



>

EXPERTISE ET SYNTHÈSE



Intégrité des écosystèmes

Approches scientifiques
et implications pratiques



Introduction

Afin de préserver la biodiversité, la Convention sur la diversité biologique (CDB), à travers le cadre mondial de la biodiversité, propose de se préoccuper des écosystèmes, de leur intégrité et de leur résilience. Il s'agit d'assurer la fourniture de services écosystémiques (notamment régulation et approvisionnement), de contributions de la nature aux humains et de maintenir l'intégrité des processus écologiques planétaires.

Dans le cadre mondial de la biodiversité, l'intégrité, la connectivité et la surface des écosystèmes sont étroitement associées. Cela suppose de mieux relier les écosystèmes dits « naturels » et ceux dits « gérés », notamment à des fins d'approvisionnement en biomasse : les uns doivent être maintenus ou restaurés au-delà des aires protégées et la diversité biologique doit être privilégiée dans les autres.

Cela nécessite de savoir qualifier l'état actuel des écosystèmes, d'évaluer leur dégradation, de définir l'état et les conditions vers lesquels tendre (trajectoires souhaitables en fonction des objectifs voire usages souhaités), puis de définir les mesures de gestion (restauration, protection, libre-évolution...) qui permettent d'y parvenir et, le cas échéant, les actions de réparation d'un préjudice écologique associé à la dégradation.

Ce processus se heurte à plusieurs difficultés illustrées par les questions suivantes : qu'est-ce qui définit les composantes d'un écosystème que sont « composition, structure et fonction », et comment les mesurer ? L'intégrité est-elle un état, une propriété émergente ou la capacité d'un écosystème ? Cette notion est-elle suffisamment compréhensible et solide pour baser des politiques de lutte contre l'érosion de la biodiversité ? Comment répondre nationalement à une attente internationale exprimée à travers le cadre mondial de la biodiversité et le règlement européen sur la restauration des écosystèmes ? Que peut apporter la recherche ? Enfin, quels indicateurs utiliser pour mesurer l'état, les progrès accomplis grâce aux mesures prises ?

Les implications pratiques des réponses à apporter peuvent être multiples et antagonistes. Aussi, ces questions doivent être posées dans un cadre dynamique – et évolutif – de la biodiversité. Pour ce faire, modèles et scénarios doivent être mobilisés. Il importe également de prendre en compte les limites de la prédiction, les incertitudes, afin que les acteurs, publics ou privés, puissent englober ces dernières dans leurs décisions.

Cette « Expertise et synthèse » présente d'abord l'intégrité des écosystèmes comme une approche applicable à tous les écosystèmes ; elle discute ensuite cette notion au regard des pressions anthropiques et des changements globaux puis évoque quelques perspectives d'utilisation et limites. Des « Fiches » techniques accompagnent la présentation d'approches de l'intégrité mobilisées dans le cadre mondial de la biodiversité ou de grandes politiques publiques : elles permettent d'en savoir plus sur une définition possible de l'intégrité et des indicateurs associés. Des « Repères » complètent le texte : ils ont vocation à alimenter la réflexion autour de cette notion.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
L'INTÉGRITÉ : UNE APPROCHE APPLICABLE À TOUS LES ÉCOSYSTÈMES	5
1.1. L'intégrité des écosystèmes dans le cadre mondial de la biodiversité	6
1.2. Au croisement de la structure, de la fonction et de la composition des écosystèmes	7
1.3. Une notion associée à la surface, à la connectivité et à la résilience	9
1.4. L'intégrité au sein des écosystèmes (très) anthropisés	10
L'INTÉGRITÉ DES ÉCOSYSTÈMES ET LES PRESSIONS ANTHROPIQUES	15
2.1. Une définition avec ou sans les pressions	16
2.2. L'intégrité des écosystèmes dans le contexte des changements globaux	19
2.3. Entre objectif de gestion et état transitoire	21
2.4. Différentes visions : de la conservation à l'utilisation de la nature	22
PERSPECTIVES ET LIMITES DE LA NOTION D'INTÉGRITÉ DES ÉCOSYSTÈMES	25
3.1. Un cadre utile pour de nombreuses finalités	26
3.2. Les aspects dynamiques et évolutifs peu pris en compte	27
DES FICHES, POUR ALLER PLUS LOIN	
Fiche 1 : L'intégrité des écosystèmes : application aux écosystèmes forestiers	28
Fiche 2 : Une approche combinant structure, fonction et composition à différents niveaux d'organisation du vivant et des mesures de pressions anthropiques	36
Fiche 3 : Une approche basée sur le triptyque « surface », « intégrité » et « risque d'effondrement » des écosystèmes	40
Fiche 4 : Une approche combinant structure et processus à l'échelle des écosystèmes	46
Fiche 5 : Une approche combinant propriétés des écosystèmes et pressions humaines	52
Fiche 6 : L'index de résilience bioclimatique des écosystèmes (Bioclimatic Ecosystem Resilience Index, BERI)	60
DES REPÈRES, POUR OUVRIR LA RÉFLEXION	
Repère 1 : Une approche basée sur la composition des populations d'espèce est-elle un bon indicateur de l'intégrité des écosystèmes ?	62
Repère 2 : L'intégrité écologique peut-elle être reliée au capital naturel pour soutenir la conservation ?	64
Repère 3 : Écosystèmes naturels, gérés... de quoi parle-t-on dans les cadres scientifiques et politiques mondiaux ?	66
Repère 4 : Mesurer la capacité adaptative et évolutive pour en rendre compte en termes d'intégrité des écosystèmes : quelles sont les questions ?	70
BIBLIOGRAPHIE	72
ANNEXES	76



1. L'intégrité :
une approche applicable
à tous les écosystèmes

1.1. L'INTÉGRITÉ DES ÉCOSYSTÈMES DANS LE CADRE MONDIAL DE LA BIODIVERSITÉ

Le cadre mondial de la biodiversité¹, adopté à Montréal par la conférence des Parties de la Convention sur la diversité biologique (CDB) (dit accord de Kunming-Montréal, décembre 2022), pose, dans l'Objectif A de Conservation que « l'intégrité, la connectivité et la résilience de tous les écosystèmes sont maintenues, améliorées ou restaurées, ce qui accroît considérablement la superficie des écosystèmes naturels d'ici à 2050. »

L'intégrité des écosystèmes y est alors définie² sous les termes suivants : « **Un écosystème est généralement considéré comme intègre lorsque ses caractéristiques écologiques dominantes (par exemple, les éléments de composition, la structure, la fonction et les processus écologiques) se produisent dans leurs plages naturelles de variation et peuvent résister et se rétablir de la plupart des perturbations. Les indicateurs de l'intégrité de l'écosystème peuvent inclure la structure, la fonction et la composition d'un écosystème par rapport à la gamme préindustrielle de variation de ces caractéristiques.** »

L'intégrité est ensuite mentionnée dans les cibles 1 et 2, relatives à la réduction des menaces qui pèsent sur la biodiversité *via* la planification spatiale et la restauration, et dans la cible 12, relative à la satisfaction des besoins des populations, notamment en milieu urbain³.

Pour en savoir plus sur les bases de la définition de l'intégrité des écosystèmes dans le cadre mondial, les informations scientifiques et techniques partagées lors des négociations : **Voir : Annexe 1**

Pour un rapide aperçu historique de la notion : **Voir : Annexe 2**



1. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-15/cop-15-dec-04-fr.pdf>

2. Glossaire actualisé (2022) : <https://www.cbd.int/doc/c/e999/4bbe/d981f88c804a1c54f6fc51c8/wg2020-05-04-fr.pdf>

3. Cible 1 : « Veiller à ce que toutes les zones fassent l'objet d'une planification spatiale participative, intégrée et respectueuse de la biodiversité et/ou soient gérées efficacement dans le cadre de processus de changement d'affectation des terres et des mers, afin de réduire la perte de zones de grande importance pour la biodiversité, y compris d'écosystèmes de grande intégrité écologique, à un niveau proche de zéro d'ici à 2030, dans le respect des droits des peuples autochtones et des communautés locales. »

Cible 2 : « Veiller à ce que, d'ici à 2030, au moins 30 % des zones d'écosystèmes terrestres, d'eaux intérieures et d'écosystèmes marins et côtiers dégradés fassent l'objet de mesures de remise en état efficaces, afin d'améliorer la biodiversité, les fonctions et services écosystémiques, ainsi que l'intégrité et la connectivité écologiques. »

Cible 12 : « Augmenter significativement la superficie, la qualité et la connectivité des espaces verts et bleus dans les zones urbaines et densément peuplées, ainsi que l'accès à ces espaces et les avantages qu'ils procurent, en systématisant la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité, en tenant compte de celle-ci dans l'aménagement urbain, en améliorant la biodiversité ainsi que la connectivité et l'intégrité écologiques indigènes, en améliorant la santé et le bien-être des personnes et leur lien avec la nature, ainsi qu'en favorisant une urbanisation durable et inclusive et en soutenant la fourniture de fonctions et de services écosystémiques. »

1.2. AU CROISEMENT DE LA STRUCTURE, LA FONCTION ET DE LA COMPOSITION DES ÉCOSYSTÈMES

La définition de l'intégrité retenue dans le cadre mondial s'ancre dans une publication scientifique qui rappelle que l'état d'un écosystème est caractérisé par trois composantes : sa structure, sa fonction et sa composition (Hansen *et al.*, 2021). Dans ce cadre, structure, fonction et composition y sont définies ainsi :

- La « structure » décrit l'architecture tridimensionnelle de ses composantes biotiques et abiotiques et des mesures courantes liées à la structure de la végétation, au relief, à la configuration spatiale (hauteur de la canopée, variation de l'altitude, fragmentation...).
- La « fonction » englobe les processus écologiques et évolutifs, notamment les perturbations, les flux d'énergie et de matière, les cycles des nutriments - régis par des processus physiques, chimiques et biologiques (recyclage de la matière organique, production primaire de biomasse, flux

d'azote, cycle de l'eau, etc.). Citons également les processus telles que la fertilité des sols, la pédogenèse, la pollinisation, la dispersion des graines...

- La « composition » caractérise les attributs biotiques d'un écosystème, tels que la variation génétique, la richesse ou l'homogénéité des espèces, la diversité phylogénétique, ainsi que les rôles fonctionnels ou les niches occupées par ces espèces.

La structure, la fonction et la composition des écosystèmes varient ainsi dans l'espace, et le temps, en fonction de facteurs contextuels : climat, géologie, topographie, pool régional d'espèces, temps de succession, activités humaines... Si l'on considère une approche emboîtée des niveaux d'organisation du vivant (Noss, 1990), le niveau d'organisation « écosystème » contient les autres et peut en rendre partiellement compte (voir Figure n°1).

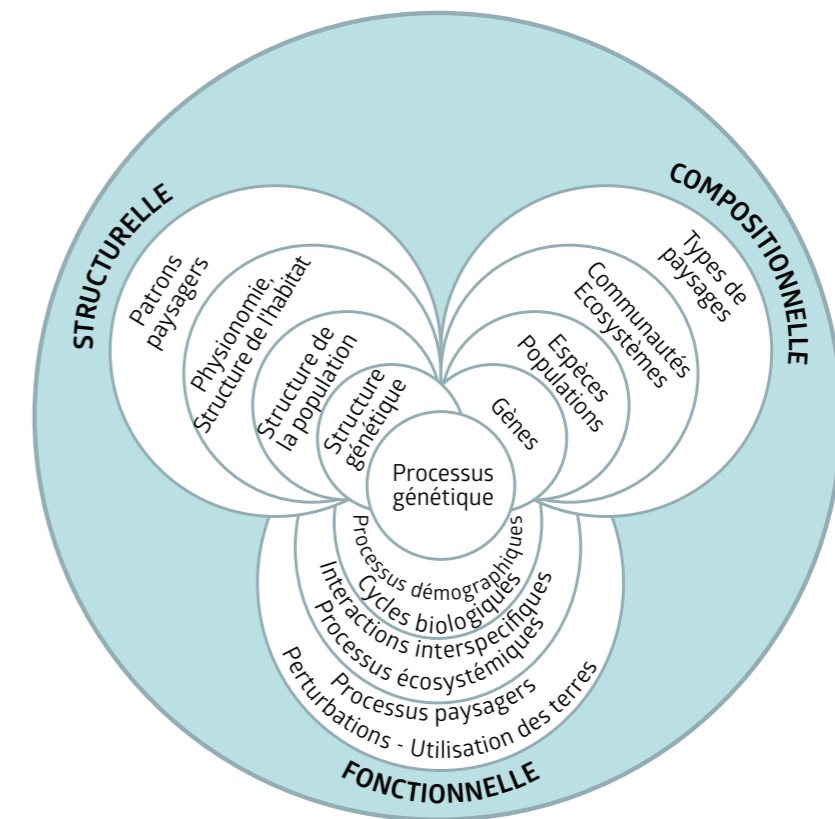


Figure 1 - Approche emboîtée des niveaux d'organisation de la biodiversité avec les composantes « structure », « fonction » et « composition » matérialisées. Par exemple, la composante « structure » permet de décrire la diversité des habitats et des biotopes, de leurs fragments (diversité des strates végétales et forestières, etc.), de leur connectivité ; la composante « fonction » permet de décrire la productivité primaire, le taux d'herbivorie, de contrôle biologique, de pollinisation, le régime de perturbation (fréquence et intensité) ; La composition permet de décrire la diversité, l'abondance et la composition des groupes fonctionnels tels la faune et flore du sol, la végétation, les herbivores, les carnivores, les mutualistes et pathogènes. D'après Noss, 1990.

Pour les auteurs, **l'intégrité des écosystèmes est ici une mesure de l'évolution de la structure, de la fonction et de la composition d'un écosystème par rapport à un état de référence**. Il découle de cette approche que l'état de référence pour évaluer les tendances de l'intégrité des écosystèmes doit être déterminé par l'environnement climato-géophysique prédominant, par une plage de variations naturelles aux limites régies par les perturbations naturelles, les variations climatiques (en reconnaissant toutefois le changement actuel) et la diversité géomorphologique typiques d'une écorégion.

Les auteurs proposent d'appliquer cette définition au suivi et à l'évaluation de l'intégrité des écosystèmes forestiers mondiaux en se basant sur les observations de la Terre par satellite et certaines « variables essentielles de la biodiversité » documentées par un panel de huit indicateurs.



Pour en savoir plus sur cette approche et les indicateurs associés : [Voir : Fiche 1](#)



Une approche basée sur la composition des populations d'espèce est-elle un bon indicateur de l'intégrité des écosystèmes ? [Voir : Repère 1](#)



Dans la même lignée, un groupe de recherche travaille à définir un « Index d'intégrité des écosystèmes terrestres » (*Ecosystem Integrity Index*, EII) ([Hill et al., pre-print, 2022](#)). L'intégrité des écosystèmes y est aussi définie comme **l'amplitude dans laquelle la composition, la structure et la fonction d'un écosystème s'inscrivent au sein de leur gamme naturelle de variation**. L'index d'intégrité des écosystèmes terrestres est ainsi un indicateur de leurs évolutions par rapport à un état de référence. Pour ces auteurs, l'état de référence, ou plutôt les états de références des divers écosystèmes, sont naturels ou potentiels (actuels) peuvent correspondre à ceux de populations de grandes zones protégées (utilisées comme substitut ou proxy), à la différence entre deux zones ou deux périodes, ou encore passer par la modélisation de conditions naturelles.

Cette approche se veut pratique en fournissant des valeurs d'index sous forme de cartes qui combinent un « index de modification humaine » pour la structure, un « index d'intégrité de la biodiversité » pour la composition et une information sur la « productivité primaire nette » pour la fonction.

Elle se veut ainsi mobilisable par les États et leurs politiques publiques destinées à limiter l'altération du vivant, mais aussi par les acteurs du secteur privé pour diminuer leur empreinte écologique. Deux collectifs mondiaux ont notamment exprimé le besoin d'une mesure de l'intégrité des écosystèmes liée au cadre mondial pour la biodiversité, facilement utilisable par les entreprises et les institutions financières pour fixer des objectifs, suivre les évolutions et publier des informations probantes : *le Science Based Targets Network* (SBTN) et *la Task Force for Nature-related financial Disclosure* (TNFD).



