

# ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE ET TERRITORIALE

Fondements scientifiques  
et bio-inspiration

Développer l'économie circulaire

Gérard Merlin  
Julien Ramousse  
Hervé Boileau

# Chapitre 1

## Introduction et généralités

### 1.1 Contexte et objectifs

Jamais l'espèce humaine n'a acquis autant de connaissances et développé de technologies qu'aujourd'hui et cet essor de savoir se fait actuellement à une vitesse de plus en plus grande. Ces connaissances et technologies ont permis globalement d'améliorer les conditions de vie de l'espèce humaine sur Terre. Ainsi, grâce aux progrès réalisés à l'échelle mondiale en matière d'accès aux soins de santé, à l'assainissement, à l'éducation et à la lutte continue contre la faim, l'espérance de vie non seulement augmente globalement dans le monde, mais l'écart entre les régions hautement développées et le reste du monde se réduit progressivement. Selon la Division de la population des Nations Unies, l'espérance de vie dans le monde à la naissance pour les deux sexes est passée de 46,5 ans en 1950 à 71,7 ans en 2022 et devrait atteindre 77,3 ans d'ici 2050<sup>1</sup>. Mais cela s'est fait en même temps qu'une exploitation généralisée et parfois sans limite de l'environnement et de ses ressources, ce qui impose aujourd'hui à l'humanité de redéfinir son rapport à la planète.

Notre société doit donc radicalement réorienter son développement et s'interroger sur les stratégies à mettre en œuvre pour respecter l'environnement et garantir notre devenir, sinon les conditions de vie feront que l'espérance de vie à la naissance et particulièrement l'espérance de vie en bonne santé rediminueront.

Nos connaissances actuelles peuvent-elles suffire, faut-il les compléter, faut-il en faire une lecture différente ? Les théories du changement scientifique et technologique considèrent la découverte et l'invention comme des processus endogènes dans lesquels les connaissances accumulées antérieurement permettent des progrès futurs en permettant aux chercheurs, selon les mots repris par Newton de la métaphore de Bernard de Chartres, de « se tenir sur les épaules de géants »<sup>2</sup>. Les dernières décennies ont donc été marquées par une croissance exponentielle du volume de nouvelles connaissances scientifiques et technologiques, créant ainsi des conditions propices à des avancées majeures dans de très nombreux domaines de la société humaine. Notre société humaine est devenue ainsi aujourd'hui une civilisation de technologues.

---

<sup>1</sup> <https://www.statista.com/chart/2266/life-expectancy-by-world-region/>. Pour 2024, l'espérance de vie en bonne santé à la naissance était de 71 ans pour la France d'après l'OMS : <https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/gho-ghe-hale-healthy-life-expectancy-at-birth>.

<sup>2</sup> Bernard de Chartres, cité par Guillaume de Conches en 1123, disait que nous sommes comme des nains assis sur des épaules de géants. Si nous voyons plus de choses et plus lointaines qu'eux, ce n'est pas à cause de la perspicacité de notre vue, ni de notre grandeur, c'est parce que nous sommes élevés par eux.

On pourrait penser que nous sommes aptes à maîtriser notre développement avec une finalité de bien-être généralisé inscrit dans ce que nous appelons « le progrès ». Pourtant certaines études suggèrent que la progression des connaissances ralentit dans plusieurs domaines majeurs. Une analyse bibliographique a récemment été réalisée sur 45 millions d'articles scientifiques et 3,9 millions de brevets provenant de six ensembles thématiques de données. Elle montre que les documents et les brevets sont de moins en moins susceptibles de rompre avec le passé et de pousser la science et la technologie dans de nouvelles directions. Cela serait dû à une restriction de l'utilisation des connaissances antérieures suggérant que ce ralentissement pourrait refléter un changement fondamental dans la nature de la science et de la technologie (Park *et al*, 2023). Cette décélération de nouvelles connaissances susceptibles de remettre en cause celles acquises risquerait de ne pas être favorable à la prise de conscience au changement nécessaire pour assurer un avenir favorable à l'espèce humaine.

En effet, l'accélération conséquente du développement des activités humaines entraîne de profonds bouleversements de l'environnement, jusqu'à modifier le fonctionnement même de la biosphère sur la Terre. Le changement climatique observé aujourd'hui en de multiples endroits de la planète et la disparition de nombreuses espèces vivantes en sont l'illustration.

Au cours du dernier million d'années de l'âge de la Terre, les moteurs du changement climatique, marqué par la succession de périodes glaciaires et interglaciaires, sont les variations de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et les variations astronomiques (orbitales) de notre planète par rapport au Soleil.

En moins de deux siècles les activités humaines de l'ère industrielle puis de l'ère actuelle sont en train de modifier le climat de la Terre à une vitesse encore jamais observée. La source principale de CO<sub>2</sub> atmosphérique est aujourd'hui l'activité humaine provoquant un emballement de ce moteur du changement climatique et avec toutes les conséquences sur la biosphère, sa composition et son fonctionnement.

Il faut être conscient également que pendant ces 10 000 dernières années qui correspondent à une période interglaciaire (l'Holocène), le climat de notre planète a été relativement très stable. Ce qui a contribué à favoriser le développement de l'espèce humaine et conduit à la civilisation d'aujourd'hui, responsable paradoxalement de l'instabilité climatique observée et plus globalement d'un changement climatique profond.

Le climat de l'Holocène, en étant favorable au développement des communautés humaines, a modifié les interactions entre les humains et la biosphère avec comme conséquence aujourd'hui une diminution de la biodiversité entraînant aussi une dégradation du fonctionnement de cette dernière.

Notre civilisation doit être consciente de sa fragilité et les connaissances et technologies acquises au cours de cette période « chanceuse » doivent être mises au service de son avenir en préservant au mieux son environnement.

La considération de cette trop forte empreinte des humains et de leurs activités sur l'environnement se développe et se généralise au sein de notre société avec le souci d'orienter les activités vers la durabilité en intégrant tout particulièrement les notions de sobriété de l'utilisation des ressources et de préservation de l'environnement.

Ainsi est apparue dans les années 1990 l'idée que le système industriel devrait s'inspirer du fonctionnement des écosystèmes naturels pour atteindre une gestion maîtrisée des ressources, avec une réduction des impacts environnementaux (Frosch et Gallopoulos, 1991), actant ainsi la naissance de l'écologie industrielle. Mais jusqu'à maintenant cette bio-inspiration (ou biomimétisme) est encore limitée et en particulier au niveau des actions des décideurs, même si au niveau des chercheurs spécialistes de ce domaine thématique il a été rapidement mis en avant la nécessité d'appliquer les concepts de l'écologie scientifique, comme l'application des principes thermodynamiques dont le principe de l'entropie par exemple (Georgescu-Roegen, 1971 ; Erkman, 1997 ; Harpet et Blavot, 2011).

Nous présentons et expliquons les bases scientifiques utiles au développement et à l'application de l'écologie industrielle et territoriale et plus largement de l'économie circulaire, avec en particulier les concepts et principes régissant l'évolution et le fonctionnement des écosystèmes naturels.

Issue de deux champs scientifiques, l'écologie industrielle et l'écologie territoriale, l'écologie industrielle et territoriale est la traduction opérationnelle de ces deux approches théoriques, à une échelle territoriale.

Dans la mesure où nous humains entretenons des relations réciproques avec les entités qui nous entourent, nous faisons également partie de la Nature. En reliant la présence et le développement de relations réciproques à la santé planétaire, nous pouvons soutenir qu'une compréhension de la Nature qui met l'accent sur les relations, plutôt que sur l'indépendance (ou l'opposition entre le développement humain et la Nature) peut nous aider à mieux structurer et atteindre nos objectifs de développement durable.

