution. 1. 0186. 10.1038/s41559-017-0186.
- De Groot, R.S., Fisher, B., Christie, M., Aronson, J., Braat, L., Haines-Young, R., Gowdy, J., Maltby, E., Neuville, A., Polasky, S., Portela, R. et Ring, I. (2010a). Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. Chapitre 1 dans The Economics of Ecosystems and Biodiversity:

Ecological and Economic Foundations, P. Kumar (éd.). Earthscan, Londres, Royaume-Uni.

- De Groot, R.S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L. et Willemen, L. (2010b). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. Ecological Complexity, 7(3), 260–272.
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., & Naylor, R. L. (2018). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. Science, 361(6405), 916–919.
- Eliazer Nelson ARL, Ravichandran K, Antony U. (2019). The impact of the green revolution on indigenous crops of India. J Ethn Foods. 6 :8. https://doi.org/10.1186/s42779-019-0011-9
- Ellis, E.C., Klein Goldewijk, K., Siebert, S., Lightman, D. et Ramankutty, N. (2010). Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. Global Ecology and Biogeography, 19(5), 589–606.
- Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (2005). Ecosystems and human well-being : Synthesis. Island Press, Washington, DC.
- Fahrig, L. (2017). "Ecological Responses to Habitat Fragmentation". Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 48, 1–23.
- FAO. (2018). The State of Food Security and Nutrition in the World : Building climate resilience for food security and nutrition., Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- FAO (2022). Tracking progress on food and agriculture-related SDG indicators. Rome. https://doi.org/10.4060/cc1403en
- Faure G, Geck M, Paracchini M-L. (2024.). What Agroecology Brings to Food Security and Ecosystem Services : A Review of Scientific Evidence.

- Gagic, V., Bartomeus, I., Jonsson, T., Taylor, A., Winqvist, C., Fischer, C., Bommarco, R. (2015). Functional identity and diversity of animals predict ecosystem functioning better than species-based indices. Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences, 282. http://doi.org/10.1098/RSPB.2014.2620
- GIEC. (2019a). Rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres, P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (éd.).
- Giller, P. S., H. H, U.-G. Berninger, M. O. Gessner, S. Hawkins, P. Inchausti, C. Inglis, H. Leslie, B. Malmqvist, M. T. Monaghan, P. J. Morin, and G. O'Mullan. (2004). Biodiversity effects on ecosystem functioning : Emerging issues and their experimental test in aquatic environments. Oikos 104 :423- 436.
- Goudard A. (2007). Fonctionnement des écosystèmes et invasions biologiques : importance de la biodiversité et des interactions interspécifiques. Ecologie, Environnement. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Gray C. (2020). Protecting and Enabling Nature-Based Solutions. https:// www.swissre.com/dam/jcr:19ebcb33-03c6-41bb-9047-917c95116b43/nature-based-solutions-pss.
- Halpern B.S., McLeod, K.L., Rosenberg, A.A., Crowder, L.B. (2008). Managing for cumulative impacts in ecosystem-based management through ocean zoning. Ocean and Coastal Management, 51(3), 203–211.

- HLPE. (2020). Food security and nutrition : building a global narrative towards 2030. 112 pages.
- IPBES. (2018). The regional assessment repor t on biodiversity and ecosystem services for the Americas. J. Rice, C.S. Seixas, M.E. Zaccagnini, M. Bedoya-Gaitán et N. Valderrama (éd.). Secrétariat de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques, Bonn, Allemagne, 656p.https://ipbes.net/assessment-reports/americas.
- IPBES. (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the intergovern-mental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services. Brondizio ES, Settele J,
- IPBES. (2024). Thematic Assessment Report on Transformative Change and the Underlying Causes of Biodiversity Loss. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
- IPCC. (2022). Climate Change. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press.
- Jones K.R., Klein C.J., Halpern B.S., Venter O., Grantham H., Kuempel C.D., Shumway N., Friedlander A.M., Possingham H.P., Watson J.E.M. (2018). The location and protection status of Earth's diminishing marine wilderness. Current Biology. 28(15), 2506–2512.
- Laskotra L., Bala R., Gaba R. (2026). Identifying Sources of Water Pollution. In : Sobti, R.C. (eds) Biotechnology Innovations for a Sustainable Future. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9859-9_76
- Lefcheck J. S., Byrnes J. E., Isbell F., Gamfeldt L., Griffin J. N., Eisenhauer N., Duffy E. (2015). Biodiversity enhances ecosystem multifunctionality across trophic levels and habitats. Nature Communications, 6.http://doi.org/10.1038/NCOMMS7936