Pour en savoir plus sur cette approche et les indicateurs associés : [Voir : Fiche 2](#)



L'intégrité écologique peut-elle être reliée au capital naturel pour soutenir la conservation ? [Voir : Repère 2](#)

1.3. UNE NOTION ASSOCIÉE À LA SURFACE, À LA CONNECTIVITÉ ET À LA RÉSILIENCE

Au sein du cadre mondial de la biodiversité, la notion d'intégrité des écosystèmes est étroitement associée à la surface et à la résilience : dans l'objectif A, il s'agit d'accroître considérablement la superficie des écosystèmes naturels en jouant sur l'intégrité, la connectivité et la résilience ; dans la cible 1, il s'agit de réduire la perte d'écosystèmes de grande intégrité écologique en s'appuyant sur la planification spatiale. Cette association de termes permet de dépasser les considérations uniquement quantitatives et d'éviter les « *paper parks* », aires légalement désignées comme protégées mais peu efficaces pour la conservation et/ou présentant une insuffisance ou une absence de gestion.

Notons toutefois que l'objectif A du cadre adopté met l'accent, dans sa formulation, plus sur l'accroissement surfacique que sur l'intégrité – cela à l'inverse de sa formulation initiale soumise aux négociations : il s'agissait alors d'améliorer l'intégrité des écosystèmes en augmentant superficie et connectivité⁴.

D'autres travaux scientifiques nouent les notions d'intégrité et de surface des écosystèmes à celles de résilience et d'effondrement ([Nicholson et al., 2021](#)). L'intégrité des écosystèmes est alors définie comme le **degré de ressemblance d'un écosystème contemporain à ses états de référence pour la structure, le fonctionnement et la composition – les écosystèmes recouvrant leurs caractéristiques écologiques et propriétés après la plupart des changements environnementaux, des perturbations (dynamiques naturelles ou perturbations anthropiques) sont dits alors « résilients », les autres sont dits « dégradés »** (par rapport à l'état avant la perturbation).

Outre l'intégrité, cette approche articule deux autres notions relatives aux écosystèmes :

- La surface (ou étendue, ou distribution) dont la réduction diminue la diversité des niches écologiques, la disponibilité des ressources, la capacité d'accueil, etc. et affecte, *in fine*, l'intégrité ;
- Le risque d'effondrement⁵ qui confère aux notions de « surface » et « d'intégrité » une dimension prospective et probabiliste et permet d'en repérer les baisses inacceptables, le franchissement de seuil, d'éclairer les priorités de conservation, d'estimer les effets des mesures prises.

Elle s'ancre dans les travaux « liste rouge des écosystèmes »⁶ développés par l'Union internationale de conservation de la nature (UICN) et s'appuie sur la « théorie du changement » pour fournir un cadre aux actions ayant un objectif en faveur des écosystèmes.



Pour en savoir plus sur cette approche et les indicateurs associés : [Voir : Fiche 3](#)

4. Formulation initiale de l'Objectif A : « L'intégrité de tous les écosystèmes est améliorée en augmentant d'au moins 15 % la superficie, la connectivité et l'intégrité des écosystèmes naturels, favorisant la santé et la résilience des populations de toutes les espèces. » Dans le cadre mondial, l'indicateur « superficie » traite essentiellement de types d'occupation des terres sans évaluation de leurs qualités écologiques. L'indicateur « habitats » mesure les changements annuels de la taille d'habitats terrestres appropriés pour des populations d'espèces données (env. 32 000 espèces) et, lorsque possible, de connectivité. Les indicateurs surfaciques sont précieux pour estimer la viabilité et la capacité d'un écosystème à abriter une grande diversité d'espèces, ou des espèces ayant de grands besoins en termes d'habitats. De même, les indicateurs de connectivité sont précieux pour évaluer la capacité d'un écosystème à permettre les échanges (individus, gènes) avec les écosystèmes voisins et donc à maintenir une capacité d'évolution et d'adaptation. La continuité peut être spatiale et temporelle mais aussi culturelle ou économique lorsque les activités humaines sont intégrées dans ce concept.

5. Moment où les écosystèmes perdent leurs caractéristiques.

6. La liste rouge des écosystèmes de l'UICN évalue leur risque relatif d'effondrement et les classe selon des catégories de risque (par ex. « en danger », « vulnérable », etc.) sur la base de cinq critères : perte de superficie ; distribution restreinte ; changement dans l'environnement ou les processus abiotiques ; changement dans les composants et processus biotiques ; estimation quantitative du risque sur la base d'un modèle probabiliste. <https://uicn.fr/lre-france/> - consulté le 5 juillet 2024 – Voir aussi [Keith et al., 2013](#) et <https://iucnrl.org/>

1.4. L'INTÉGRITÉ AU SEIN DES ÉCOSYSTÈMES (TRÈS) ANTHROPISÉS

Le cadre mondial pour la diversité biologique vise, d'ici à 2030, à ce qu'au moins 30 % des zones terrestres, des eaux intérieures, des zones côtières et marines, notamment les zones particulièrement importantes pour la biodiversité et les fonctions et services écosystémiques, soient effectivement conservés et gérés en veillant à ce que toute utilisation durable soit pleinement compatible avec les résultats en matière de conservation. S'il est préconisé de mettre en place des systèmes d'aires protégées pour y parvenir, **les écosystèmes anthropisés ne doivent pas être négligés : espaces de culture, d'élevage, de sylviculture, d'aquaculture, etc., ils représentent des surfaces importantes de transformation des terres, fournissent aux populations des services essentiels, génèrent des pressions fortes (intensification, homogénéisation, pollutions, extension, etc.).** L'intégrité écologique est le plus souvent comprise comme un cadre de conservation de la biodiversité indigène utilisant les variations naturelles ou historiques comme références et mettant l'accent sur les processus écologiques ainsi que les espèces

natives. Ces éléments typiques ne cantonnent pas son application aux espaces protégés : cette notion trouve une partie de son intérêt dans le cadre des écosystèmes (très) anthropisés, et notamment lorsqu'ils sont gérés pour fournir des services d'approvisionnement (écosystèmes productifs).

Une étude récente (Garibaldi *et al.*, 2020) préconise, **pour obtenir un effet positif sur la production, que les habitats natifs atteignent au moins 20 % de la superficie des écosystèmes gérés, notamment agricoles.** Cet objectif présente, outre des avantages pour la sécurité alimentaire, des avantages pour les services de régulations, les diverses contributions de la nature aux humains, la connectivité et l'efficacité des réseaux d'aires protégées – notamment là où elles sont peu nombreuses. Les habitats natifs sont un élément clé des stratégies de gestion des paysages multifonctionnels lorsque ces stratégies visent la productivité, la conservation de la biodiversité et les contributions de la nature à l'humain ou les services écosystémiques (voir Figure n°2).

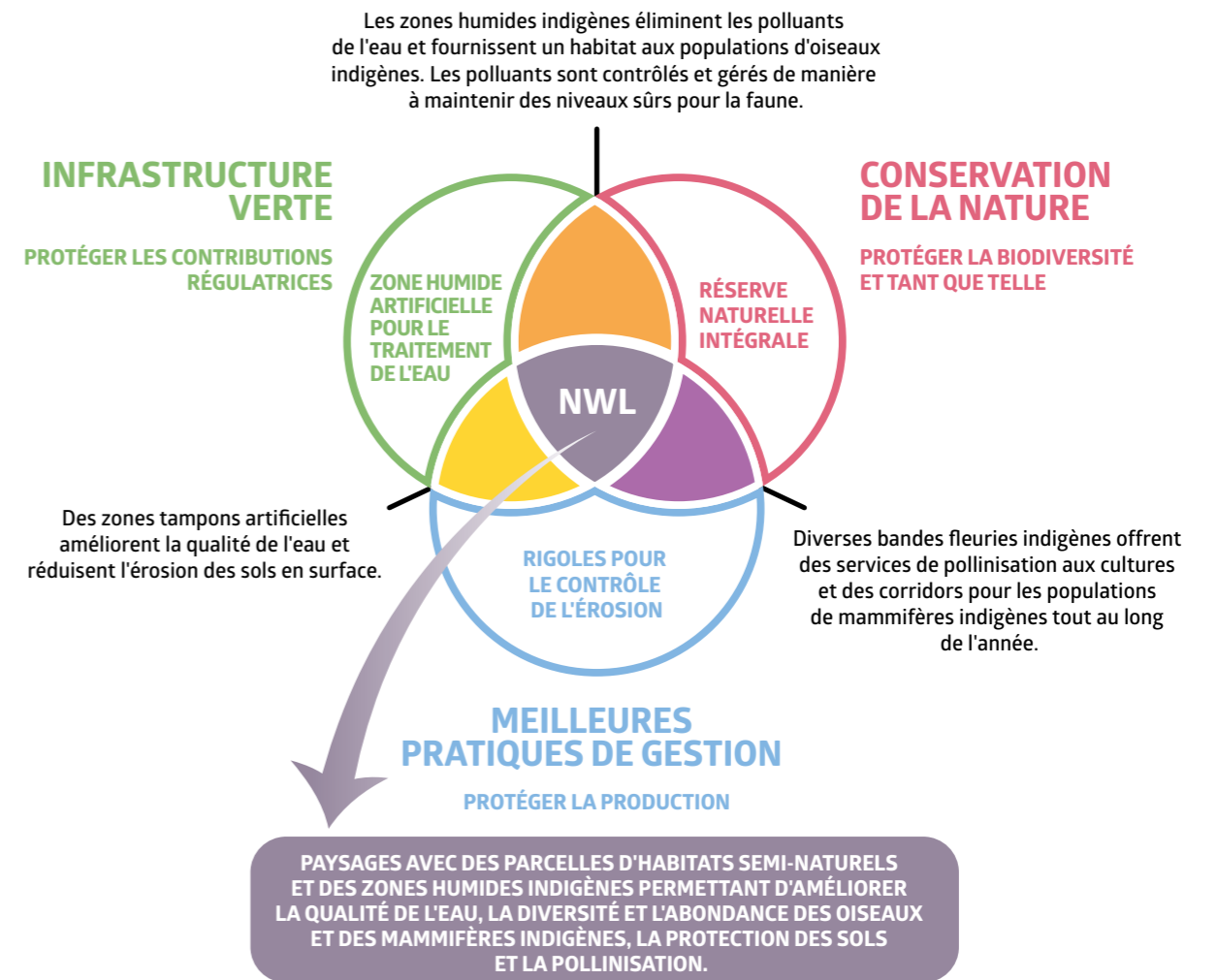
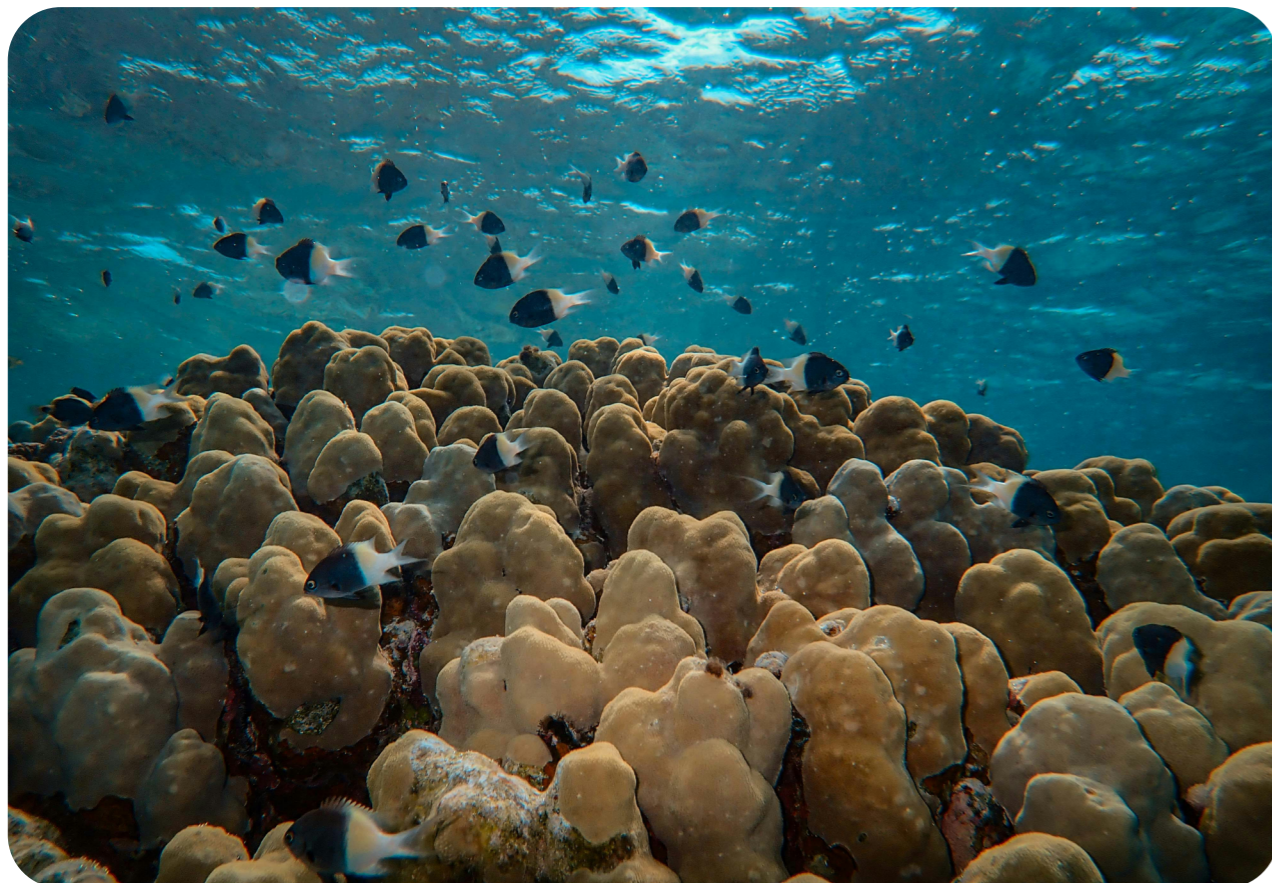


Figure 2 - Trois grandes lignes directrices scientifiques et politiques pour la gestion des écosystèmes productifs afin de protéger la production (meilleures pratiques de gestion), la biodiversité (conservation de la nature) ou la contribution de la nature à l'humain (infrastructures vertes ou solutions basées sur la nature). Les zones de recoupement des cercles illustrent les bénéfices réciproques. Au centre, les habitats natifs (NWL - *native habitats within working landscapes*) comme paradigme clé. Une gestion efficace permet de minimiser ou d'écartier les compromis, voire d'améliorer la production agricole globale grâce à des synergies entre les contributions de la nature à l'humain : les habitats natifs peuvent augmenter la productivité agricole des terres adjacentes en réduisant l'érosion et en améliorant l'activité biologique du sol et la disponibilité des nutriments ; en améliorant les services de pollinisation pour les cultures dépendant des pollinisateurs ; en ralentissant l'évolution rapide des ravageurs et des plantes concurrentes ; et/ou en prévenant les inondations et en régulant le climat. De plus, dans les zones où la productivité et/ou la rentabilité potentielle des cultures est plus faible – mais où la valeur de la contribution de la nature à l'homme est parfois élevée, comme dans le cas des zones humides –, les possibilités de protection ou de restauration des habitats natifs sont plus importantes et peuvent même accroître l'efficacité agronomique ou économique globale. D'après Garibaldi *et al.*, 2020.