Il convient d'éviter un discours fortement politisé et trop « idéologique » comme celui souvent employé sur le changement climatique et qui a conduit parfois certains scientifiques à « oublier » la rigueur et l'objectivité nécessaires et ceci aussi bien du côté des climato-sceptiques que du côté des tenants du rôle de l'humain dans le réchauffement climatique (Asayama *et al*, 2017).

L'ouvrage se veut un « livre-fondement » où l'on puise des références théoriques, des concepts, et un cadre holistique. C'est plus un ouvrage de fond que de recettes pratiques.

Ce livre s'adresse aux chercheurs, décideurs et praticiens engagés dans la transition écologique et avec l'idée de penser avec la Nature plutôt que contre elle.

Nous pensons que ce livre comble un manque crucial : ancrer l'écologie industrielle dans les lois universelles de la physique et de la complexité.

## **1.2 Définitions et principales caractéristiques**

En France, la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte définit l'écologie industrielle et territoriale (EIT) sur la base d'une quantification des flux de matières (dont l'eau) et des flux d'énergie.

L'objectif de la loi est d'optimiser les flux des ressources utilisées et produites à l'échelle d'un territoire pertinent, dans le cadre d'actions de coopération, de mutualisation et de substitution de ces flux de ressources, afin de limiter les impacts environnementaux et d'améliorer la compétitivité économique et l'attractivité des territoires.

En France, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) spécifie que l'EIT en réconciliant le développement économique et la préservation des ressources vise à réduire l'usage de celles-ci sur un territoire par une approche systémique s'inspirant du fonctionnement des écosystèmes naturels (ADEME, 2022).

Pour répondre aux enjeux du développement durable, l'EIT s'inspire donc du fonctionnement des écosystèmes naturels dans lesquels « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme »<sup>3</sup>.

Cela correspond à une gestion optimisée des flux grâce à une organisation qui s'appuie par exemple sur un échange volontaire de ressources et une mise en œuvre de synergies entre les différents acteurs économiques d'un territoire (entreprises, agriculteurs, associations, collectivités...). Certains parlent alors de symbiose industrielle pour désigner cette notion de « fermeture de boucles industrielles » qui consiste à capturer les résidus d'une entité comme intrants pour une autre (Cecchin *et al*, 2021).

Les synergies sont de deux types :

- Les **synergies de substitution** : les déchets ou co-produits d'une activité deviennent une ressource pour une autre activité. Nous pouvons citer comme exemple, l'énergie consommée par un acteur qui provient de la chaleur fatale<sup>4</sup> d'un acteur voisin.
- Les **synergies de mutualisation** : les ressources matérielles et immatérielles disponibles (infrastructure, équipement, expertise, service, déchet, matière, énergie...) sont mises en commun. Nous pouvons citer par exemple le partage de locaux ou de machines, l'achat groupé d'énergie, les plans interentreprises pour mutualiser les déplacements....

L'EIT est en développement croissant ces dernières années et par exemple en France avec plus de 350 initiatives recensées en 2023. Mais on observe le plus souvent une approche de l'EIT encore empirique et même parfois simpliste pour sa bio-inspiration ou son biomimétisme des systèmes vivants dont les écosystèmes naturels, avec en particulier des visions trop partielles ou trop mono-opérationnelles. Ceci est en contradiction avec les principes du fonctionnement et de l'évolution des systèmes naturels comme nous le verrons par la suite.

La finalité de cet ouvrage est donc de fournir les bases scientifiques nécessaires pour une bio-inspiration réelle et efficace de cette approche systémique qu'est l'EIT et plus généralement pour l'économie circulaire.

---

<sup>3</sup> On retrouve ici la loi de conservation de la masse (ou de Lavoisier) qui n'est pas seulement vraie que pour les écosystèmes naturels mais applicable aussi à tout phénomène sur Terre.

<sup>4</sup> Par chaleur fatale, on entend une production de chaleur dérivée d'un site de production industrielle, qui n'en constitue pas l'objet premier dans le processus, et qui, de ce fait n'est pas utilisée. Elle représente donc une source d'énergie thermique.

En particulier, il convient de montrer comment gérer de façon durable la complexité du système considéré. Pour cela, il est recommandé entre autres une analyse thermodynamique du système étudié du fait de la genericité apportée par cette approche. Analysons en premier lieu à une échelle mondiale, la perception et la notion d'EIT en s'intéressant d'abord à l'écologie industrielle et les concepts associés (symbiose industrielle et économie circulaire) puis à l'écologie territoriale.

## 1.2.1 Écologie industrielle et économie circulaire

### 1.2.1.1 Approche théorique

Pour dynamiser la mise en œuvre et/ou la compréhension théorique du développement durable, au fil du temps ont été inventés de nouveaux termes et de nouveaux domaines de recherche : modernisation écologique, économie verte et croissance verte, écologie industrielle et plus récemment : économie circulaire (EC).

Pour déterminer comment les entreprises s'engagent dans l'économie circulaire (et l'EIT) et perçoivent le lien avec la durabilité, une enquête complétée d'entretiens a été menée auprès d'entreprises basées en Italie et aux Pays-Bas (Walker *et al*, 2022). Les réponses à l'enquête montrent que les entreprises considèrent l'économie circulaire comme l'un des outils permettant de parvenir au développement durable, en particulier dans le domaine environnemental, où l'accent est mis sur une utilisation respectueuse de l'environnement et des ressources.

Pourtant, les personnes interrogées sont moins convaincues que l'EC augmente les avantages économiques et sociaux des entreprises. Les entretiens montrent qu'une majorité de personnes interrogées considèrent la durabilité comme le concept primordial.

Cependant, la plupart des entreprises préconisent que le secteur privé s'efforce à la fois d'atteindre la durabilité et la circularité, même si la distinction entre les deux concepts dans les opérations commerciales quotidiennes semble synthétique et futile à certains. Ces résultats constituent un tremplin important pour mieux comprendre comment les organisations humaines (entreprises, collectivités) pourraient appliquer les pratiques d'EC pour évoluer vers une société plus durable.

L'écologie industrielle est une branche de la science concernée par les interrelations des systèmes industriels humains et de leurs environnements. Elle est parfois appelée la science de la durabilité parce qu'elle est motivée par l'hypothèse que les systèmes industriels peuvent être harmonisés avec l'environnement en imitant certaines des caractéristiques fondamentales des écosystèmes naturels (Allenby, 2011).

Son objectif est de comprendre les processus naturels et économiques liés au bien-être des générations futures. Pour cette compréhension, il est nécessaire d'avoir une approche interdisciplinaire au sens d'une approche systémique intégrée<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Se dit d'une approche scientifique des systèmes politiques, économiques, sociaux, etc., qui s'oppose à la démarche rationaliste en abordant tout problème comme un ensemble d'éléments en relations mutuelles. Cette approche s'appuie sur les découvertes réalisées dans les autres disciplines : cybernétique et théorie de l'information, biologie, linguistique, anthropologie...

A ce titre il n'y a pas de science plus directement informative sur la durabilité que le sont la thermodynamique ou l'économie. Ces deux disciplines partagent la préoccupation de comprendre la notion d'efficacité, notion qui est essentielle à de nombreuses interprétations de la durabilité (Seager, 2009).

Mais à ces deux disciplines, il faut ajouter les disciplines en relation avec le type de système étudié comme entre autres l'écologie, la physique ou la sociologie par exemple. C'est une approche transdisciplinaire allant donc au-delà des différentes disciplines impliquées qu'il faut promouvoir pour proposer des méthodes originales et adaptées à la problématique du développement durable des systèmes anthropiques.