- Madhav S., Ahamad A., Singh A.K., Kushawaha J., Chauhan J.S., Sharma S., Singh P. (2020). Water pollutants : Sources and impact on the environment and human health. In : Sensors in water pollutants monitoring : Role of material. Springer, pp 43–62
- Mezard C., (2018). Caractérisation des perturbations anthropiques de la forêt des pins d'Haïti : Cas de l'unité 2. Mémoire de Master en production intégrée et préservation des ressources naturelles en milieu urbain et péri-urbain, Université de Liège, Belgique, 79 p.
- Mirzabaev A., Bezner Kerr R., Hasegawa T., Pradhan P., Wreford A., Tirado von der Pahlen M.C., Gurney-Smith H. (2023). Severe climate change risks to food security and nutrition, Climate Risk Management. Volume 39,100473. ISSN 2212-0963. https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100473.
- Molnar M., Olmstead P., Mitchell M., Raudsepp-Hearne C., Anielski M. (2021). Services écosystémiques, chapitre 5 dans Le Canada dans un climat en changement : Rapport sur les enjeux nationaux, (éd.) F.J. Warren et N. Lulham, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario).
- Monceau K., Bonnard O., Thiéry D. (2014). *Vespa velutina* : A new invasive predator of honeybees in Europe. Journal of Pest Science, 87, 1–16.
- Mouquet N., Gounand I., Grave D. (2010). Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes. Ed. Anne Teyssèdre.
- O'Neill B., M. van Aalst, Z. Zaiton Ibrahim L., Berrang Ford S., Bhadwal H. Buhaug, D., Diaz K., Frieler M., Garschagen A., Magnan G., Midgley A., Mirzabaev A., Thomas, R. Warren. (2022). Key Risks Across Sectors and Regions. In: Climate Change. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M.

Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. x-y.

- Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., (2017). Biodiversity redistribution under climate change : Impacts on ecosystems and human well-being. Science, 355(6332), eaai9214.
- PNUE. (2025). Global Environment Outlook 7 (GEO-7) : A Future We Choose. Programme des Nations Unies pour l'environnement.
- Rehman S (2015). Green revolution in India : environmental degradation and impact on livestock. Asian J Water Environ Pollut 12 : 75–80
- Retsa A., Schelske, O., Wilke B., Rutherford, G., de Jong R. (2020). Biodiversity and Ecosystem Services : a business case for re/insurance. Swiss Re Management Ltd., L. Kelly (éd.), 60 p.
- Rodrigues A. A., Macedo M.N., Silvério D.V. (2022). Cerrado deforestation threatens regional climate and water availability for agriculture and ecosystems. Global Change Biology. 28 : 6807–22.
- Roy P., S. Ramachandran R., M. Paul O., Thakur P., K. Ravan S., Behera M. D.et al., (2022). Anthropogenic land use and land cover changes a review on its environmental consequences and climate change. J. Indian Soc. Remote Sens.50, 1615–1640. 10.1007/s12524-022-01569-w
- Sachdev BK, DrS B, Chatterjee TB (2021). Contribution of the agriculture sector to the economic growth of India with both being interdependent on each other. J Emerg Technol Innov Res 8 : a103–a110.
- Seebens H., Blackburn T., Dyer E., Genovesi P., Hulme P. Jeschke J., Pagad S., Pyšek, P., Van Kleunen, Mark & Winter, Marten & Ansong, Michael & Arianoutsou, Margarita & Bacher, Sven & Blasius, Bernd & Brockerhoff, Eckehard & Brundu, Giuseppe & Capinha, César & Causton, Charlotte & Celesti-Grapow, Laura & Essl, Franz. (2018).

Global rise in emerging alien species results from increased accessibility of new source pools. Proceedings of the National Academy of Sciences. 115. 201719429. 10.1073/pnas.1719429115.

- Vallero DA (2019). Thermal pollution. In : Waste. Academic, pp 381–404.
- WWF (2024). Living Planet Report 2024 – A System in Peril. WWF, Gland, Switzerland.
- Zhang Z., Han J., Zhang Y., Sun Y., Sun Z., Liu Z. (2023). Connotation, status, and governance of land ecological security in China's new urbanization : recent advances and future prospects. Environ. Sci. Pollut. Res.30, 119654–119670. 10.1007/s11356-023-30888-9