L'objectif de 20% est fixé à partir de travaux de modélisation et d'un examen empirique des preuves scientifiques publiées. Ce pourcentage représente un minimum, plutôt qu'un optimum. **Les simulations convergent vers la valeur de 20% : en deçà, les habitats indigènes n'ont pas de contribution à la production.** La modélisation permet également de pointer que la quantité d'habitats natifs qui peut être conservée sans perte de production globale augmente avec l'hétérogénéité spatiale (jusqu'à 40% tout en maintenant une augmentation de la production). Ainsi, dans des conditions d'hétérogénéité spatiale et/ou lorsque la nature contribue directement à la productivité des cultures, cet objectif peut être atteint avec peu ou pas de compromis avec la productivité des cultures. La littérature scientifique documente **qu'au moins 20% de la surface non cultivée sont nécessaires pour assurer simultanément de nombreuses contributions de la nature aux humains (et pas seulement la productivité des récoltes).**

Les auteurs recommandent de **déployer cette stratégie dans les espaces dont plus de 80% des terres sontensemencées ou plantées pour l'agriculture, l'élevage et/ou la sylviculture dès lors que la taille des exploitations est supérieure à 10 hectares.**

- En termes de configuration et d'échelle spatiale, ils proposent **d'adopter une "perspective fractale" où l'objectif de 20% de surface en habitats natifs peut être appliqué à toutes les échelles spatiales, des parcelles aux paysages.** Plusieurs espaces

et écosystèmes peuvent ainsi être ciblés : zones d'habitat natif existantes ; zones traditionnellement travaillées mais avec un potentiel de productivité plus faible ; bordures de routes, de clôtures, d'habitations ; zones sensibles sur le plan environnemental (par ex. zones humides, bords de cours d'eau) ; zones en agriculture biologique... Cela peut être combiné, adapté de différentes manières en fonction des contextes socio-écologiques. Dans tous les cas, la connectivité entre les zones d'habitats natifs doit être favorisée.

- Concernant l'échelle temporelle, **cette stratégie doit être appliquée de façon suffisamment continue et longue pour permettre plusieurs générations d'espèces natives**, la persistance (ou le rétablissement) des communautés indigènes, le rétablissement de la fertilité du sol et l'établissement d'une banque de graines de qualité.

Dans les écosystèmes productifs où plus de 20% d'habitats natifs n'augmentent pas la production globale, ils recommandent de privilégier la sécurité alimentaire à long terme plus que la production à court terme en passant de zones d'agriculture intensive (non alimentaires ou alimentaires mais peu diversifiées) à des paysages plus diversifiés, multifonctionnels, avec des habitats indigènes, afin de produire des aliments plus nutritifs par unité de surface.



En pratique, l'étude identifie les étapes de ce déploiement et souligne qu'il peut être combiné avec des transitions complémentaires telles que la diversification culturelle, la rotation des cultures.

- La conservation de tout habitat indigène relictuel au sein des paysages agricoles par le biais de politiques de type « zéro perte » est une première étape.
- Une politique et des actions de restauration pour couvrir au moins 20% de la superficie du paysage constituent un pas supplémentaire.
- Ces habitats peuvent ensuite, ou également, être favorisés et maintenus par des activités humaines tant qu'elles soutiennent ou restaurent la diversité des espèces indigènes. Ce peut être le pâturage (par ex. pâturage traditionnel), le fauchage (par ex. prairies de fauche), la récolte (par ex. cueillette de fruits indigènes, chasse réglementée) ou le brûlage (par ex. brûlage dirigé pour la régénération). Dans tous les cas, **les espèces natives doivent être priorisées pour leur adaptation à l'environnement et aux autres espèces, leur potentiel évolutif, leur valeur intrinsèque et les contributions actuelles et potentielles aux humains.** Par ailleurs, il est essentiel de miser sur les synergies plus que sur les compromis et que les décisions de mise en œuvre soient inclusives.
- Enfin, une telle stratégie doit être déployée progressivement, surtout là où les habitats natifs ont très fortement régressés, de façon à minimiser la gêne possible pour les propriétaires et/ou exploitants et à permettre une évaluation et une évolution continues, c'est à dire une gestion adaptative.

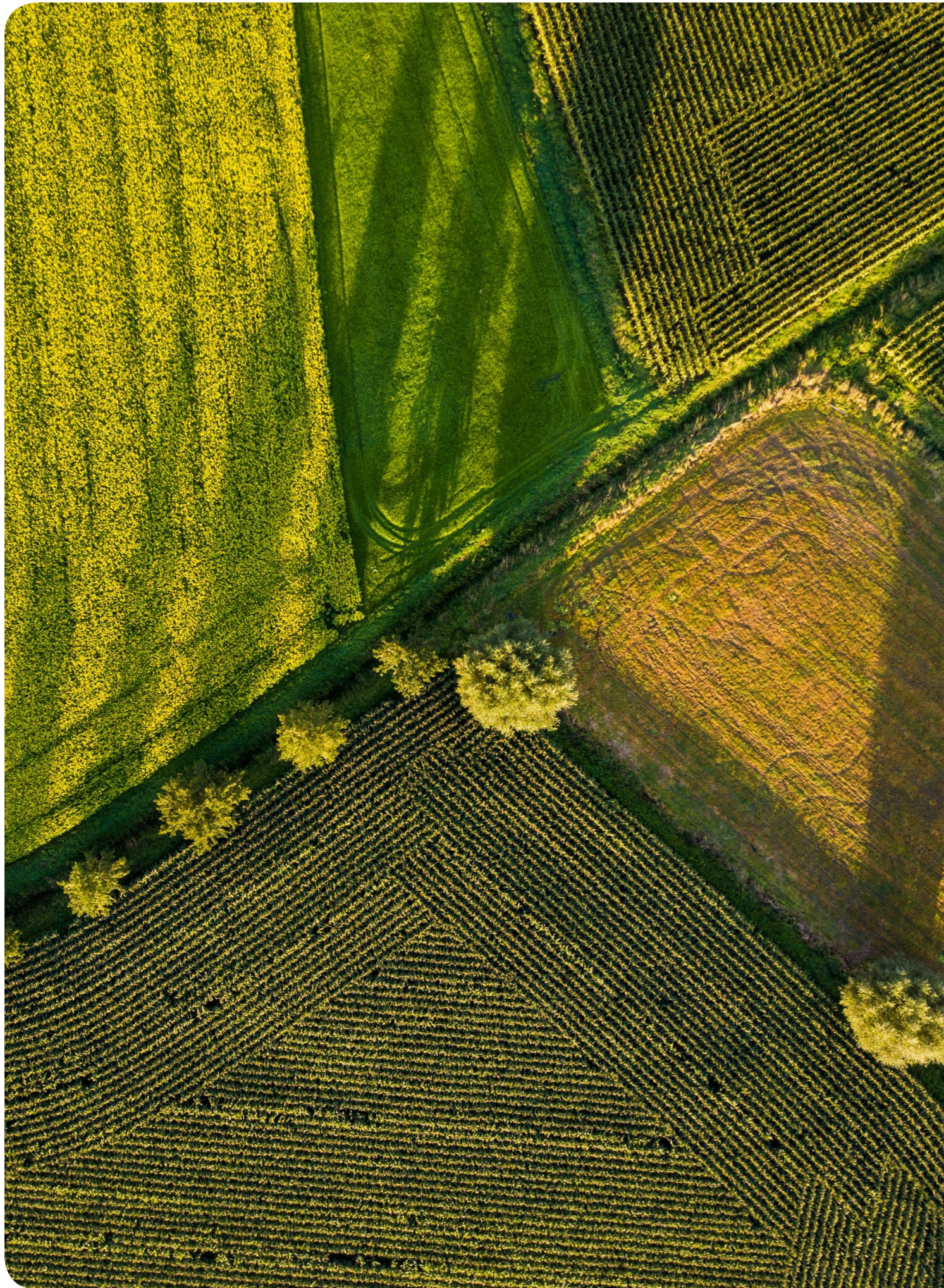
Ces perspectives montrent que la restauration et la conservation d'habitats natifs dans les écosystèmes productifs peuvent être réalisées tout en minimisant les compromis avec la productivité et sans expansion agricole – donc sans entrer en conflit avec les zones protégées. Une telle stratégie complète les efforts visant à étendre et établir des zones protégées pour des espèces et des écosystèmes peu tolérants aux activités et pressions humaines : ils maintiennent de la biodiversité, du fonctionnement des écosystèmes, des services écosystémiques là où les humains vivent ; ils constituent des corridors reliant les populations sauvages.

La restauration et la conservation d'habitats natifs nécessitent une coordination entre les gouvernements, les propriétaires, les gestionnaires fonciers, les entreprises et les organisations issues de la société civile. Dans tous les cas, avantages et coûts dépassent le cadre des systèmes productifs et concernent l'ensemble des sociétés. Le rôle des pouvoirs publics, par l'adoption de politiques et de législations pertinentes, est essentiel. Des instruments incitatifs tels que l'affichage environnemental et le renforcement des réseaux (dialogue et confiance entre les parties prenantes, recherche, vulgarisation...) sont aussi des compléments essentiels. Le déploiement de cette stratégie nécessitera créativité, expérimentation, gestion adaptative et accompagnement par la recherche.



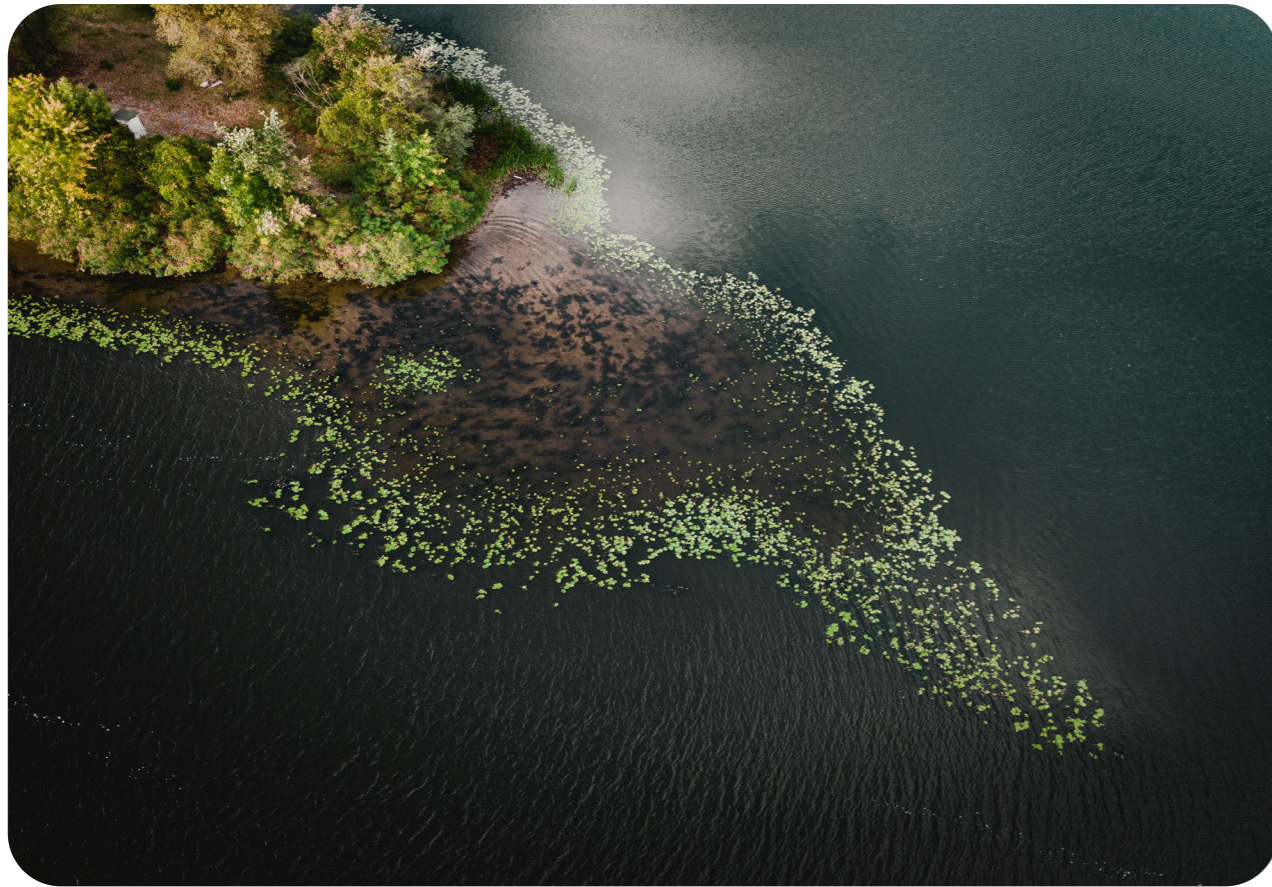
Écosystèmes naturels, gérés, natifs... de quoi parle-t-on dans les cadres scientifiques et politiques mondiaux ? **Voir : Repère 3**

Voir aussi la transcription synthétique complète « [Pour « vivre en harmonie avec la nature », intégrons au moins 20% d'habitats natifs dans les paysages gérés](#) » de la FRB d'après [Garibaldi et al. 2020](#).



2. L'intégrité des écosystèmes et les pressions anthropiques

2.1. UNE DÉFINITION AVEC OU SANS LES PRESSIONS



Les travaux scientifiques suggèrent plusieurs définitions de l'intégrité des écosystèmes et indicateurs associés. Ces approches se situent, schématiquement, sur un gradient entre deux grandes conceptions où l'intégrité peut être définie : soit « directes », à partir de propriétés intrinsèques, bio-physico-chimiques, des composantes des écosystèmes ; soit « indirectes », à partir de pressions anthropiques qui en altèrent les composantes.

La première conception est illustrée par [Haase et al., 2017](#) (adaptée de [Müller et al., 2000](#) ; [Müller, 2005](#)). Pour les auteurs, l'intégrité des écosystèmes représente la capacité de ces derniers à s'auto-organiser⁷ - compte tenu de propriétés thermodynamiques, de réseaux d'interactions, d'emboîtements d'échelles spatio-temporelles, etc. - et reflète l'idée de « durabilité » d'un point de vue écologique. Ils s'appuient sur des propriétés des écosystèmes pour identifier les changements de biodiversité grâce à un ensemble de variables ciblées sur leurs structures (diversité biotique, hétérogénéité abiotique) et leurs processus (bilans en eau, énergie, matière). Cette approche est notamment utilisée au sein du réseau *International long-term ecological research* (ILTER), réseaux de sites dédiés au suivi écologique sur le long terme et à la recherche.

7. Les éléments microscopiques d'un système ouvert, désordonnés, non structurés et non orientés par des éléments extérieurs, composent des structures macroscopiques qui se manifestent par des gradients, des propriétés fonctionnelles collectives (issues de la somme de tous les éléments) et des propriétés fonctionnelles émergentes (qualités supplémentaires acquises à un niveau d'organisation supérieur, créées par les interactions du système et dépassant la somme de tous les éléments). L'auto-organisation découle de la relation étroite entre « structures » et « fonctions » et ses propriétés peuvent être caractérisées par des principes thermodynamiques (éloignement du point d'équilibre thermodynamique en créant des structures organisées et en stockant l'énergie exogène ; dégradation des gradients, ou structures supportant les processus fonctionnels, auto-organisés sous l'effet d'apport d'énergie exogène). Voir [Müller et Fath, 1998](#) ; [Kay, 1991](#)

Les auteurs soulignent la complémentarité de cette approche avec celle des « variables essentielles de biodiversité », ensemble minimal de paramètres à mesurer pour surveiller l'état de la biodiversité, de l'échelle infraspécifiques aux écosystèmes ([Pereira et al., 2013](#)). Une telle approche, outre la collecte de données pour la recherche, permettrait de répondre aux besoins de suivi et de rapportage des politiques de biodiversité (voir Figure n°3).

Une vingtaine d'indicateurs d'intégrité est proposée : ils résument des informations relatives aux propriétés thermodynamiques, structurales, aux réseaux et aux interactions et peuvent être renseignés par des méthodes d'observation et de collecte de données traditionnelles. Les états de référence sont relatifs : il s'agit de comparer deux états (devenir d'un écosystème avec des usages des terres différents ; inter-comparisons des indicateurs d'une année à l'autre, etc.).