L'écologie industrielle qui est associée à l'économie circulaire, est couramment perçue par les milieux économiques comme un modèle écologiquement durable de gestion des zones industrialisées ou logistiques (comme un port par exemple). Observons qu'il existe une certaine confusion entre les notions d'écologie industrielle, d'écoconception ou d'économie circulaire entre autres. Ainsi pour l'ADEME, l'écologie industrielle est l'un des nombreux piliers pour construire une économie circulaire, parmi l'écoconception ou le produit en tant que service.

D'après une analyse bibliométrique conduite en 2020 (Saidani *et al.*, 2020), il semblerait que l'intérêt à l'économie circulaire gagne en popularité au niveau des chercheurs et se supplée à l'écologie industrielle avec près de 2000 publications par an en 2019 contre un peu moins de 1000 pour l'écologie industrielle et environ 300 publications qui associe les deux mots clés. Si le nombre de publications scientifiques annuelles relevant de l'écologie industrielle est quasiment constant, depuis une décennie le nombre de publications relevant de l'économie circulaire est lui en progression très forte.

L'économie circulaire n'est pas, dans une large mesure, une idée nouvelle. Les racines du concept peuvent être attribuées à des concepts et domaines d'études antérieurs, notamment l'écologie industrielle et la symbiose industrielle, mais aussi le « cradle to cradle »<sup>6</sup>, la conception régénérative et l'écoconception, la production plus propre, la gestion du cycle de vie, l'économie écologique, l'économie de la performance, la gestion zéro déchet et l'économie du partage (Cecchin *et al.*, 2021).

A partir de 172 définitions de l'économie circulaire émises entre 2005 et 2022, il est proposé d'étendre le cadre des 4R (Réduire, Réutiliser, Récupérer et Recycler) en incluant une approche de conception pertinente et en intégrant des considérations de qualité environnementale et d'harmonie sociale (Alizadeh *et al.*, 2023). On retrouverait ainsi dans cette définition les trois piliers du développement durable : l'environnement, l'économie et le social.

Dans un système économique en boucle fermée (économie circulaire), les activités de fonctions et services sont obligatoirement connectés au lieu d'être séparés les uns des autres.

---

<sup>6</sup> Au début des années 1980, les responsables politiques impliqués dans les politiques de gestion des déchets ont avancé l'idée d'une responsabilité des produits « du berceau à la tombe ». Walter Stahel a alors signifié que « du berceau à la tombe » n'était qu'une simple amélioration marketing pour les fossoyeurs, car elle repose toujours sur des solutions en bout de chaîne, et il a insisté sur le fait que la véritable solution durable était d'utiliser des biens durables dans une économie en boucle « du berceau au berceau » (cradle to cradle) afin d'éviter le gaspillage.

Cela signifie que si une activité manufacturière génère également des sous-produits et des déchets, outre le produit principal, les sous-produits et les déchets doivent être traités et réutilisés par d'autres unités pour éviter ou du moins réduire considérablement le volume de pollution rejeté dans l'environnement.

Il est important de retenir qu'au-delà des mots et des définitions pour des concepts émergents comme l'écologie industrielle et l'économie circulaire, c'est l'objectif commun qui est essentiel et qui est celui du développement durable.

Nous considérons dans cet ouvrage que l'écologie industrielle fait partie intégrante de l'économie circulaire.

Les démarches courantes en écologie industrielle se concentrent sur :

- des études de flux de matières et d'énergie
- une dématérialisation et décarbonation
- un changement technologique et innovation
- une planification, conception et évaluation du cycle de vie
- une conception pour l'environnement
- une responsabilité élargie du producteur
- une politique environnementale orientée produit
- une éco-efficacité
- une symbiose industrielle

Mais il convient de bien définir le périmètre de ces démarches et donc la pertinence du niveau considéré.

En écologie industrielle il faut donc considérer qu'au lieu de systèmes de processus industriels linéaires (dits en boucle ouverte), il existe un système circulaire, dit en boucle fermée avec de nombreuses rétroactions et avec des éléments de processus qui s'influencent les uns les autres.

Selon une approche économique traditionnelle, dans un système en organisation ouverte et linéaire, les investissements en ressources et en capital transitent par la production pour devenir les principaux produits et déchets, et cela ne poserait aucun problème, puisque le système de production, le système technologique et, fondamentalement, l'ensemble de l'économie seraient séparés des systèmes sociaux et environnementaux, autrement dit, de la biosphère.

Tandis qu'en écologie industrielle les processus sont circulaires du fait que la société, sa technologie et ses systèmes industriels sont des sous-systèmes de la biosphère, et donc intégrés dans celle-ci.

La réalité et les faits donnent raison à l'approche économique circulaire, toutefois cette réalité de circularité et d'interactions avec l'environnement et donc avec la biosphère, n'est pas toujours perceptible dans le temps et/ou l'espace, selon le niveau choisi pour la caractérisation du système tant que les ressources (matières et énergie) sont perçues comme « infinies ». Ceci expliquerait pourquoi l'approche traditionnelle linéaire a été longtemps dominante et que l'approche circulaire doit s'imposer aujourd'hui à la vue des effets produits par un développement économique déconnecté de l'environnement et des réalités sociales.

Par conséquent, la conceptualisation d'une circularité écologiquement durable doit commencer par l'appréciation des limites biophysiques et thermodynamiques (Wiedenhofer et al, 2023).

Notons qu'avec une approche thermodynamique, il peut être perçu même à petite échelle, de faibles efficacités énergétiques et/ou de fortes dissipations d'énergie donc non garanties de la durabilité du système étudié. On peut ainsi prévoir les effets aux niveaux supérieurs car ils constituent l'environnement du niveau étudié. Ce « simple » niveau peut être celui d'un processus, d'une usine ou d'un parc industriel par exemple.

Pour illustrer un écosystème industriel, prenons l'exemple de celui de l'activité portuaire qui a l'avantage d'être territorialement bien définie.

### **1.2.1.2 Exemple d'un développement d'écosystème industriel : Les ports**

Les données de cet exemple sont issues d'un rapport Interreg de 2018 dans le cadre du programme Européen DAPHNE : *Best practice examples regarding industrial ecology*. En voici les principales conclusions résumées dans les paragraphes suivants.

Le port de Duisbourg situé en Rhénanie du nord (Allemagne) au confluent de la Ruhr et du Rhin, a développé ses infrastructures avec la perspective de s'adapter au changement climatique et de réduire les impacts du changement climatique au niveau local.

Par exemple, les mesures suivantes ont été prises pour atteindre l'objectif de durabilité :

- Des installations photovoltaïques sont réalisées.
- Des arbres et des buissons sont plantés pour avoir un effet rafraîchissant sur l'environnement et « filtrer » les polluants.
- Les fonctions portuaires écologiquement durables telles que : la protection de la qualité de l'eau, l'élimination des déchets et des eaux usées, l'utilisation économique des matières premières, la réduction des polluants de toutes sortes et la gestion moderne des déchets, sont mises en relation les unes aux autres.

Le port d'Anvers dans la région flamande de Belgique situé au bord de l'Escaut, a intégré la durabilité comme moyen de réduire son impact à la fois sur la société et sur l'environnement et en créant plus de prospérité et de croissance convaincu que les entreprises durables sont les plus efficaces. En tant que deuxième port à conteneurs d'Europe, son impact environnemental est important, c'est pourquoi il promeut tous les aspects de l'écologie industrielle, comme les modèles de partage par exemple, afin qu'il y ait plus d'espaces disponibles pour que les partenaires puissent bénéficier les uns des autres et attirer de nouveaux investissements.