Pour en savoir plus sur cette approche et les indicateurs associés : [Voir : Fiche 4](#)

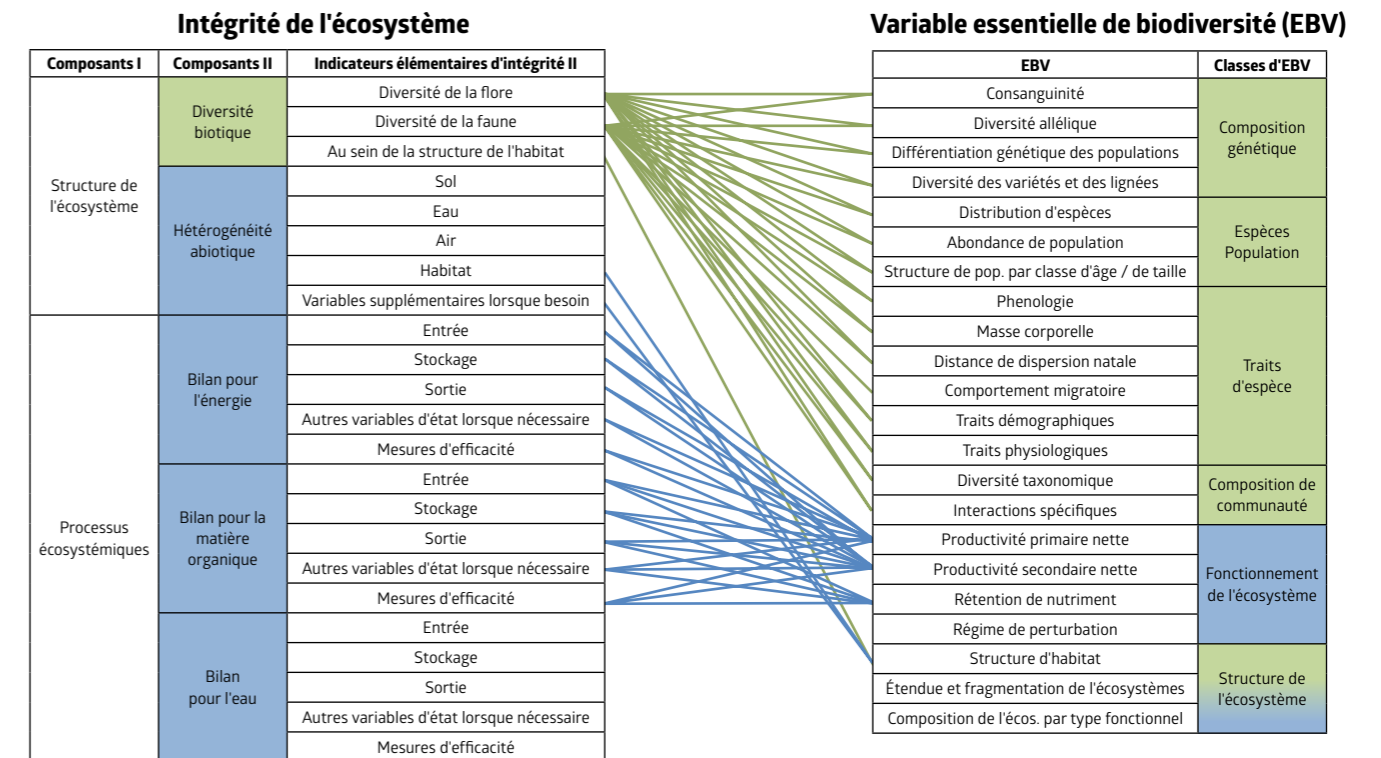


Figure n°3 - Correspondance de l'intégrité des écosystèmes (IE) avec les « variables essentielles de biodiversité » (EBV). Le cadre des EBV ([Pereira et al., 2013](#)), propose un ensemble minimal de paramètres à mesurer pour surveiller l'état de la biodiversité, de l'échelle infraspécifiques aux écosystèmes est plus orienté vers les variables biotiques tandis que l'intégrité des écosystèmes met davantage l'accent sur les composantes abiotiques. Un suivi idéal de l'état et de la dynamique de la biodiversité, des gènes aux écosystèmes, de façon intégrée et holistique, prendrait simultanément en compte les deux cadres (intégrité et variables essentielles). Les lignes (vertes pour les indicateurs ou variables biotiques, bleues pour les indicateurs ou variables abiotiques) indiquent des exemples de précisions à apporter (la résolution des indicateurs d'IE et des variables étant différente), de compléments à ajouter d'un côté comme de l'autre. D'après [Haase et al., 2017](#).

Dans la seconde conception, des pressions anthropiques sont explicitement mesurées. C'est le cas dans la [Directive cadre Stratégie pour le milieu marin](#) (DCSMM) dont l'objectif principal est le « bon état écologique des eaux ». Celui-ci, défini à l'échelle de la région ou de la sous-région marine, est « l'état écologique des eaux marines tel que **celles-ci conservent un océan et des mers écologiquement diversifiées et dynamiques, qui soient propres, en bon état sanitaire et productifs dans le cadre de leurs conditions intrinsèques, et que l'utilisation du milieu marin soit durable, sauvegardant ainsi le potentiel de celui-ci aux fins des utilisations et activités des générations actuelles et à venir** ».

Cette approche est utilisée pour la politique maritime de l'Union européenne et s'applique à l'ensemble des pays européens dotés d'une façade littorale.

Le déploiement du bon état écologique s'articule autour de trois grands thèmes :

1. la structure, les fonctions et les processus des écosystèmes qui composent le milieu marin (diversité, abondance...), combinés aux facteurs physiques, géographiques, géologiques et climatiques qui leur sont associés (pour assurer le fonctionnement et conserver des capacités d'adaptation) ;
2. les propriétés hydromorphologiques, physiques et chimiques des écosystèmes (turbidité...) ;

3. et des pressions (pollutions, espèces exotiques...) et des activités humaines (pêche, mouillage, aquaculture, infrastructures au large...).

Onze « descripteurs » - avec des objectifs qualitatifs, des critères et des indicateurs associés - ont été établis et les caractéristiques correspondant à un « bon état écologique » (états de référence à atteindre) sont définies par les États membres pour les eaux marines de chaque région ou sous-région marine qui le concernent.



Pour en savoir plus sur cette approche et les indicateurs associés : [Voir : Fiche 5](#)

D'autres approches tirent ce fil et sont essentiellement basées sur la quantification des pressions humaines comme proxy de l'évaluation inverse de l'intégrité des écosystèmes : l'intégrité (*integrity*) à l'échelle paysagère et la pression d'usages des terres ([Theobald, 2013](#)) ou l'intégrité (*intactness*) appliquée aux habitats selon leurs surface, qualité et fragmentation ([Beyer et al., 2019](#)). Enfin, des notions telles que la « naturalité » ou « l'hémérobie » (mesure de la modification anthropique d'un écosystème) constituent également des pistes de réflexion dans cette direction.



2.2. L'INTÉGRITÉ DES ÉCOSYSTÈMES DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS GLOBAUX

La biodiversité s'adapte en permanence aux changements environnementaux : organismes et groupes d'organismes modifient leur comportement et leur utilisation de l'environnement, se déplacent, développent des réponses génétiques ou phénotypiques. Dans le cadre des changements globaux, cette adaptation - au sens large - questionne la notion d'intégrité et celle de résilience qui lui est étroitement associée quant à la « marge de manœuvre » dynamique des écosystèmes et aux références associées à la notion d'intégrité.



La résilience écologique peut être définie comme « la capacité d'un système à résister aux chocs et à maintenir des interactions et des fonctions essentielles » ([Quinlan et al., 2016](#)). Cette « propriété » d'un écosystème émerge de la combinaison de ses composantes, de ses caractéristiques et est contextuelle. Un seul indicateur ne peut donc prendre en compte, ni rendre compte de toutes ses dimensions : qu'est-ce qui est résilient ? À quelles pressions anthropiques ou perturbations naturelles ? etc. De récents travaux ([Ferrier et al., 2020](#)) se sont attachés à rendre compte d'un aspect de la résilience des écosystèmes : leur capacité à conserver leur diversité biologique face à un changement climatique.

À l'échelle locale, pour un écosystème donné, c'est surtout l'état général de ses habitats qui soutient les espèces indigènes et l'amélioration de cet état devrait renforcer sa capacité à s'adapter aux changements potentiels de composition de ses espèces en réponse à l'évolution des conditions climatiques. Il faut également tenir compte de la possible nécessité des espèces à modifier leur aire répartition au-delà de l'échelle locale. **La capacité des écosystèmes à s'adapter aux changements de distribution des espèces induits par le changement climatique dépendra donc non seulement de l'état des habitats mais aussi de la configuration et de la connectivité de ces habitats dans l'espace (physique et biotique).**

Les chercheurs ont développé l'index de résilience bioclimatique des écosystèmes (*Bioclimatic Ecosystem Resilience Index*, BERI) pour une zone et un instant donnés, et dans une gamme plausible de futurs climatiques. Il s'agit d'évaluer dans quelle mesure une configuration observée de l'état de l'habitat (sa quantité, mais aussi son agencement spatial) favorisera ou entravera la connectivité d'environnements changeants, et, par-là, confère la capacité à conserver la diversité biologique en permettant à la distribution des espèces de se déplacer, si nécessaire, en réponse au changement climatique.

Le BERI intègre, dans son calcul, plusieurs dimensions des écosystèmes et notions - celles de la structure avec la surface et la connectivité, celle de la composition en espèces, celle de la résilience - pour estimer une facette de l'intégrité.

Les premières applications du BERI aux forêts tropicales humides suggèrent que, au-delà de l'étendue et l'état de l'habitat, la topographie et la vitesse de changement climatique comptent dans la capacité estimée des zones forestières à conserver la diversité biologique en jouant sur différents gradients (altitudes des habitats, régime de précipitations...).



Pour en savoir plus sur le BERI et son utilisation dans le cadre de l'évaluation de l'intégrité : [Voir : Fiche 6](#)

En lien avec la notion de résilience et de stabilité comme des propriétés d'un système intègre, l'intégrité des écosystèmes est régulièrement définie comme un état de complétude, des changements de composition en espèces compromettant cette stabilité. La notion de coévolution est au cœur de cette vision d'écosystème comme un tout, très intégré, avec des interdépendances fortes, des mutualismes très spécialisés. Cette vision est contrastée avec les apports d'études de l'évolution de ces mutualismes qui montrent, au contraire, des interactions labiles, opportunistes, un signal de coévolution faible en général, une frontière floue et mobile entre mutualisme et parasitisme, l'évolution rapide de nouvelles interactions biotiques dans les communautés et une spécialisation forte plus exceptionnelle que normale.

Les concepts d'évolution de la niche écologique sous-tendent également une définition de l'intégrité des écosystèmes fondées sur le degré de remplissage des niches, pour dépasser les difficultés liées à la composition taxonomique exacte (différentes espèces peuvent remplir la même niche écologique : un écosystème peut être intègre même si sa composition taxonomique diffère de celui de l'état de référence). De manière intéressante, cette définition est parfois en opposition avec les objectifs de préserver la « naturalité » des écosystèmes, notamment dans le contexte des invasions biologiques : certaines communautés et écosystèmes, pour des raisons historiques et stochastiques (en particulier dans les milieux insulaires), ont des niches vides et, en l'absence d'occupation de ces niches, ont évolué des traits qui les rendent très sensibles à leur remplissage par de nouveaux venus (par exemple absence de prédateurs sur les îles, mais aussi effets très délétères des lombrics envahissants dans forêts américaines).



2.3. ENTRE OBJECTIF DE GESTION ET ÉTAT TRANSITOIRE

Les définitions de l'intégrité des écosystèmes recouvrent des perceptions différentes des pressions et des changements des écosystèmes. Ainsi, certains auteurs distinguent « l'intégrité des écosystèmes » et « l'intégrité écologique ou biologique ». À travers ces définitions, ils mettent en exergue l'importance d'explicitier les valeurs associées aux définitions et aux états de référence.

Pour [Karr et al. \(2021\)](#), l'intégrité est un concept utile à déployer face à la dégradation des systèmes vivants. Ils insistent sur la nécessité de **dépasser la vision écosystémique pour aller vers une vision de l'organisation biologique comprenant les phénomènes à de multiples niveaux d'organisation biologiques, mais aussi les flux de matière et d'énergie**. Les auteurs rappellent que le concept d'intégrité biologique a fourni, en 40 ans de développement scientifique, des méthodes efficaces de surveillance et d'évaluation biologiques, des indices multimétriques partageant des caractéristiques avec la santé économique et humaine.

Pour ces auteurs, **l'intégrité biologique peut être définie comme une visée sur un gradient de conditions biologiques allant de l'absence relative de perturbation humaine à l'absence totale de vie** (par ex. les sols ne doivent pas être érodés ou appauvris au point d'empêcher toute productivité future). La notion d'intégrité permet d'estimer quand des systèmes sont altérés par des facteurs anthropiques (par ex. : pollution entraînant des lésions chez les poissons ; changement hydro-morphologique de l'écoulement d'une rivière amenant la disparition des prédateurs à longue durée de vie) et il est ainsi possible d'indiquer qu'il y a perte d'intégrité quand un écosystème est remplacé par un autre d'origine anthropique et qu'il y a perte de services écosystémiques (de régulation, d'approvisionnement, culturel). Des mesures de bio-évaluation permettent de diagnostiquer et de comprendre les changements écologiques naturels et anthropiques. **Ces éléments de surveillance et d'évaluation fournissent aux sociétés une base de décision et d'élaboration de politiques publiques selon qu'elles estiment que les services écosystémiques ont été perdus ou gagnés** (et par là les valeurs écologiques). Elles peuvent entreprendre des actions de conservation ou des restaurations adéquates.

Cette approche peut être illustrée en écotoxicologie : si on s'intéresse aux effets des polluants sur les organismes et écosystèmes côtiers marins, l'intégrité des écosystèmes dans ce domaine est abordée sous au moins trois aspects. Le premier aspect est la

caractérisation du niveau d'exposition du vivant aux polluants, le niveau d'imprégnation chimique du vivant (contenu des organismes du micro au macro) et de l'environnement (concentrations en composés dans l'eau, les sédiments) ; le deuxième s'intéresse aux effets des pollutions sur la biodiversité (modification de la structure des communautés exposées, effet d'une pression par les polluants et sélection de taxons tolérants...) ; le troisième s'intéresse aux effets fonctionnels des pollutions (principalement *via* la modification du fonctionnement trophique, de la production primaire, du recyclage de la matière). De la même façon pour la dégradation des sols qui perdent leur qualité première et leur potentiel à soutenir la croissance végétale quand les microorganismes sont impactés par les produits phytosanitaires.

Abordant le sujet sous un autre angle, [Rohwer et Marris \(2021\)](#), partant des caractéristiques intrinsèques des écosystèmes, considèrent ces termes comme interchangeable et invoquent une perspective évolutive pour discuter la pertinence de nombreux points communs dans les définitions de l'intégrité des écosystèmes : la naturalité, la complétude, de continuité dans le temps (capacité de persistance, de résilience), ou encore la distance à un état de référence. En effet, les écosystèmes sont caractérisés par leurs dynamiques, leurs transitions graduelles dans le temps et l'espace et leur adaptabilité : autant de propriétés qui ne répondent pas à cette intégrité. Une perspective de temps long (données fossiles) suggère un grand dynamisme et une forte contingence dans l'assemblage des communautés au sein des écosystèmes dans les cycles glaciaires interglaciaires.

L'idée d'un état de référence défini comme un état relativement récent contraste avec une vision très dynamique des écosystèmes comme des systèmes transitoires et contingents, très évolutifs tant par leur composition spécifique que par les traits des espèces qui y habitent, changeant sous l'effet de différentes forces évolutives.

Une perspective évolutive est aussi invoquée pour questionner les définitions de l'intégrité écologique comme le caractère intact et non altéré par l'humain de systèmes écologiques, en rappelant que, dans **la plupart des écosystèmes terrestres actuels, les traits des espèces et leur évolution ont de fait été déjà modélisés en grande part par les activités humaines**, y compris les populations autochtones avant l'arrivée des populations européennes.

Les auteurs proposent alors une définition simple de l'intégrité comme « des relations causales entre des composants tels qu'ils existent à un instant donné ». L'intégrité est ainsi fluctuante : il peut y avoir transition d'un écosystème A à un écosystème B également intègre sans qu'il y ait dégradation. Les auteurs soulignent que l'appréhension d'une « dégradation » repose sur la perception anthropique d'une modification de la diversité, de la complexité du système (interactions au sein de l'écosystème) et/ou de l'attachement culturel

par rapport à l'ancien écosystème (état historique ou dynamique de l'écosystème A préférés) et qu'il vaut mieux s'attacher à expliciter clairement les valeurs sous-jacentes aux actions de conservation et de restauration.