Dans le cas d'Anvers, la collectivité qui gère le port a publié l'engagement du port à fonctionner de la manière la plus durable possible et à contribuer aux 17 objectifs de développement durable des Nations Unies. Pour ce faire, il y aura l'utilisation de la chaleur fatale en chauffage, la transformation des déchets de copeaux de bois en biomasse et les partenaires recycleront donc mutuellement leurs produits ainsi que leurs déchets.

Le port d'Ennschafen sur les rives du Danube en Autriche, a investi dans la réduction du bruit, le contrôle de la qualité de l'eau et maintient un service de chauffage urbain basé sur le traitement de la biomasse et la réutilisation des déchets. Dans le cadre d'un projet appelé centres logistiques S-PARCS, le port d'Ennschafen améliore ainsi son efficacité énergétique et réduit ses émissions. Cet objectif est également soutenu par les terminaux GNL du port qui servent aux véhicules un carburant plus respectueux de l'environnement.

Le port de Vienne en Autriche joue un rôle principal dans l'établissement d'une écologie industrielle dans les ports du Danube. Grâce à la coopération avec des instituts de R&D et la ville de Vienne, le port investit dans la logistique verte, la production d'énergie renouvelable et la réduction de la consommation d'énergie et des déchets, en installant des éoliennes et des centrales hydroélectriques et en fournissant les conditions d'importation, de stockage et de transbordement de la biomasse à des fins énergétiques.

Baja, l'un des plus grands ports publics de Hongrie et situé en rive du Danube, a réalisé le premier investissement dans un port « vert » de ce pays. En tant qu'élément important d'un modèle économique circulaire durable, le port de Baja permet aux navires de déposer leurs déchets, cales, barils de pétrole, etc. de manière écologiquement responsable et sûre.

Ce port public de Baja et les entreprises de services logistiques installées dans le port prévoient également de coopérer avec la municipalité, les stations d'épuration et les centrales thermiques en termes d'investissement dans l'approvisionnement en énergies renouvelables.

Nous observons par ces exemples de gestion de zones portuaires, diverses stratégies et solutions pour atteindre la durabilité grâce aux partages des ressources avec une circularité variable. Certaines de ces stratégies peuvent d'ailleurs apparaître plus ou moins pertinentes et/ou contraignantes.

Dans cet exemple des ports, le territoire est assez bien défini et limité, ce qui n'est pas toujours aisé à faire du fait de la complexité des écosystèmes considérés. Il est donc essentiel de bien définir le territoire considéré pour bien en caractériser le fonctionnement écosystémique et aussi son impact sur son environnement pour une approche plus globale.

## **1.2.2 Écologie territoriale et relations territoriales**

### **1.2.2.1 Définir un territoire et les relations en son sein**

Le terme territoire est polysémique<sup>7</sup> : il renvoie à des significations variées qui dépendent à la fois de l'angle d'approche, des disciplines impliquées et de l'époque.

Dans le domaine scientifique et technique, le fait d'utiliser des termes pouvant présenter plusieurs sens est le plus souvent une source de confusions et d'ambiguïté.

---

<sup>7</sup> Propriété d'un terme qui présente plusieurs sens. Les mots les plus fréquemment utilisés sont le plus souvent polysémiques. En revanche, la monosémie caractérise surtout les vocabulaires scientifiques et techniques.

Ainsi en anglais, le terme territoire désigne soit le territoire de l'État (selon un sens juridico-politique) soit le territoire approprié par un animal ou un groupe d'animaux (selon un sens éthologique).

Aussi c'est ce double sens que nous privilégions dans cet ouvrage en l'accolant à écologie territoriale ou écosystèmes territoriaux car il illustre bien la dualité et la complémentarité entre l'économie et l'écologie dans le cas de l'EIT.

Le territoire est donc un élément clé de la constitution d'un écosystème quel qu'il soit.

Les géographes, les économistes, les politiques et les écologues en ont-ils la même perception ?

Pour répondre à cette question, il convient de savoir si on peut ou si on doit dissocier pour cet espace, un territoire « physique » d'un territoire « relationnel ».

Dans le cas d'une approche de type relationnelle, dans un mémento publié en 2015<sup>8</sup>, il est dit que les « Pays »<sup>9</sup>, les Pôles territoriaux et les Clusters qui sont des structures socio-économiques ont une philosophie commune axée sur la collaboration, la mutualisation et l'innovation.

On voit dans cette affirmation une analogie avec les écosystèmes naturels où les relations entre espèces font apparaître des notions similaires à celles utilisées par les économistes, les sociologues et les décideurs politiques pour décrire les relations entre les composantes d'un écosystème de type socio-économique. Il suffit pour cela de remplacer le terme désignant l'espèce dans un écosystème par le terme désignant l'agent socio-économique correspondant dans un EIT : industrie, ville, ...

Par exemple, l'organisation en réseaux économiques comme les clusters<sup>10</sup> qui sont des concentrations géographiques d'entreprises et d'institutions interconnectées au sein d'un même secteur, impliquent des liens et des synergies entre les différents acteurs entraînant à la fois de la coopération et de la concurrence de façon analogue à un écosystème naturel.

Intéressons-nous justement aux diverses relations existantes entre les espèces d'un écosystème naturel.

Prenons le cas des relations observées en écologie pour deux espèces naturelles (A et B) (Tableau 1).

---

<sup>8</sup> ANPP, 2017 : <http://franceclusters.fr/wp-content/uploads/2017/04/memento2-WEB.pdf> .

<sup>9</sup> Dans la loi française du 4 février 1995, le Pays est défini comme un espace intermédiaire entre le canton et le département et correspond à un concept d'aménagement et de développement des territoires.

<sup>10</sup> Par cluster, nous entendons aussi : « réseau d'affaires », « écosystème d'affaires », « grappe industrielle », « district industriel », « pôle de compétitivité », « pôles de croissance », « technopôle », ...

Tableau 1 : Relations possibles inter-espèces dans un écosystème naturel :  
Cas de 2 espèces A et B.

	Espèce A	Espèce B
Compétition	-	-
Prédation	+	-
Parasitisme	+	-
Symbiose	+	+
Mutualisme	+	+
Commensalisme	+	0
Neutralisme	0	0

Les + et - illustrent le type de relation suivant un effet favorable ou défavorable et les 0 l'absence d'influence.

Nous caractérisons ainsi sept types de relations positives, négatives ou neutres, observées.

Précisons ces différentes formes de relations inter-espèces observées dans un écosystème naturel.

- La **compétition** est une relation entre des espèces (relation interspécifique) ou entre individus d'une même espèce (relation intraspécifique) qui ont besoin des mêmes ressources (nourriture, eau, territoire, etc.). L'une des espèces, généralement celle qui est la plus adaptée aux conditions du milieu, tirera profit des ressources disponibles dans le milieu au détriment des autres espèces.
- La **prédation** est une relation dans laquelle une espèce (le prédateur) en consomme une autre (la proie). C'est la relation de base d'une chaîne trophique (chaîne alimentaire).
- Le **parasitisme** est une relation où une espèce (le parasite) profite d'une autre espèce (l'hôte) en lui étant nuisible. À la différence du prédateur, le parasite ne tue pas son hôte, car sa survie en dépend. Cependant, il peut l'affaiblir ou entraîner des maladies qui pourraient lui être tout de même fatales à terme.
- Le **mutualisme** est une relation de coopération, où deux espèces retirent un avantage qui peut être lié à la protection, au déplacement ou à l'alimentation. Cependant, cette relation n'est pas essentielle à la survie des deux espèces. C'est une relation que l'on qualifiera opportuniste. La pollinisation des plantes par les insectes est un exemple de coopération comme aussi les poissons nettoyeurs de la bouche et des branchies d'autres poissons.
- La **symbiose** est une relation où la survie de deux espèces dépend de leur association. Le lichen, association d'un champignon et d'une algue, est une parfaite illustration de cette notion de symbiose et qui permet à cet « ensemble » de vivre dans des milieux où chacune des deux espèces si elle était seule ne pourrait vivre.