2.4. DIFFÉRENTES VISIONS : DE LA CONSERVATION À L'UTILISATION DE LA NATURE

Au-delà des approches « directes » ou « indirectes » avec la prise en compte explicite ou non des pressions, les définitions de l'intégrité des écosystèmes accentuent tantôt une facette plutôt liée à la conservation de la biodiversité (c'est le premier pilier de la Convention sur la diversité biologique), tantôt plutôt liée à son utilisation durable (c'est le deuxième pilier de la Convention). Cela appelle des finalités, des définitions et des indicateurs différents qu'il s'agit pourtant de concilier pour mettre en œuvre et documenter l'atteinte des objectifs du cadre mondial de la biodiversité.

Dans une approche « anthropocentrée », l'intégrité des écosystèmes voisine la notion de « durabilité », de conservation des écosystèmes et de fourniture, à long terme, de services écosystémiques ou de contributions de la nature aux humains. Dans une approche « écocentrée », elle met l'accent sur la valeur intrinsèque de la biodiversité et le caractère affranchi de pressions anthropiques. Il existe un ensemble sémantique (intégrité, qualité écologique, santé, condition...) faisant passer la notion d'un registre à un autre, mettant en avant tantôt une facette plutôt liée à la conservation de la biodiversité, tantôt plutôt liée à l'utilisation de la biodiversité et appelant des finalités, des définitions et des indicateurs différents.

Ainsi, Roche et Campagne (2017) ont identifié, via l'analyse de la littérature scientifique, cinq formes principales de notion « d'intégrité des écosystèmes » (voir Figure n°4). Ces cinq formes peuvent être regroupées en deux grands volets liés à une dichotomie classique :

- un volet « conservation de la nature » avec l'intégrité des écosystèmes sauvages ; l'intégrité fonctionnelle et structurelle des écosystèmes ; la stabilité et la dépendance des écosystèmes.
- un volet « utilisation humaine de la nature » avec la condition des écosystèmes ; la qualité et la valeur des écosystèmes.

Cet éclairage peut faciliter la déclinaison opérationnelle. Il peut surtout permettre d'appréhender les multiples facettes de l'intégrité des écosystèmes pour englober à la fois les questions de conservation (1^{er} pilier de la Convention sur la diversité biologique) et d'utilisation durable (2^e pilier de la Convention sur la diversité biologique), sans opposer les deux grands volets.

Il ouvre aussi la discussion sur les objectifs et les finalités en assumant qu'il peut y avoir plusieurs régimes possibles « d'intégrités des écosystèmes » dans le cadre des socio-écosystèmes (Manuel-Navarrete et al., 2004) et qu'il est important de prendre en compte les valeurs plurielles qui y sont attachées.

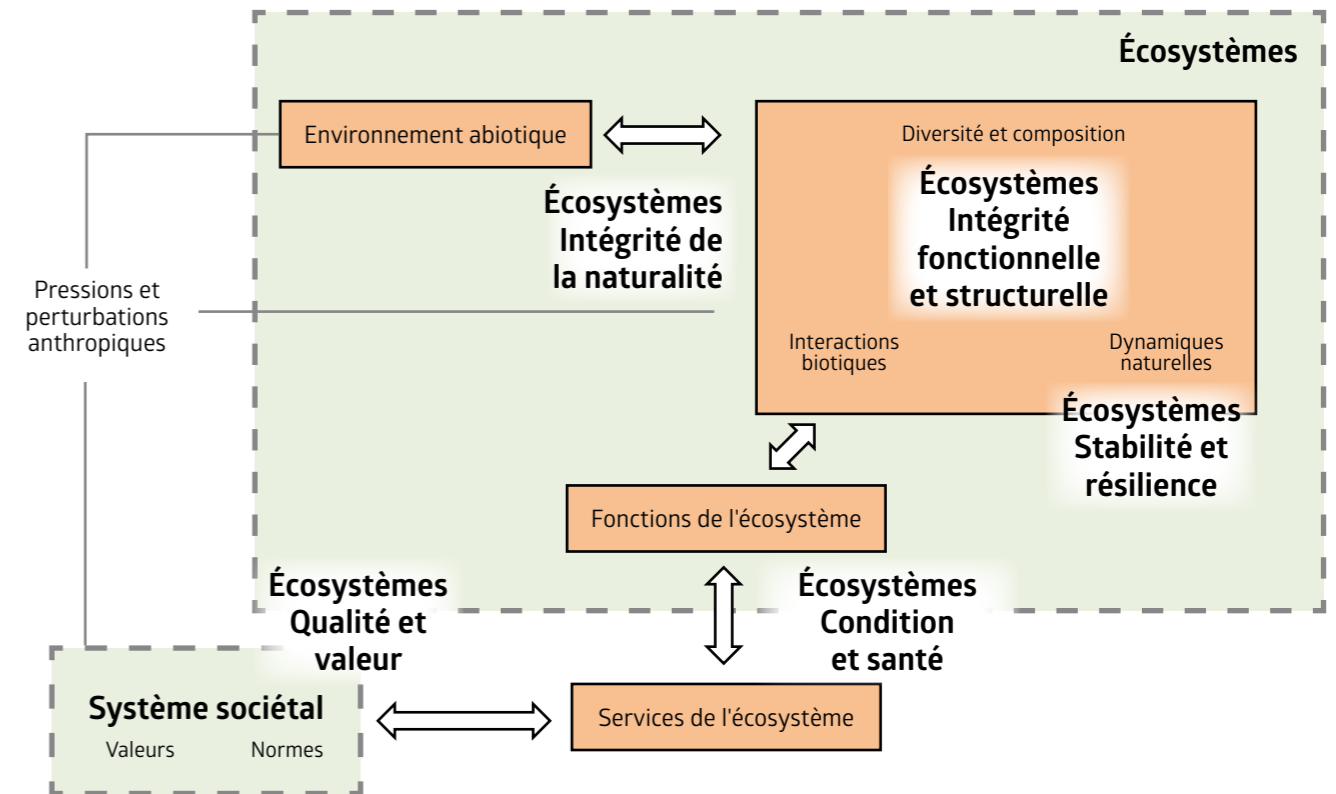
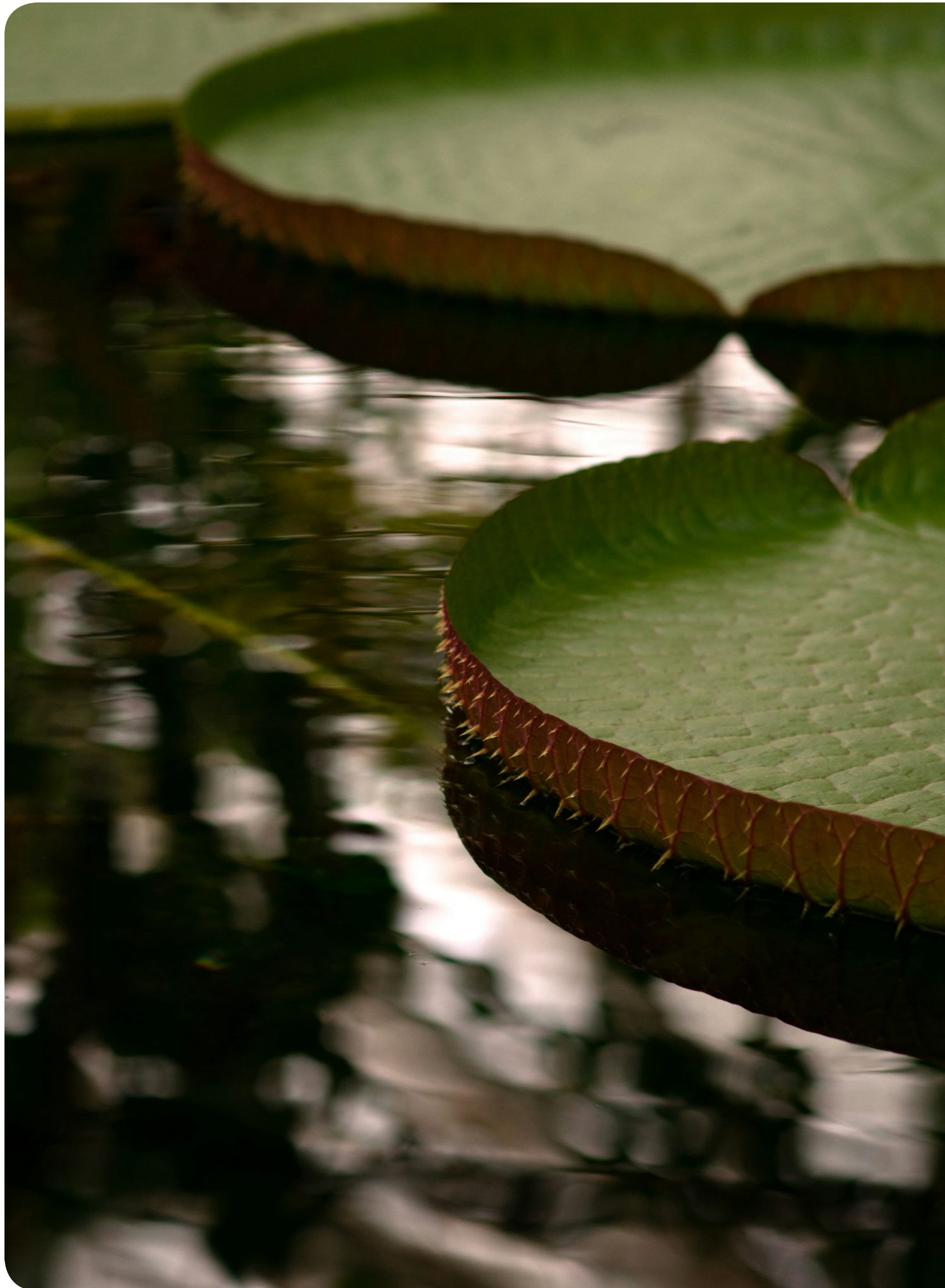


Figure n°4 - Les cinq formes identifiées d'intégrité des écosystèmes sont positionnées dans un cadre d'interactions entre les systèmes humains et les écosystèmes, basé sur Tomimatsu et al. (2013). La position des différentes formes d'intégrité de l'écosystème exprime leur place dans les interactions entre l'écosystème et le système sociétal. Le tableau ci-dessous détaille ces cinq formes. D'après Roche & Campagne, 2017.

Les cinq formes d'intégrité de l'écosystème et les catégories d'indicateurs potentiels.					
Types	Formes	Définition	Exemples d'indicateurs potentiels	Conservation	Humain
Conservation de la nature	Écosystème Intégrité de la nature	État absolu de complétude, état parfait et non altéré par les activités humaines	Composition de la biodiversité Activité humaine Index d'hémérobie	+++	—
	Écosystème Intégrité fonctionnelle et structurelle	État dans lequel les caractéristiques dynamiques s'expriment dans des plages normales de variabilité par rapport à son stade évolutif	Réseaux trophiques Couverture végétale Fragmentation de l'habitat	++	—
	Écosystème Stabilité et résilience	Capacité à résister et récupérer de la plupart des perturbations naturelles ou anthropiques.	Traits d'espèces Connectivité spatiale Capacité de résilience	++	+
Utilisation humaine de la nature	Écosystème Condition	Capacité et aptitude à fournir les services attendus par les humains	Production primaire nette Efficacité énergétique Cycle des nutriments Structure et configuration	—	+++
	Écosystème Qualité écologique et valeur	Norme ou état qui fait référence à ce qui est considéré un "bon état" pour les humains et les besoins de la société	Liste rouge des espèces Valeur esthétique Patrimoine naturel Absence de pollutions	+	++



3 Perspectives et limites de la notion d'intégrité des écosystèmes

3.1. UN CADRE UTILE POUR DE NOMBREUSES FINALITÉS

Au-delà de la mise en œuvre et du suivi du cadre mondial de la biodiversité, la notion d'intégrité des écosystèmes sert de cadre pour le suivi de divers écosystèmes et est mobilisée pour de nombreuses finalités.

Elle est ainsi utilisée : pour le suivi et le rapportage⁸ ; comme une notion pouvant guider les politiques publiques⁹ ; pour la conservation et de son financement¹⁰ ou dans le cadre de la restauration¹¹.

Plus largement, elle peut soutenir un changement de paradigme pour passer d'une vision et de politiques publiques basées largement sur la protection des espèces à celle des écosystèmes - c'est-à-dire dépasser un cadre aujourd'hui clair, car les « objets » dont il est question sont définis et définissables. Elle pourrait

alors appuyer la mise en œuvre et l'évaluation de politiques publiques françaises, notamment celles liées à la restauration, à la séquence « Éviter-Réduire-Compenser » (ERC) ou encore à l'objectif de « Zéro artificialisation nette » (ZAN). Elle pourrait aussi être mobilisée pour les « Solutions fondées sur la nature » (SFN) ou encore à la gestion des grands fonds marins à l'intérieur et au-delà des juridictions nationales.

Enfin, rappelons que les sciences de la biodiversité dépassent l'écologie scientifique. L'intégrité des écosystèmes trouve écho dans le droit, l'économie, les sciences politiques, etc.



8. Voir Muller et Burkhard, 2010 et des exemples d'application à des écosystèmes terrestre, marin, eau douce ; voir Grantham *et al.*, 2020 et Hansen *et al.*, 2021 pour l'application aux écosystèmes forestiers ; Diaz-Delgado *et al.*, 2018 pour les zones humides ou encore Karr *et al.*, 1986 pour les écosystèmes aquatiques.

9. Voir Rogers *et al.*, 2022 pour maximiser l'atténuation des changements climatiques dans les politiques forestières ; Carter *et al.*, 2019 pour informer la gestion d'espaces soumis à de multiples usages

10. Voir Hill *et al.*, 2022 ; voir Mora, 2018

11. En 2022, les instances de formation de la Convention sur la diversité biologique présentent l'intégrité comme un des objectifs des actions de restauration des écosystèmes conjointement à la biodiversité, la santé de l'écosystème et le bien-être humain et comme une caractéristique d'un écosystème non dégradé qui servira de référence vers laquelle les équivalents dégradés devront converger.

3.2. LES ASPECTS DYNAMIQUES ET ÉVOLUTIFS PEU PRIS EN COMPTE

Les aspects dynamiques sont peu pris en compte dans les approches scientifiques actuelles de l'intégrité des écosystèmes. Cette critique pointe notamment l'écueil du recours à un état de référence possiblement fixiste ou encore le recours aux espèces plutôt qu'aux fonctions. Elle souligne aussi que **les aspects évolutifs sont peu développés, que ce soit dans une perspective de mesure de la capacité évolutive ou d'estimation de la résilience.**

L'intégrité des écosystèmes, comprise comme l'intégrité des processus au sein de l'écosystème – plus que l'intégrité de sa composition vis-à-vis d'un état de référence –, implique de protéger les capacités d'évolution des espèces au sein des écosystèmes. La mesure de cette capacité adaptative, ou évolutive, est confrontée à plusieurs difficultés scientifiques et techniques pour estimer le potentiel évolutif – difficultés auxquelles s'ajoute la nécessité de comprendre quels traits/variants moléculaire affectent non seulement une espèce d'intérêt, mais aussi le maintien de ses interactions et interdépendance avec les autres espèces.


Des auteurs ont proposé d'intégrer des indicateurs de l'intégrité des écosystèmes et les variables essentielles de biodiversité (EBV) dans les dispositifs de suivis de site de long terme (Haase *et al.* 2017, cf. partie 2.1). Toutefois, la diversité génétique est citée parmi les objectifs de documentation de la biodiversité à travers les EBV sans que la nature de la diversité mesurée (diversité moléculaire neutre ou sélectionnée, diversité héréditaire de traits adaptatifs) ou ses métriques soit absolument claires. De même, malgré cet affichage, le

niveau génétique n'est pas spécifiquement cité dans la synthèse des indicateurs proposée par Haase *et al.* 2017.