Nous pouvons aussi indiquer le mycorhize qui est une symbiose entre un champignon et un végétal (cette symbiose concerne plus de 80% des plantes terrestres). Cette association durable permet à la plante une amélioration de sa nutrition hydrique et minérale et une augmentation de la résistance aux pathogènes, le champignon recevant de la plante les produits issus de la photosynthèse (sucres). Cette mycorhization serait même à l'origine des écosystèmes terrestres actuels.

– Le **commensalisme** est une relation entre deux espèces, mais pour laquelle une seule d'entre elles (le commensal) retire des bénéfices. L'autre espèce (l'hôte) ne subit toutefois aucun dommage et n'en retire aucun avantage. Dans le cas de ce type de relation, il est important de noter que la présence ou l'absence du commensal ne change absolument rien à la vie de l'hôte. Les plantes épiphytes comme les orchidées illustrent ce type de relation. Toutefois il peut exister une incertitude sur un strict commensalisme et un parasitisme très faible ou un mutualisme et une symbiose peu marqués.

– Le **neutralisme** correspond à une absence de relation entre deux espèces cohabitant dans un même territoire.

Notons que ces relations peuvent être provisoires donc limitées dans le temps. Nous pouvons alors également admettre qu'il peut exister parfois un continuum entre différents types de relations établis entre les espèces dans un écosystème et en particulier pour des relations difficilement caractérisables.

### 1.2.2.2 Évolution des relations au sein d'un territoire et criticité auto-organisée

#### 1.2.2.2.1 Relations territoriales

Pour illustrer l'analogie de l'EIT avec les systèmes vivants et la notion d'évolution, prenons l'exemple du mécanisme d'innovation en industrie.

Cette analogie de l'évolution est illustrée par un schéma montrant le parcours des systèmes économiques de coopération depuis le début de l'ère industrielle jusqu'à aujourd'hui (Figure 1).

Toutefois il ne faut pas croire que l'évolution naturelle est un phénomène linéaire et continu pour le passage d'un état de développement à un autre et de nature entièrement déterministe.

Cela est d'autant plus vrai quand on observe cette évolution en fonction du temps.

Une observation temporelle montre en effet que l'évolution n'est pas un processus continu<sup>11</sup> et que la part du hasard semble jouer un rôle important et cela d'autant plus que le système est complexe.

---

<sup>11</sup> En étudiant les fossiles présents dans les couches de sédiments, les géologues ont découvert que plusieurs couches accumulées au cours du temps ne contenaient quasiment aucune trace de vie fossilisée. Elles correspondent à des périodes d'extinction en masse des espèces vivantes présentes alors sur la planète. On peut distinguer ainsi 5 périodes d'extinction massive de la vie au cours des 600 derniers millions d'années. La plus importante serait celle correspondante à la

Ainsi le système peut évoluer brutalement selon une nouvelle direction non prédite à un certain moment (point de bifurcation). On parle alors de criticité (ou criticalité) auto-organisée qui est typiquement observée dans des systèmes thermodynamiques hors équilibre possédant de nombreux degrés de liberté et des dynamiques fortement non-linéaires autrement dit, les systèmes complexes.

Le système complexe est dans un état critique auto organisé selon des forces en interactions avec ses constituants. C'est la notion de criticité auto-organisée que nous développerons par la suite (cf. 4.1.2).

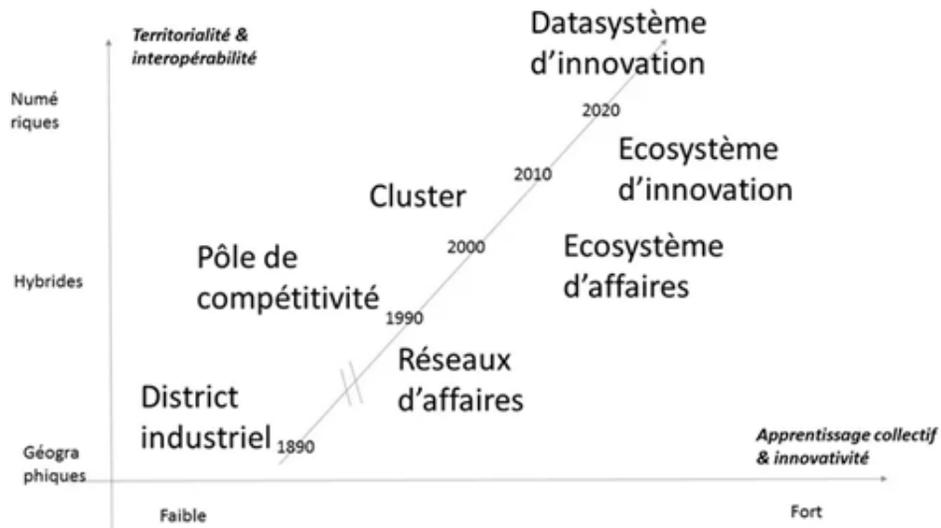


Figure 1: Représentation des systèmes économiques coopératifs.

Issue de : ORUEZABALA Gwenaëlle, « Des écosystèmes d'affaires aux écosystèmes d'innovation », <https://theconversation.com/des-ecosystemes-daffaires-aux-ecosystemes-dinnovation-75329>. Crédits Creative Commons.

### 1.2.2.3 Définir les limites d'un territoire : logique binaire et logique floue

Quelle que soit l'approche considérée, géographique, économique, écologique, thermodynamique, ..., un territoire implique l'existence de frontières ou de limites.

La détermination de ces limites et frontières structurelles n'est pas aisée et n'est pas neutre.

---

fin du Permien il y a -245 millions d'années c'est à dire à la fin de l'ère primaire où plus de 90% des espèces auraient disparues. La plus connue et dernière en date correspond à l'extinction des dinosaures à la fin du crétacé il y a -65 millions d'années avec environ 75% d'espèces disparues.

L'usage le plus courant est que cette définition des limites est faite par l'observateur lui-même selon des critères plus ou moins subjectifs ce qui rend parfois difficile la comparaison entre diverses situations.

Une base possible pour cette détermination est de considérer que le territoire est un ensemble homogène pour des paramètres choisis et que la frontière est une rupture de cette homogénéité et/ou une interface d'échanges. A l'interface, la rupture de l'homogénéité peut être brusque ou progressive (notion de gradient) en fonction de la perméabilité de la limite vue comme une barrière et des mécanismes de transfert (diffusion, transport, sélection, ...).

Mais du fait du grand nombre de paramètres à prendre en compte, il sera difficile d'obtenir l'homogénéité parfaite (totale), il faudra donc définir un ensemble de paramètres à prendre en compte et les conditions de « voisinage » révélant alors la rupture de l'homogénéité avec l'existence de gradients importants et d'échanges caractérisés.

On peut aussi voir le territoire comme un ensemble, au sens mathématique du terme, donc une collection « d'objets » ayant une propriété commune comme en mathématiques l'ensemble des nombres premiers qui ne sont divisibles que par 1 ou eux-mêmes. L'environnement (l'extérieur) sera constitué de tout ce qui n'appartient pas à l'ensemble considéré mais avec qui l'ensemble défini pourra établir des relations.