Par ailleurs, la notion d'intégrité des écosystèmes est souvent associée aux propriétés de résilience et à la capacité des écosystèmes à se remettre de perturbations, ou à persister malgré des changements profonds des conditions auxquelles ils sont exposés (voir partie 1.3). L'évolution génétique, au sens de changements de la distribution de variation phénotypique héréditable au sein des espèces, est fréquemment discutée comme une des modalités possibles de cette résilience, en particulier si elle permet le maintien d'espèces clés de voûte malgré un environnement changeant et empêche de franchir des points de bascule au niveau de l'écosystème.

Les recherches sur le rôle des processus évolutifs dans la résilience des écosystèmes constituent un front de science actuel et montrent une image beaucoup plus complexe qu'anticipé lorsqu'on intègre les processus évolutifs intraspécifiques, les interactions entre espèces et les rétroactions avec l'état de l'environnement abiotique.

Ces questions en appellent d'autres, pratiques et éthiques, lorsqu'il s'agit de définir une stratégie de gestion, un niveau d'intervention au sein d'un écosystème. C'est le cas notamment pour certains programmes de recherche qui explorent la possibilité de transformer génétiquement les coraux pour les rendre plus résistants aux températures extrêmes. *In fine*, ces méthodes sont-elles en contradiction avec l'idée d'écosystèmes intacts et non altérés par l'être humain dans la mesure où même la composition génétique des espèces sauvages deviendrait manipulée ?

 Mesurer la capacité adaptative et évolutive pour en rendre compte en termes d'intégrité des écosystèmes : quelles sont les questions ?
Voir : Repère 4



FICHE

1

L'intégrité des écosystèmes : application aux écosystèmes forestiers

[Hansen et al. \(2021\)](#) aspirent à fournir un cadre conceptuel pour initier le suivi opérationnel de l'état de la biodiversité, notamment forestière. La définition de l'intégrité et sa déclinaison pratique sont notamment utilisées dans des parcs nationaux canadiens¹ et aux États-Unis (parc national d'Acadia²). Cette déclinaison pratique met en avant l'utilisation de données d'observation de la Terre par satellite et l'utilisation de certaines « variables essentielles de la biodiversité ». Cette approche s'appuie sur des propriétés des écosystèmes et leurs évolutions sous l'influence de pressions humaines.

Définition de l'intégrité

L'intégrité des écosystèmes est ici une mesure de l'évolution de la structure, de la fonction et de la composition d'un écosystème par rapport à un état de référence, état de référence où ces composantes sont déterminées par une plage de variations naturelles, aux limites régies par les perturbations naturelles, les variations climatiques (en reconnaissant le changement actuel) et la diversité géomorphologique typiques d'une écorégion (voir Encart n°1.1).

États de référence

Les états de référence peuvent être établis selon différentes méthodes, depuis la reconstruction paléoécologique jusqu'aux écosystèmes contemporains peu anthropisés en passant par la modélisation de conditions naturelles.

Indicateurs

Les auteurs recommandent huit indicateurs d'intégrité pour évaluer l'intégrité des écosystèmes dans le contexte du cadre mondial pour la biodiversité et des mesures qui peuvent actuellement être utilisées pour surveiller l'état des écosystèmes et qui pourraient être développées en tant qu'indicateurs de l'intégrité des écosystèmes (en bleu) :

- Pour la structure : Forest Structural Condition index (FSCI), Lost Forest Configuration (LFC)
- Pour la fonction : MODIS Net Primary Productivity (NPP), MODIS Burned Area
- Pour la composition : Species Habitat Index by group, Local Biodiversity Intactness Index (BII), Biodiversity Habitat Index (BHI)
- Pour la structure et la composition : Bioclimatic Ecosystem Resilience Index (BERI)



1. Parks Canada. (2008). Parks Canada guide to management planning, Parks Canada Agency.91pgs.
Parks Canada Agency. (2011). Consolidated guidelines for ecological integrity monitoring in Canada's national parks. Parks Canada : Protected Areas Establishment and Conservation Branch.
2. Tierney, G. L., Faber-Langendoen, D., Mitchell, B. R., Shriver, W. G., & Gibbs, J. P. (2009). Monitoring and evaluating the ecological integrity of forest ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*,7,308-316

Ces indicateurs peuvent être renseignés grâce à l'observation de la Terre par satellite ; ils peuvent être documentés à une échelle infranationale, nationale et mondiale ; des états de références sont spécifiés pour évaluer les tendances de l'IE ; des métriques de rapportage sont proposées (voir Encart n°1.2).

Encart n°1.1 – Le concept d'intégrité des écosystèmes. D'après Hansen et al., 2021.

L'état d'un écosystème est caractérisé par sa structure, sa fonction et sa composition.

- La « structure » décrit l'architecture tridimensionnelle de ses composantes biotiques et abiotiques et des mesures courantes liées à la structure de la végétation, au relief, à la configuration spatiale (hauteur de la canopée, variation de l'altitude, fragmentation...).

- La « fonction » englobe les processus écologiques et évolutifs, notamment les perturbations, le flux d'énergie, les cycles des nutriments et la succession - régis par des processus physiques, chimiques et biologiques.

- La « composition » caractérise les attributs biotiques d'un écosystème, tels que la variation génétique, la richesse ou l'homogénéité des espèces, la diversité phylogénétique, ainsi que les rôles fonctionnels ou les niches occupées par ces espèces.

La structure, la fonction et la composition des écosystèmes varient géographiquement en fonction de facteurs contextuels (state factors) : climat, géologie, topographie, pool régional d'espèces, temps de succession, activités humaines... Les limites de la structure, la fonction et la composition des écosystèmes varient donc ! L'état de référence pour l'évaluation des tendances de l'IE doit ainsi être déterminé par l'environnement climato-géophysique prédominant.

Les auteurs ont également analysé plusieurs indicateurs (voir Tableau n°1) et distinguent des indicateurs recommandés pour évaluer l'intégrité des écosystèmes dans le contexte du cadre mondial post-2020 (en vert), les métriques qui sont actuellement utilisées pour suivre l'état des écosystèmes et qui ont le potentiel pour être développées comme des indicateurs de l'intégrité (en jaune) et des indicateurs recommandés dans la version de travail (preprint, mars 2021)(en blanc). Les indicateurs marqués * signalent les variables essentielles de biodiversité développées comme indicateurs par le Biodiversity Indicator Partnership (BIP) et possiblement d'intérêt pour évaluer l'intégrité des écosystèmes.

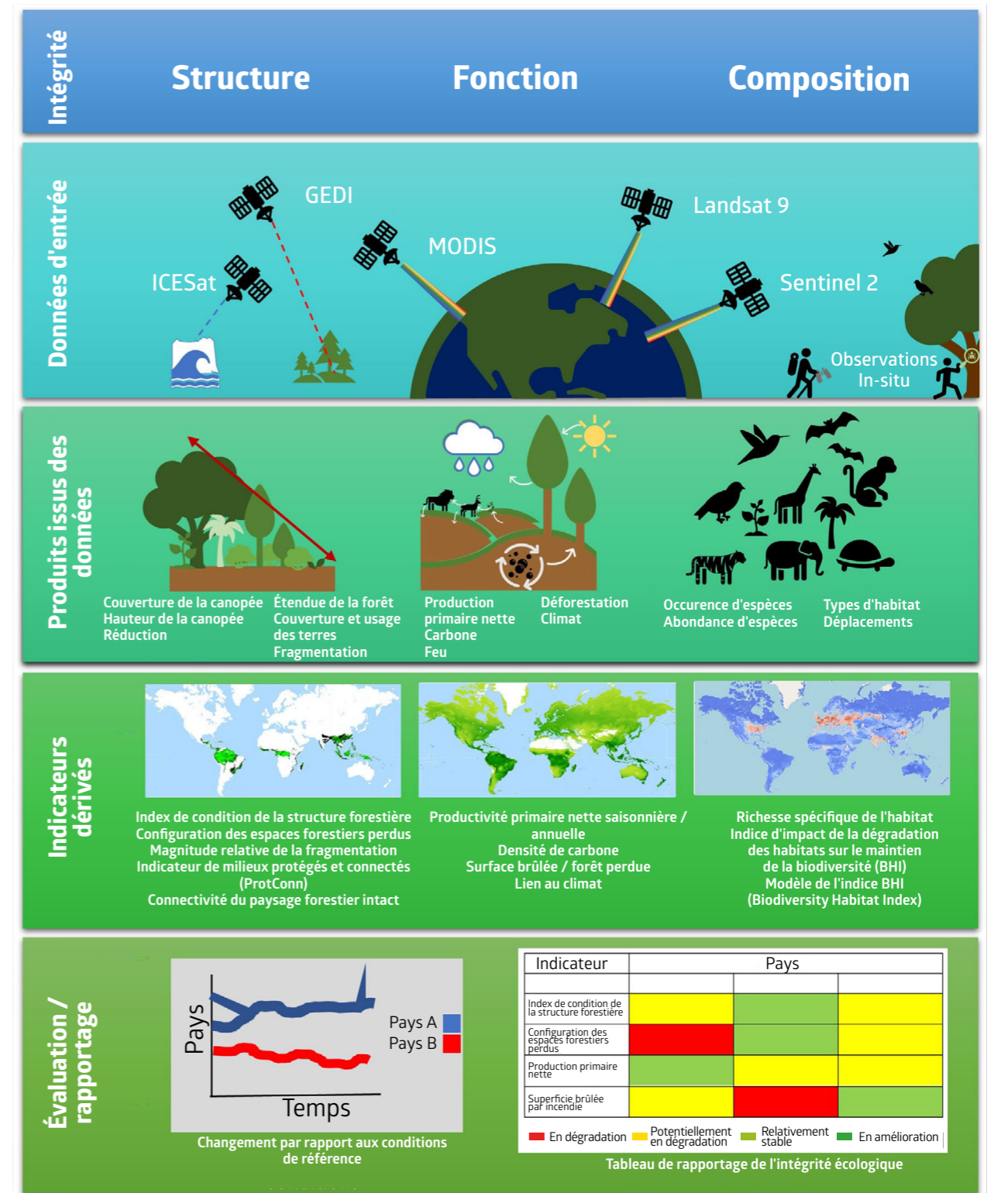
Encart n°1.2 – Approche pour le suivi des indicateurs de l'intégrité des écosystèmes. D'après Hansen et al., 2021.

Pour suivre efficacement les tendances temporelles de l'intégrité des écosystèmes, quatre composantes sont nécessaires : une définition claire, des indicateurs sélectionnés sur la base de critères cohérents, des états de référence et une infrastructure permettant un suivi régulier.

Ici, l'intégrité d'un écosystème est caractérisée par la structure, la fonction et la composition. La télédétection peut fournir des produits (issus de données satellitaires) à haute résolution et de grande qualité sur ces trois composantes. Ces produits sont combinés ou utilisés comme données d'entrée dans les modèles afin de dériver des indicateurs d'ordre supérieur. L'évolution temporelle par rapport aux états de référence est analysée afin d'évaluer les tendances des indicateurs. Ces types de résultats peuvent être rapportés dans des formats facilement interprétables par les décideurs politiques.

Le schéma présenté ici se concentre sur les mesures directes ou modélisées des propriétés spécifiques des écosystèmes et non sur les mesures de la pression humaine.

Encart n°1.2 – Approche pour le suivi des indicateurs de l'intégrité des écosystèmes. D'après Hansen et al., 2021. (suite)



Composant de l'écosystème / indicateur	Description	Données d'entrée	Résolution spatiale / temporelle	Citation / Source de données	Potentiel d'indicateur d'IE
Structure de l'écosystème					
Forest Structural Condition Index (FSCI)	Structure de la végétation dans les peuplements forestiers. Les données d'entrée comprennent le couvert végétal, la hauteur du couvert et le temps écoulé depuis la perturbation. Les niveaux élevés de l'indice dénotent des forêts hautes, étagées et anciennes, connues pour soutenir des niveaux élevés de biodiversité, de stockage de carbone et de services écosystémiques. Disponible pour les forêts humides pantropicales, il pourrait bientôt être généré pour les forêts du monde entier grâce à de nouvelles données sur la hauteur des arbres (Dubayah <i>et al.</i> , 2020).	Landsat Sentinel-2 ICESAT-2	30 m 2012-2019 Forêts tropicales	Hansen <i>et al.</i> , 2019	
Lost Forest Configuration (LFC)	Indice de la mosaïque actuelle des zones forestières par rapport au potentiel naturel des forêts sans modification humaine importante. La configuration potentielle a été dérivée sur la base des endroits où les forêts pourraient potentiellement croître si les sols et le climat étaient les seuls facteurs limitants (Laestadius <i>et al.</i> , 2011). L'indice LFC est utile pour mesurer la fragmentation des forêts et pour alimenter l'indice d'intégrité des paysages forestiers (Forest Landscape Integrity Index)(Grantham <i>et al.</i> , 2020).	Laestadius <i>et al.</i> , 2011	300 m 2019 projets de mises à jour annuelles	Grantham <i>et al.</i> , 2020	
Surface forestière en proportion de la superficie totale*	Proportion de la zone avec un couvert forestier >30% et >5 m de hauteur.			Hansen <i>et al.</i> , 2013	Élevé : globale, à fine échelle, répétée (2000-2020), référencée à 2000.
Relative Magnitude of Fragmentation (RMF)	Changement dans la fragmentation des écosystèmes au cours des 27 dernières années au niveau mondial, à une résolution spatiale de 300 m. La RMF est calculée à l'aide d'un indicateur local d'association spatiale, basé sur l'entropie (Naimi 2020).			https://portal.geobon.org	
Protected Connected Indicator* (ProtConn)	Pourcentage de terres protégées connectées dans un pays ou une écorégion donné(e) et différenciation entre les catégories de terres connectées non protégées, protégées et transfrontalières.		Disponible à l'échelle globale tous les deux ans, de 2010 à 2018.	Saura <i>et al.</i> , 2019 https://www.bipindicators.net/	Moyen : global, à échelle intermédiaire, un an (2016), pas de point de référence.
Connectivités des Intact Forest Landscapes (IFL)	Mesure des mouvements potentiels d'animaux entre de grands paysages forestiers intacts peu perturbés (IFLs) dans les tropiques. En raison de leur grande taille et de l'absence de perturbations, les paysages forestiers intacts sont plus susceptibles que les autres forêts de maintenir des populations d'espèces des forêts intérieures. Les zones à forte connectivité sont celles qui présentent un couvert arboré important entre de grandes parcelles où de nombreux corridors se chevauchent.		Disponible pour 2000-2018.	Jantz <i>et al.</i> In Review	

Composant de l'écosystème / indicateur	Description	Données d'entrée	Résolution spatiale / temporelle	Citation / Source de données	Potentiel d'indicateur d'IE
Fonctionnement de l'écosystème					
MODIS Net Primary Productivity (NPP)	Quantité de nouvelle biomasse produite par les plantes vertes par photosynthèse. Elle est importante pour le flux d'énergie de l'écosystème, la dynamique du carbone, l'alimentation des consommateurs et des décomposeurs, la récupération à l'issue de perturbations et le cycle des nutriments. Disponible mensuellement pour la période 2000-présent. Peut être résumée sous formes de cumul annuel, minimum mensuel annuel et coefficient de variation mensuel, chacun étant pertinent pour des variables de réponse écologique particulières (Radeloff <i>et al.</i> , 2019).	MODIS	1 km	Running <i>et al.</i> , 2004 Scurlock and Olson, 2013	
Appropriation humaine de la NPP*	NPP mesurée <i>via</i> le NDVI, moins la NPP utilisée par l'humain ou le bétail ET la NPP perdue en raison de changements d'utilisation des sols.			Haberl <i>et al.</i> , 2014	Faible : Globale, à fine échelle, un an (2018), faible précision potentielle, référencé par rapport aux états « naturels ».
Densité de carbone en surface et dans le sous-sol	Carte mondiale harmonisée du stockage du carbone terrestre, en surface et en sous-sol, dans la biomasse et le sol pour l'année de référence 2010. Élaborée en superposant des cartes de la biomasse établies par satellite et en attribuant proportionnellement leurs estimations à des types spécifiques de couverture terrestre basés sur le pourcentage de couverture arborée, de couverture terrestre « thématique » et un arbre de décision avec des règles. Peut être utilisé pour tenir compte des divers stocks de carbone végétal dans les analyses globales et les inventaires de gaz à effet de serre.			Spawn <i>et al.</i> , 2020	
MODIS Area Burned	Under current future climatic projection, incorporation of fire into assessment of ecosystem function is imperative. Informations sur les incendies et des caractéristiques qualitatives, y compris la date et l'étendue spatiale des feux. Disponibles mensuellement à l'échelle mondiale à une résolution spatiale de 250 m. Les mesures comprennent le jour estimé de la première détection, le niveau de confiance et le type de couverture terrestre brûlée. Les intervalles de retour des incendies et le pourcentage de surface brûlée peuvent indiquer l'intégrité de l'écosystème lorsque les intervalles et les pourcentages s'alignent sur une plage de variations historiques. Dans le cadre des projections climatiques actuelles, il est impératif d'intégrer les incendies dans l'évaluation du fonctionnement des écosystèmes.	MODIS	250 m 2000-2020	Chuvieco <i>et al.</i> , 2018	