Une distinction plus subtile peut être faite en considérant que le système est un ensemble fini et l'extérieur un ensemble infini<sup>12</sup> (non dénombrable) comme cela est fait en physique statistique où la limite thermodynamique correspond à la limite mathématique où une grandeur extensive, par exemple le nombre de particules  $N$  du système, tend vers l'infini. Donc selon cette dernière subtilité, un système est un ensemble dénombrable ou identifiable.

Nous reprendrons ces notions dans la partie consacrée à l'approche thermodynamique.

Pour compliquer la situation, basiquement il est appliquée une approche binaire (ou Booléenne) pour la condition d'appartenance au territoire, de type : appartient ou n'appartient pas (vrai ou faux, 0 ou 1).

Ainsi nous définissons le territoire (ou le système) par ce qui appartient à l'ensemble défini et son environnement par ce qui n'appartient donc pas à cet ensemble défini (soit l'extérieur). La frontière physique ainsi définie constitue l'interface entre le système et son environnement au travers de laquelle auront lieu des échanges.

Mais la réalité fait parfois que ce serait plutôt la notion d'appartient plus ou moins (degré d'appartenance défini entre 0 et 1) à l'ensemble défini ou à l'environnement donc l'application d'une logique floue<sup>13</sup>.

---

<sup>12</sup> Il pourrait être fini mais d'une telle taille qu'il est impossible d'en calculer ses éléments à un instant  $t$ . En thermodynamique par exemple, on peut considérer qu'à partir d'une certaine taille de l'environnement, les échanges avec le système considéré sont négligeables car ils n'influencent pas globalement les caractéristiques de l'environnement.

<sup>13</sup> Au lieu d'appartenir à l'ensemble « vrai » ou à l'ensemble « faux » de la logique binaire traditionnelle, la logique floue admet des degrés d'appartenance à un ensemble donné.

#### **1.2.2.4 Définir un territoire : choix de l'échelle ou étude multi-échelle**

On ne peut s'affranchir du problème du choix de l'échelle pour définir les limites du territoire considéré. Cela est primordial pour l'analyse des échanges de matières, d'énergie et d'informations.

Classiquement, on définit trois niveaux pour étudier les écosystèmes industriels et territoriaux<sup>14</sup> :

- Micro : qui correspondrait à un site industriel ou une unité de production, à un quartier urbain ou un village.
- Méso : qui correspondrait, à une agglomération ou ville, à un éco-site.
- Macro : qui correspondrait à un pays (état) ou une région.

A chaque échelle, une thématique peut être privilégiée (Ayres et Ayres, 2002) comme par exemple la symbiose industrielle au niveau d'un parc industriel (échelle micro) ou le développement de circuits courts pour les relations production-consommation à l'échelle méso.

Mais la pertinence serait de faire des analyses multi-échelle (ou multiscalaire) pour avoir une vision globale des divers échanges et établir des bilans les plus complets possibles.

Cette problématique est bien développée pour l'étude des systèmes naturels même si souvent les études relèvent de choix arbitraires sans réelle cohérence.

Certains chercheurs préconisent d'ailleurs que plutôt que de se focaliser sur l'importance potentielle de l'échelle par une conception d'étude arbitraire, il serait préférable d'orienter entièrement les efforts de l'analyse à une seule échelle jusqu'à ce qu'une justification plus éclairée pour une étude à plusieurs échelles puisse être générée.

De même il faudrait clarifier exactement pourquoi plusieurs échelles d'observation sont utilisées : cela devrait toujours être pour améliorer les capacités de prévisibilité inter-échelles, et pour déterminer à quelles échelles certains processus sont pertinents et entre quelles échelles sont constaté des ruptures dans ces processus. Pour ce faire, il faut toutefois un échantillonnage cohérent de variables indépendantes similaires sur les différentes échelles d'observation (Wheatley et Johnson 2009).

#### **1.2.3 L'écologie territoriale, un socio-écosystème**

A ces dimensions d'ordre écologique, thermodynamique et économique et qui correspondent à deux des piliers du développement durable (l'environnement et l'économie), il convient d'ajouter la dimension sociétale pour mieux prendre en compte les communautés humaines dans l'EIT.

Ainsi un nouveau domaine interdisciplinaire se développe actuellement et tout particulièrement en France : l'écologie territoriale.

---

Le degré d'appartenance à un ensemble flou est matérialisé par un nombre compris entre 0 et 1 appelé facteur d'appartenance.

<sup>14</sup> Quelques auteurs définissent un 4<sup>ème</sup> niveau, l'échelle nano, en se référant à une industrie et les consommateurs de ses produits.

Basée sur l'analyse du métabolisme des sociétés humaines à l'échelle locale, elle permet de diagnostiquer un socio-écosystème présent dans un territoire.

Ce diagnostic ne se base pas seulement sur ce qui circule, mais aussi sur la manière dont il s'organise et pourquoi (Buclet, 2021).

Une définition complémentaire fait apparaître la notion de métabolisme territorial. Cette définition dit que l'écologie territoriale permet de caractériser les régimes socioécologiques locaux, dont l'expression est le métabolisme territorial, c'est à dire l'ensemble des flux d'énergie et de matières mis en jeu par le fonctionnement des sociétés humaines ; elle contribue par-là aux discussions sur la transition socioécologique (Barles, 2017). Il conviendrait d'ajouter au métabolisme territorial, la structuration et les flux liés à l'information.

L'objectif d'associer l'écologie industrielle et l'écologie territoriale en une écologie industrielle et territoriale est de faire comprendre que les écosystèmes industriels et territoriaux doivent être inspirés des écosystèmes naturels pour qu'à l'instar de ces derniers ils acquièrent les propriétés d'efficacité et de robustesse voire de résilience, présentes dans les écosystèmes naturels et correspondantes à un développement soutenable.

Pour clarifier le texte, nous désignerons dès maintenant par EITn les écosystèmes industriels et territoriaux (EITi au singulier) et par EIT l'écologie industrielle et territoriale.

### **1.3 Définitions d'écosystème, de la Nature et du naturel**

Il convient en premier lieu de définir la notion d'écosystème et d'écosystème naturel ou système écologique si l'on veut développer une approche bio-inspirée en EIT.

Un dictionnaire comme le Larousse nous dit qu'un écosystème :

- En écologie, est un système formé par un environnement (biotope) et par l'ensemble des espèces (biocénose) qui y vivent, s'y nourrissent et s'y reproduisent.

- En économie, est une organisation structurée (d'un secteur d'activité par exemple) dans laquelle les différents acteurs (entreprises, fournisseurs, institutions, etc.) sont reliés par un maillage fort, leur permettant d'interagir efficacement.

D'une façon générale, dans le langage courant le terme écosystème désigne un milieu organisé. Écosystème est donc un terme générique pour désigner tout système organisé ou structuré et dont les composantes sont liées par des échanges de diverses natures formant un ensemble délimitable dans un espace.

Notons toutefois que les écosystèmes n'ont pas toujours des limites physiques (matérielles) bien définies comme nous l'avons évoqué dans le cas des territoires (cf.1.2.2.3). L'une des conditions de formation d'un écosystème naturel ou système écologique est l'interaction entre la biocénose et le biotope avec échanges d'énergie, de matières et d'informations, ce qui permet le maintien et le développement de la vie au sein de l'écosystème. On peut donc comme nous l'avons déjà indiqué et par analogie associer un écosystème industriel ou territorial à un écosystème naturel.

Le concept de naturel est également à préciser et pour cela il nous faut définir ce qu'est la Nature et le naturel. Comment définir la nature et le naturel est une problématique complexe. La Nature et le naturel sont des concepts philosophiques voire culturels qui ont été abordés de différentes manières au cours du temps et de l'évolution des connaissances.