Composant de l'écosystème / indicateur	Description	Données d'entrée	Résolution spatiale / temporelle	Citation / Source de données	Potentiel d'indicateur d'IE
Perte du couvert arboré	Zones de déforestation à l'échelle mondiale à une résolution de 30 mètres. La perte indique l'élimination ou la mortalité du couvert forestier et peut être due à une variété de facteurs, y compris l'exploitation mécanique, les incendies, les maladies ou les dégâts causés par les tempêtes. Les données sont disponibles pour la période 2000-2019 et sont mises à jour chaque année.			Hansen <i>et al.</i> , 2013 https://www.globalforestwatch.org/	
Connectivité climatique	Potentiel, pour des espèces tropicales, d'atteindre des climats futurs analogues. Elle est dérivée de la température actuelle de la parcelle d'origine moins la température future de la parcelle de destination et est liée à la déforestation et à la capacité de la configuration paysagère à permettre le déplacement des espèces face à un climat en évolution dynamique. Disponible pour les forêts humides pantropicales de 2000 à 2012.			Senior <i>et al.</i> , 2019	
Composition de l'écosystème					
Species Habitat Index par groupe	Diminution moyenne de l'habitat approprié et des populations d'espèces d'amphibiens, d'oiseaux et de mammifères, et modification de l'intégrité écologique des écosystèmes qui en résulte. Les espèces sont modélisées individuellement sur la base de facteurs biophysiques et de changements dans l'utilisation des terres. L'indice varie de 0 à 100, les valeurs les plus faibles indiquant une moindre intégrité. Il peut être exprimé pour des sites, des pays et des sous-ensembles pour représenter des ensembles taxonomiques ou écologiques spécifiques d'espèces, par exemple celles qui dépendent des forêts.	Landsat MODIS	1 km 2000-2018	Power and Jetz, 2019 Jetz <i>et al.</i> , 2019	Élevé : global, à fine échelle, répété (2000-2000), potentiellement référencé par rapport à des états « naturels ».
Local Biodiversity Intactness Index* (LBII)	L'indice BII est l'abondance moyenne d'un ensemble important, taxonomiquement et écologiquement diversifié d'espèces naturellement présentes dans une zone terrestre, par rapport à référence présentant des impacts humains minimes. L'indice LBII estime la quantité de biodiversité « originelle » d'un site terrestre subsistant face à l'utilisation humaine et les pressions associées. Il exprime l'abondance moyenne et la richesse spécifique des espèces présentes à l'origine, pour un large éventail d'espèces végétales, invertébrées et vertébrées, par rapport à l'abondance dans un habitat non perturbé.	PREDICTS 4 land Utiliser les calques	1 km 2001-2020	Newbold <i>et al.</i> , 2016 https://www.bipindicators.net/	Élevé : global, à fine échelle, sur la période 2000-2014, référencé par rapport à des états « naturels ».

Composant de l'écosystème / indicateur	Description	Données d'entrée	Résolution spatiale / temporelle	Citation / Source de données	Potentiel d'indicateur d'IE
Biodiversity Habitat Index* (BHI)	Proportion de la diversité gamma conservée dans toute unité spatiale spécifiée, calculée en combinant la meilleure cartographie disponible de l'intégrité de l'écosystème avec la modélisation de la diversité bêta. Disponible pour trois grands groupes biologiques (plantes, invertébrés, vertébrés).	Intégrité de l'écosystème local (cellules de 1 km) Diversité bêta modélisée (basée sur les relevés d'occurrence des espèces et les surfaces environnementales abiotiques)	1 km 2005-2015 (et mise à jour 2020)	Hoskins <i>et al.</i> , 2020 ; Mokany <i>et al.</i> , 2020 https://www.bipindicators.net/	Moyen : Global, à fine échelle, un an (2016), potentiellement actualisable, référencé par rapport à des états « naturels ».
Bioclimatic Ecosystem Resilience Index (BERI) Combinaison d'éléments de structure et de composition de l'écosystème	Évalue l'ampleur avec laquelle une configuration spatiale donnée d'habitat naturel favorisera ou entravera les changements de répartition biologique induits par le climat. Calculé comme la connectivité de chaque cellule aux zones d'habitat naturel du paysage environnant qui, selon les projections, devraient favoriser une composition d'espèces similaire, dans le cadre du changement climatique, à celle actuellement associée à la cellule focale.	Intégrité de l'écosystème local (of 1 km cells) Diversité bêta modélisée (basée sur les relevés d'occurrence des espèces et les surfaces environnementales abiotiques) Scénarios climatiques plausibles	1 km 2005-2015 (et mise à jour 2020)	Ferrier <i>et al.</i> , 2020	
Distribution des espèces					
Indice « Liste Rouge* »	Risque de déclin de population et statut de menace basés sur des données et des dires d'experts				Faible : global, échelle grossière, annuel, pas directement lié à l'état écologique, pas de point de référence.
Abondance de population					
Living Planet Index*	Mesure de l'état de la diversité biologique mondiale basée sur les tendances démographiques des espèces vertébrées des habitats terrestres, d'eau douce et marins.			IUCN / BirdLife International	Faible : global, échelle grossière limitée par les données disponibles, mise à jour biannuelle, pas de point de référence.

FICHE

2

Une approche combinant structure, fonction et composition à différents niveaux d'organisation du vivant et des mesures de pressions anthropiques

Cette approche (Hill *et al.*, 2022) combine des mesures de propriétés des écosystèmes et de pressions anthropiques afin de calculer un « Index d'intégrité des écosystèmes terrestres » (*Ecosystem Integrity Index*, EII). La réflexion s'articule autour de quatre thèmes : le concept d'intégrité ; le calcul de l'EII à une échelle globale ; les utilisations possibles par les États, les entreprises et les institutions financières, la complémentarité de l'EII avec d'autres mesures et indicateurs de biodiversité.

Cette approche vise à appuyer les politiques publiques destinées à limiter l'altération du vivant, et particulièrement le Cadre mondial post-2020 pour la biodiversité. Au-delà des États chargés de mettre en œuvre le cadre, elle vise aussi à fournir un outil pratique aux acteurs du secteur privé pour faire converger économie mondialisée et objectifs en faveur de la biodiversité. Deux collectifs mondiaux ont notamment exprimé le besoin d'une mesure de l'intégrité des écosystèmes liée au cadre mondial pour la biodiversité, facilement utilisable par les entreprises et les institutions financières pour fixer des objectifs, suivre les évolutions et publier des informations probantes : le Science Based Targets Network (SBTN)¹ et la Task Force for Nature-related financial Disclosure (TNFD)².

Définition de l'intégrité

L'intégrité des écosystèmes est ici définie comme l'amplitude dans laquelle la composition, la structure et la fonction d'un écosystème s'inscrivent au sein de leur gamme naturelle de variation. Le EII est ainsi un indicateur de leurs évolutions par rapport à un état de référence naturel ou potentiel, actuel, de l'écosystème (voir Encart n°2).

États de référence

Les états de référence correspondent ici à ceux de populations de grandes zones protégées, utilisées comme substitut, comme proxy des populations, comme différence entre deux zones ou deux périodes, ou encore passent par la modélisation de conditions naturelles.



1. Ce collectif d'ONG, d'associations professionnelles et de cabinets de conseil 1/ élabore des méthodes pour évaluer les impacts et dépendances à la nature et à l'environnement, fixer des objectifs et des indicateurs destinés aux entreprises et aux villes afin qu'elles répondent aux besoins de la société tout en respectant dans les limites planétaires, qu'elles suivent et rendent compte de leurs progrès en accord avec les principales politiques mondiales en faveur de l'environnement (climat, désertification biodiversité) et 2/ promeut l'intégration d'objectifs basés sur la science dans les marchés financiers. Ces objectifs, basés sur la science, concernent, outre le climat, l'eau, les sols, la biodiversité et les océans. (<https://sciencebasedtargetsnetwork.org/> - consulté le 5 juillet 2024)

2. Ce groupe de travail, composé de membres représentant des institutions financières, des entreprises de biens et services, développe un cadre de gestion et de déclaration des risques permettant aux organisations d'identifier, d'évaluer, d'agir - voire de divulguer - sur leurs risques liés à la nature pour, *in fine*, orienter les flux financiers mondiaux vers des effets positifs pour la nature. Ce cadre est axé sur le marché financier, s'appuie sur des instances et des données scientifiques (concepts, méthodes, métriques, cibles, données existants) et postule que la perte de nature est un risque pour les entreprises et les institutions financières et que les investissements favorables à la nature constituent des opportunités. (<https://tnfd.global/> - consulté le 5 juillet 2024)

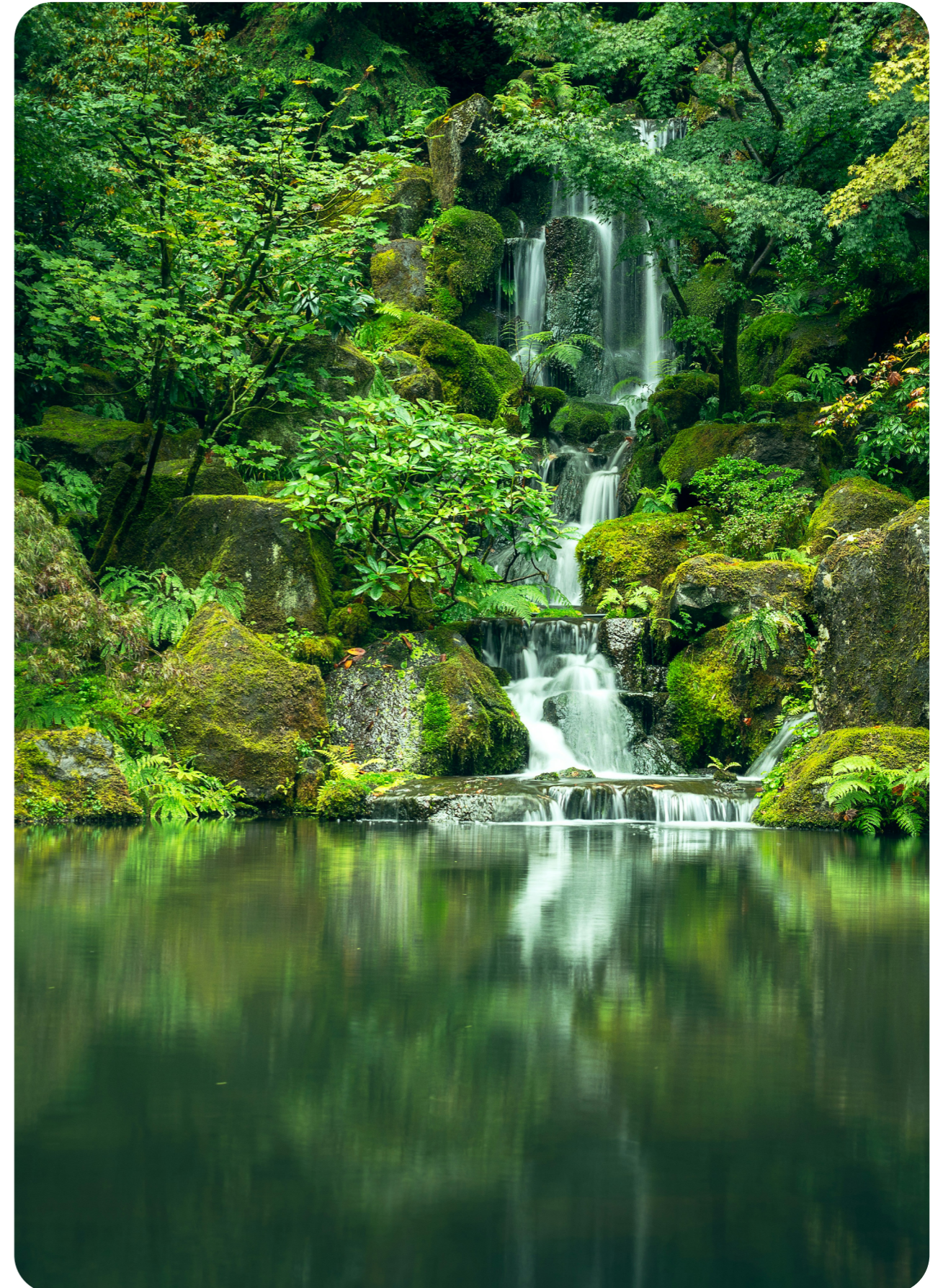
Encart n°2 – Les différentes composantes de l'Index d'Intégrité des Écosystèmes terrestres (EII). D'après Hill *et al.*, 2022 (pre-print).

L'Index d'Intégrité des Écosystèmes terrestres (EII) quantifie la dégradation de l'intégrité d'un écosystème sur la base d'une agrégation de ses trois composantes. Ces composantes sont interdépendantes et peuvent covarier sous l'effet, notamment, de pressions anthropiques. Les cartes d'EII sont destinées à être mise à disposition *via* l'UNBiodiversityLab qui fournit de nombreuses informations spatialisées, à l'échelle mondiale, pour l'aide à la décision.

Pour calculer l'EII, plusieurs données spatialisées sont utilisées :

- La structure correspond à la configuration tri-dimensionnelle des écosystèmes, aux éléments biotiques et abiotiques qui forment une matrice hétérogène. Dans le calcul de l'EII, la structure dépend de la superficie, de la qualité et de la fragmentation de l'habitat (attributs d'un habitat indemne). Sa mesure est dérivée de 12 couches spatiales de caractéristiques liées à des pressions anthropiques, notamment la densité de population, les zones bâties, les zones d'agriculture, les routes et chemins de fer, les zones d'exploitation minière, de puits de pétrole, d'installations éoliennes et électriques – condensées en une couche unique « d'index de modification humaine » (Human Modification Index - Kennedy *et al.*, 2019). Cette couche est ensuite utilisée avec l'algorithme décrit par Beyer *et al.* (2019) qui prend en compte le caractère indemne de l'habitat à l'intérieur d'une cellule d'une grille de 1 km de côté ainsi que l'influence de la qualité de l'habitat dans les cellules voisines. Il en résulte une couche finale qui comprend les impacts de la fragmentation du paysage ainsi que l'intégrité locale.
- La composition est relative à la constitution biotique des écosystèmes, aux espèces, communautés et interactions afférentes. Dans le calcul de l'EII, elle traite de l'identité et la diversité du vivant. La métrique de cette couche est l'index d'intégrité de la biodiversité » (biodiversity intactness index, BII - Scholes et Biggs, 2005). Le BII est calculé à l'aide de deux modèles en utilisant des données de la base PREDICTS (Hudson *et al.*, 2016) (le premier évalue l'impact des pressions humaines sur l'abondance totale des espèces au sein d'une communauté, le second la similarité entre l'abondance relative des espèces d'une communauté dans un paysage non naturel versus un paysage naturel) (Hill *et al.*, 2018).
- La fonction réfère aux processus écologiques et aux services écosystémiques qui en découlent. Dans le calcul de l'EII, la composante fonctionnelle est estimée en utilisant la différence entre la productivité primaire nette (net primary productivity, NPP) potentielle, comme référence « naturelle » et celle actuelle, à l'intérieur de chaque cellule d'une grille de 1 km de côté. Les valeurs de NPP actuelle sont issues de données de télédétection et celles de la NPP potentielle sont modélisées.