Voici quelques définitions possibles pour chacun :

#### *La Nature*

- Sens général : La nature désigne tout ce qui existe indépendamment de l'intervention humaine. Elle englobe l'ensemble de l'univers, y compris les êtres vivants, les éléments physiques comme les montagnes, les rivières, l'atmosphère, ainsi que les lois naturelles qui régissent ces éléments.
- Sens biologique : La nature peut se référer spécifiquement au monde vivant, y compris les plantes, les animaux, les écosystèmes, et les processus biologiques comme la reproduction, la croissance, et l'évolution.
- Sens philosophique : Dans la philosophie, la nature peut être vue comme l'essence ou la substance d'une chose, ce qui la définit intrinsèquement. Aristote, par exemple, considèrerait la nature comme ce qui est à l'origine du mouvement et du changement dans les êtres.
- Sens culturel : Parfois, la nature est opposée à la culture. Dans ce contexte, la nature représente ce qui est donné, spontané, ou originel, tandis que la culture représente ce qui est construit, modifié, ou artificiel.

#### *Le Naturel*

- Sens étymologique : Le terme naturel vient du latin *naturalis*, qui signifie qui appartient à la nature. Il évoque ce qui est conforme à la nature ou ce qui est spontané.
- Caractère non artificiel : Le naturel renvoie souvent à ce qui n'a pas été modifié ou transformé par l'homme. Par exemple, un paysage naturel est un paysage qui n'a pas été altéré par des constructions humaines.
- Authenticité : Le naturel peut également désigner ce qui est authentique, vrai, ou non feint. Lorsqu'on dit d'une personne qu'elle est naturelle, on veut dire qu'elle est sincère, qu'elle ne joue pas un rôle ou ne cherche pas à dissimuler sa véritable nature.
- Normativité : Parfois, le naturel est utilisé de manière normative pour désigner ce qui est jugé normal ou conforme à une certaine vision de la Nature. Par exemple, certains discours moraux ou éthiques peuvent invoquer le naturel pour justifier des comportements ou des valeurs spécifiques.

#### *Relations entre nature et naturel*

- Interdépendance : La notion de "naturel" dépend de la façon dont on définit la "nature". Si l'on considère la nature comme tout ce qui existe sans intervention humaine, alors le "naturel" est ce qui est en accord avec cette nature.
- Débats philosophiques : La frontière entre ce qui est "naturel" et ce qui ne l'est pas est souvent floue et fait l'objet de nombreux débats, surtout à l'ère moderne où les technologies humaines (comme la modification génétique) remettent en question les distinctions traditionnelles entre naturel et artificiel.

Ces définitions ne sont pas exhaustives et varient en fonction des contextes, des disciplines (philosophie, science, éthique, etc.), et des perspectives culturelles. Dans certaines cultures, le mot nature n'existe pas mais il existe alors de nombreux autres mot pour désigner là où vit l'humain et ce qui l'entoure en reconnaissant que l'humain n'est qu'une partie du vivant. La nature ne serait qu'un concept défini au cours du moyen-âge dans la société occidentale pour désigner tout ce qui n'est pas humain et définissant alors un espace extérieur exploitable (Descola et Pignocchi, 2022).

Nous définirons dans cet ouvrage par écosystème naturel, des écosystèmes à anthropisation non-dominante.

Les écosystèmes industriels et territoriaux sont des écosystèmes à très forte anthropisation et parfois à haute spécificité (cas des écosystèmes industriels).

Le terme système écologique pourra être utilisé pour désigner une communauté biologique composée de tous les organismes vivants en intégrant les humains, dans une zone particulière et des composants non vivants, tels que l'air, l'eau et le sol minéral, avec lesquels les organismes interagissent. Nous rejoignons ici la définition d'un système écologique émise par l'Agence Américaine de l'Environnement<sup>15</sup>.

Enfin, nous intégrons dans les écosystèmes territoriaux, les écosystèmes urbains.

### 1.3.1 Services écosystémiques

Un écosystème industriel ou territorial bioinspiré doit pouvoir offrir des services écosystémiques similaires ou se rapprochant de ceux des écosystèmes « naturels ».

Les services écosystémiques (SE) sont les conditions et les processus par lesquels les écosystèmes (de toutes natures) et la biodiversité qui les constitue soutiennent et épanouissent la vie humaine.

Cette notion de services correspond à une approche économique et sociale (politique) de la valeur des fonctions des écosystèmes pour le bien-être humain. L'humain a depuis son apparition, prélevé dans son environnement (la Nature) les ressources nécessaires à son alimentation, à sa santé ou à son logement en particulier.

Quatre catégories de services ont été suggérées (Brauman & Dally, 2009) (Tableau 2) :

- premièrement, les « services d'approvisionnement » qui fournissent des biens tels que la nourriture, l'eau douce, le bois et les fibres pour un usage humain direct ;
- deuxièmement, les « services de régulation » qui maintiennent un environnement dans lequel il est possible pour les gens de vivre, offrant des avantages tels que la purification de l'eau, la pollinisation des cultures, le contrôle des inondations et la stabilisation du climat ;
- troisièmement, les « services culturels » qui font du monde un endroit où les gens veulent vivre ; ils comprennent la récréation ainsi que l'inspiration esthétique, intellectuelle et spirituelle ;
- quatrièmement, les « services de soutien » ou de maintenance qui créent la toile de fond des conditions et des processus dont la société dépend plus directement.

---

<sup>15</sup> <https://www.epa.gov/report-environment/ecological-condition>.

Ces services assurent donc la durabilité du fonctionnement des écosystèmes en incluant la production des autres services.

Certains auteurs considèrent que les services de soutien (ou auto-entretien) ne sont pas des services ayant un impact direct sur le bien-être et ne comptabilisent pas cette catégorie comme service écosystémique.

Tous ces services écosystémiques sont fournis par des cycles chimiques, physiques et biologiques complexes, alimentés directement ou indirectement par le Soleil.

Tant que l'écosystème fonctionne normalement (bonne santé) il fournit toute la gamme de services écosystémiques (Costanza, 2012) mais tout dysfonctionnement causé par une ou des perturbations, pourra entraîner une perte plus ou moins partielle de la fourniture de ces services. En termes économiques et politiques, cela correspondra à une dévaluation du système.

Si l'on prend l'exemple d'une forêt, elle représente un espace multifonctionnel en termes de services écosystémiques pour l'humain : production de bois ; espace de loisirs ; réservoir de biodiversité ; fonction de climatisation (par évapotranspiration) et protection de risques naturels (érosion, inondation...). Ces services sont interconnectés et parfois à finalité contradictoire comme la production de bois vis à vis des autres fonctions surtout si cette production est intense.

Toute atteinte au bon fonctionnement de la forêt diminuera la capacité de ses services. Dans une situation extrême de surexploitation de la forêt, il y a une perte totale des services écosystémiques entraînant des conséquences dramatiques pour les populations en dépendant. C'est le cas de l'île de Pâques par exemple dont l'analyse des pollens fossiles a permis de comprendre l'évolution de sa végétation. Au moment de la colonisation de l'île par des polynésiens au XIII<sup>e</sup> siècle, elle était couverte d'une forêt dense composée d'une vingtaine d'espèces arborescentes différentes dont de grands palmiers. Les colons ont surexploité cette ressource de bois et vers la moitié du XVII<sup>e</sup> siècle tous les grands arbres avaient disparus. Les espèces d'arbres de la forêt fournissaient de la nourriture (sève, noix, cœurs de palmiers...) et des matériaux pour l'habitat, les pirogues, les cordes et paniers... La disparition de cette couverture arbustive a rendu le sol plus sensible à l'érosion réduisant alors la fertilité et productivité des sols.

Nous pouvons observer que les services écosystémiques couvrent les trois piliers principaux du développement durable (Tableau 2).

Donc un écosystème industriel et territorial offrant des services écosystémiques correspondants à toutes les catégories s'inscrira dans la démarche du développement durable. Par exemple et plus particulièrement pour un écosystème urbain, la présence d'espaces végétalisés dont des espaces boisés, correspondra aux services de régulation, de soutien et culturels, de même pour la présence de zones humides. Une agriculture urbaine de type hydroponique verticale dans des hangars ou des cultures sur des terrasses correspondra aux services d'approvisionnement.

La présence de capteurs photovoltaïques par exemple relèvera également de ce type de service par analogie avec la photosynthèse convertissant le rayonnement solaire en énergie électrique.

Tableau 2 : Classification et exemples de services écosystémiques.

Catégories de services	Exemples
Services d'approvisionnement	Nourriture : Fruits de mer, cultures agricoles, bétail, épices... Produits pharmaceutiques : Médicaments, précurseurs de produits pharmaceutiques de synthèse... Matériaux durables : fibres naturelles, bois... Énergie : Combustibles issus de la biomasse, eau à faible teneur en sédiments pour l'hydroélectricité... Produits industriels : Cires, huiles, parfums, colorants, latex, caoutchouc...
Services de régulation	Procédés de cyclage et de filtration : Détoxification et décomposition des déchets, génération et renouvellement de la fertilité des sols, purification de l'air et de l'eau... Processus de translocation : dispersion des graines, pollinisation... Processus de stabilisation : Stabilité des chenaux côtiers et fluviaux, contrôle de la majorité des espèces nuisibles potentielles, séquestration du carbone, stabilisation partielle du climat, régulation du cycle hydrologique (atténuation des inondations et des sécheresses), modération des phénomènes météorologiques extrêmes (température et vent) ...
Services culturels	Beauté esthétique, sérénité Opportunités récréatives Inspiration culturelle, intellectuelle et spirituelle
Services de soutien (maintenance)	Préservation des processus sous-jacents aux services dans les classes ci-dessus. Maintien des composants et systèmes écologiques nécessaires à la fourniture future des biens et services ci-dessus et autres en attente de découverte.

Le concept de service écosystémique sert à établir de nouvelles formes de gestion de la biodiversité et de l'environnement globalement, comme les mesures réglementaires en France de compensation écologique dans les plans locaux d'urbanisation (PLU) ou dans la mise place du Zéro Artificialisation Nette (ZAN) pour limiter les surfaces artificialisées et même parfois dans les jugements rendus suite à des délits environnementaux. Toutefois ce concept présente des limites et des critiques. En particulier il manque encore des connaissances de base sur ce concept. Ainsi prédire comment les activités de gestion et l'évolution des conditions futures modifieront les services est rendu plus complexe par les interactions entre plusieurs SE.

Un manque de compréhension de ces interactions peut conduire à des décisions de gestion préjudiciables et donc l'utilisation de différentes approches de modélisation des SE est un sujet de recherche important à développer (Agudelo *et al*, 2020).

Divers auteurs suggèrent également que la mesure de l'incertitude est essentielle pour les utilisateurs potentiels des évaluations de SE car on néglige trop souvent le caractère incertain du fonctionnement des écosystèmes du fait de la complexité de la dynamique des phénomènes naturels.

Par ailleurs c'est un concept très anthropocentré avec une prise en compte limitée des fonctions et des services bénéficiant aux autres composantes que l'humain dans les écosystèmes.

Également ce concept résulte encore d'une vision culturelle du « monde » à dominante occidentale et enfin l'évaluation des services écosystémiques est souvent mise en œuvre via le calcul de leur valeur économique (Vallet in Audoin *et al*, 2021).

### **1.3.2 Comparaison écosystèmes « naturels » et EITn**

Les EITn sont considérés comme des écosystèmes structurellement complexes avec une organisation spatiale très hétérogène et avec une dynamique créée et entretenue par les actions des humains. Nous pouvons établir une comparaison des propriétés respectives des écosystèmes naturels et des EITn (Tableau 3) pour illustrer les analogies et les spécificités.

*Tableau 3 : Comparaison des propriétés et spécificités des écosystèmes et les systèmes EITn.*

Écosystèmes naturels (E)		Écosystèmes industriels et territoriaux (EITn)	
Propriétés de base	Spécificités dérivées	Propriétés de base	Spécificités dérivées
Système ouvert	Variables externes déterminantes pour conditions de E.	Système ouvert	Variables externes déterminantes pour conditions de EIT
Directionnalisé	Croissance et développement Maximisation exergétique (stockage et puissance) Autocatalyse (mutualisme en cycle) Modèle de « taille corporelle »	Directionnalisé	Croissance et développement Principes ?
Connectivité	Composants biotiques et abiotiques interconnectés en réseau Le réseau permet mutualisme et synergie Auto-organisation et auto-régulation	Connectivité	Organisation en réseaux : fluides, transports, communications
Hiérarchie émergente	Organisation hiérarchique en niveaux interactifs	Hiérarchie émergente ?	Organisation +/- hiérarchique en niveaux +/- interactifs
Dynamique complexe	Croissance et développement en matière (biomasse), structuration et information Capacité d'adaptation Capacité de résilience	Dynamique complexe	Croissance et développement en matières, structuration et information Capacité d'adaptation (en développement) Capacité de résilience (en développement)

## Chapitre 2

# Développement durable des écosystèmes

## 2.1 Le développement durable

La notion de développement doit être entendue comme une notion d'évolution et de changement d'états vers des systèmes de plus en plus structurés. Il ne faut donc pas associer obligatoirement le développement à une croissance.

Le concept de développement durable ou soutenable est à préciser.

En effet, il existe diverses définitions de la durabilité et du développement durable. La plus connue est celle de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement de l'ONU<sup>16</sup> qui dit que le développement est durable lorsqu'il « répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Cette définition est celle du rapport de la commission Brundtland en 1986.

Cette définition est simple mais nécessite d'apporter des précisions. En particulier il convient de définir les besoins et de savoir dans quelle mesure l'espèce humaine est capable de discerner l'intérêt de ces (et de ses) besoins pour l'ensemble de la biocénose et d'une manière plus générale de connaître son libre-arbitre décisionnaire au nom de la vie sur Terre.

Le développement durable selon Fath (Fath, 2017) est un concept anthropocentré visant le bien-être humain comme finalité principale comme exprimé par exemple par la définition du développement durable de l'ONU par la commission Brundtland.

Bien que porté par une vision anthropocentrique, cet objectif de bien-être humain ne doit pas être contraire à l'intérêt de l'environnement dans sa globalité. Toute amélioration du bien-être humain doit en effet correspondre au meilleur respect possible de son environnement et par réciprocity un environnement « sain » est donc favorable au bien-être des humains. Nous verrons que thermodynamiquement, l'environnement joue un rôle essentiel pour les systèmes et leur fonctionnement.

Pour être durable, le développement doit concilier trois éléments majeurs :

- L'équité sociale et sociétale : le système doit être **équitable**
- La préservation de l'environnement : le système doit être **vivable**
- L'efficacité et la performance économique : le système doit être **viable**

Si l'on prend l'image d'un tabouret à trois pieds (Figure 2) et que l'on assimile chacun des critères à un pied et la durabilité à la stabilité du tabouret (maintien de l'assiette horizontale), il faut porter la même importance à chacun des 3 critères.

---

<sup>16</sup> <https://sdgs.un.org/>.