Les trois couches obtenues sont alors combinées pour former l'EII dont la valeur correspond au score le plus bas de ces trois couches pour chaque cellule de la grille (approche dite « de la valeur minimale ») car l'intégrité d'un écosystème ne peut être supérieure au score minimal d'une de ses composantes. L'EII varie entre 0 et 1, les zones les plus dégradées ayant un score proche de zéro. Un seuil peut être établi afin de distinguer les écosystèmes « intègres ». Une des limites de l'EII est qu'il ne quantifie pas les pertes d'intégrité des écosystèmes dues au changement climatique.



FICHE 3

Une approche basée sur le triptyque « surface », « intégrité » et « risque d'effondrement » des écosystèmes

Cette approche (Nicholson *et al.*, 2021) s'ancre dans les travaux dits « liste rouge des écosystèmes »¹ développés par l'Union internationale de conservation de la nature (UICN). Elle vise à appuyer les politiques publiques destinées à limiter l'altération du vivant, et particulièrement le Cadre mondial post-2020 pour la biodiversité, en permettant d'inclure, à côtés d'objectifs de conservation et de restauration liés aux espèces et aux habitats, un objectif lié aux écosystèmes – ces derniers étant essentiels au maintien des espèces, aux processus et aux fonctions écologiques, aux contributions de la nature à l'homme. L'intégrité sert ainsi à documenter l'état et les pertes de biodiversité, à fixer des objectifs de restauration, à mettre en évidence la valeur de la conservation de zones intactes.

Définition de l'intégrité

Dans cette approche, l'intégrité des écosystèmes est définie comme le degré de ressemblance d'un écosystème contemporain à ses états de référence pour la structure (organisation spatiale verticale, connectivité, fragmentation, substrats...), le fonctionnement (productivité, régime de perturbations, cycles des nutriments, phénologie, interactions, dispersion, échanges avec d'autres entités...) et la composition (richesse, diversité, abondance, biomasse...). Les écosystèmes recouvrant leurs caractéristiques écologiques et propriétés après



1. La liste rouge des écosystèmes de l'UICN évalue leur risque relatif d'effondrement et les classe selon des catégories de risque (par ex. « en danger », « vulnérable », etc.) sur la base de cinq critères : perte de superficie ; distribution restreinte ; changement dans l'environnement ou les processus abiotiques ; changement dans les composants et processus biotiques ; estimation quantitative du risque sur la base d'un modèle probabiliste – Voir Keith *et al.*, 2013 et <https://iucnrle.org/>
2. Moment où les écosystèmes perdent leurs caractéristiques.

la plupart des changements environnementaux, des perturbations (dynamiques naturelles ou perturbations anthropiques) sont dits « résilients », les autres sont « dégradés » (par rapport à l'état avant la perturbation).

Outre l'intégrité, la réflexion articule plus largement deux autres notions relatives aux écosystèmes :

- La surface (ou étendue, ou distribution) dont la réduction diminue la diversité des niches écologiques, la disponibilité des ressources, la capacité d'accueil, etc. et affecte, *in fine*, l'intégrité.
- Le risque d'effondrement² qui confère aux notions de « surface » et « d'intégrité » une dimension prospective et probabiliste et permet d'en repérer les baisses inacceptables, d'éclairer les priorités de conservation, d'estimer les effets des mesures prises.

Ces notions sont utilisées dans le cadre de la théorie du changement (voir Encart n°3).

États de référence

Les états de référence correspondent ici à ceux de populations de grandes zones protégées, utilisées comme substitut, comme proxy des populations, comme différence entre deux zones ou deux périodes, ou encore passent par la modélisation de conditions naturelles.

Indicateurs

Une série d'indicateurs est analysée (voir Tableau n°2) pour leur capacité à documenter effectivement les états et tendances des écosystèmes et à rendre ainsi compte des progrès réalisés pour atteindre un objectif en faveur des écosystèmes. Les auteurs effectuent également des recommandations pour leur développement et leur utilisation (Nicholson *et al.*, 2021, pour la définition des termes utilisés, la description des indicateurs et leurs références : voir supplementary information Table 2 de l'article).

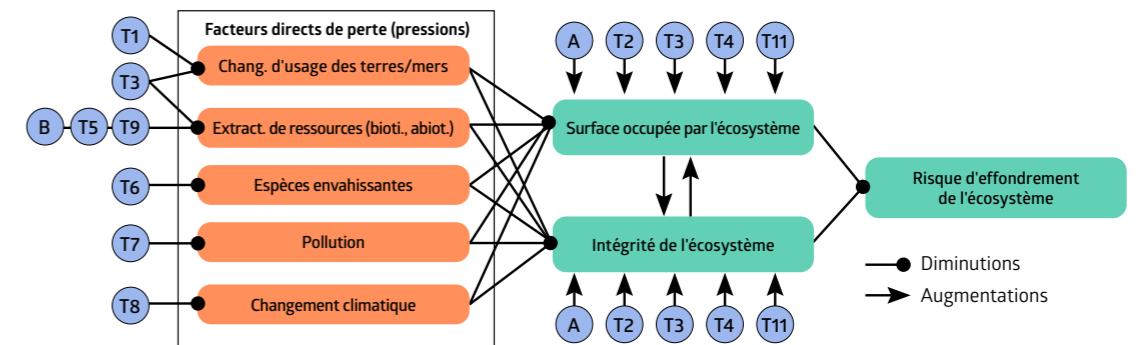
Encart n°3 – La « théorie du changement » : un cadre pour définir des actions dirigées vers un objectif en faveur des écosystèmes. D'après Nicholson *et al.*, 2021.

La « théorie du changement » permet une modélisation conceptuelle des étapes à suivre pour atteindre un objectif en rendant explicite les hypothèses des relations de causes à effets ; en clarifiant ce qui relève des actions, des jalons, des cibles intermédiaires à atteindre ; en mettant en évidence, logiquement, l'ensemble des actions nécessaires. Elle est ici appliquée pour définir un objectif en faveur des écosystèmes - dans le cadre d'une politique en faveur de la biodiversité, notamment le cadre mondial post-2022 pour la biodiversité.

Ici, le modèle, simplifié, décrit les relations entre les facteurs directs de perte de biodiversité (orange) et la superficie, l'intégrité, le risque d'effondrement - composantes de l'objectif à atteindre (vert). Ces facteurs provoquent une diminution de l'intégrité et de la superficie d'un écosystème donné, augmentant alors son risque d'effondrement. Le déclin de l'intégrité peut également conduire à l'effondrement local d'un écosystème, diminuant ainsi la superficie globale de cet écosystème. Une diminution de la superficie peut elle aussi diminuer l'intégrité. Les actions orientées vers l'objectif, la cible, en en faveur des écosystèmes (bleu) doivent permettre de 1/ réduire les facteurs directs ou leurs impacts, c'est-à-dire réduire les pressions pour réduire les pertes de biodiversité (cercles bleus à gauche) et 2/ augmenter la superficie et/ ou l'intégrité par des actions de restauration et de réhabilitation. A et B mettent l'accent sur des actions particulièrement orientées vers l'objectif en faveur des écosystèmes.

Encart n°3 – La « théorie du changement » : un cadre pour définir des actions dirigées vers un objectif en faveur des écosystèmes. D'après Nicholson *et al.*, 2021 (suite)

Dans ce modèle simplifié, les facteurs indirects, les rétroactions socio-écologiques, les liens avec les services écosystémiques et les relations avec d'autres objectifs du cadre mondial ne sont pas explicités. Enfin, pour aller plus loin, des modèles quantitatifs, associant des scénarios de changements globaux et des stratégies de gestion, pourraient être réalisés pour évaluer la faisabilité et l'efficacité.



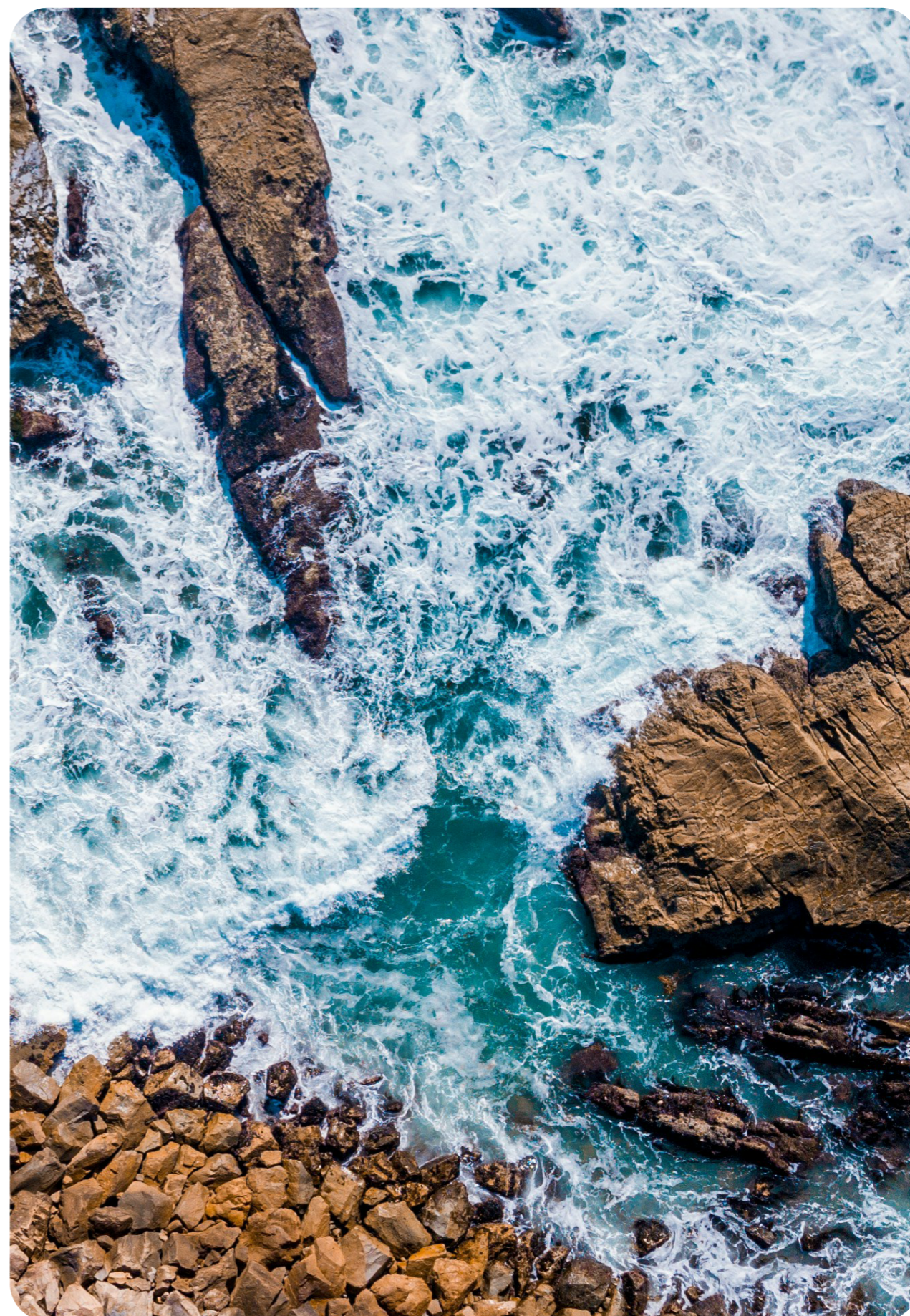
Cible	Périmètre de la cible	Exemples d'actions
T1	Conserver la superficie et l'intégrité de l'écosystème	Planification, réglementation et mesures incitatives pour s'attaquer aux changements d'utilisation des terres et de la mer
T2	Restaurer la superficie et l'intégrité de l'écosystème	Restauration de l'environnement/des processus abiotiques (tels que les écoulements et les régimes d'incendie) et des composantes biotiques (telles que le semis direct, la plantation, le réensauvagement)
T3	AP et AMCEZ élargies et efficaces	Prévenir de nouvelles pertes grâce à la réglementation ; accroître l'intégrité et la superficie grâce à une gestion efficace des AP/AMCEZ actions de gestion et de restauration.
T4	Gestion de la restauration d'espèces sauvages	Gestion <i>in-situ</i> des espèces, y compris avec des mesures de restauration, de réintroduction/ré-ensauvagement et de gestion des habitats.
T5	Prélèvement durable du biote	Gestion efficace de la pêche, de la chasse du gibier et des activités forestières
T6	Gestion des espèces invasives	Prévenir les nouvelles introductions, réduire la propagation, éradiquer ou contrôler les espèces envahissantes pour éliminer ou réduire les impacts
T7	Réduction de la pollution à des niveaux qui ne nuisent pas à la biodiversité et au fonctionnement des écosystèmes	Réduire l'excès de nutriments, les biocides (tels que les pesticides) et les déchets plastiques
T8	Réduire l'excès de nutriments, les biocides (tels que les pesticides) et les déchets plastiques	Solutions fondées sur la nature et gestion des écosystèmes pour aller vers des écosystèmes résilients, la réduction et l'atténuation des risques de catastrophe (comme la séquestration du carbone)
T9	Assurer des bénéfices grâce à une gestion durable des espèces sauvages	Chevauchement avec T4 : gestion des pêches, chasse de gibier, prélèvement
T11	Solutions fondées sur la nature pour les services écosystémiques	Restaurer et protéger les écosystèmes pour soutenir les services de régulation
A	Gestion des écosystèmes	Gestion/régulation des incendies et des écoulements/niveaux d'eau (plutôt que restauration)
B	Exploitation durable des composants abiotiques de l'écosystème	Prélèvement d'eau (actuellement pas inclus explicitement dans les objectifs)

AP = aires protégées
AMCEZ = Autres mesures de conservation efficaces par zone



TABLEAU N°2 : INDICATEURS ANALYSÉS

Indicateurs	Risque d'effondrement	Superficie	Intégrité : composition	Intégrité : structure	Intégrité : fonction	Facteurs de changement	Marin	Eau douce	Terrestre	ascendants / descendants	Pertinence	Performance testée	Couverture des évolutions à l'échelle mondiale	Recommandations d'utilisation et de développement ultérieur pour permettre un appui adapté à un objectif écosystémique
Index Liste Rouge des écosystèmes	+						+	+	+	↕	+	+	×	Seul indicateur du risque d'effondrement, mais les données sont insuffisantes ; nécessité d'investir dans la couverture en données (une réévaluation est nécessaire pour quantifier les tendances)
Changement des écosystèmes humides au cours du temps		+						+		↕	+	-	+	Des tests supplémentaires de performance sont nécessaires ; indicateur prêt à l'emploi.
Couverture forestière continue des mangroves à l'échelle mondiale		+	+				+			↓	+	-	+	Spécifique aux mangroves ; des tests supplémentaires de performance sont nécessaires ; indicateur prêt à l'emploi.
<i>Ecosystem Area Index</i>		+					+	+	+	↕	+	+	-	Données disponibles pour certains pays/régions pour les indicateurs de type <i>bottom-up</i> , mais pas à l'échelle mondiale ; investissements nécessaires dans la couverture en données.
Superficie forestière en proportion de la superficie totale du territoire		+							+	↑	×	-	+	Spécifique aux forêts (y compris anthropisées) ; recherches nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
Observatoire mondial des mangroves (<i>Global Mangrove Watch</i>)		+					+			↓	+	-	+	Spécifique aux mangroves ; des tests supplémentaires de performance sont nécessaires ; indicateur prêt à l'emploi.
Tendances d'évolution de l'étendue de la forêt primaire		+						+		↑	+	-	+	Spécifique aux forêts (y compris anthropisées) ; recherches nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
<i>Tree Cover Loss</i> (observatoire mondial des forêts)		+						+		↓	×	-	+	Spécifiques aux forêts (y compris anthropisées et les mangroves) ; recherches nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
<i>Wetland Extent Trends Index</i>		+					+	+		↓	+	-	+	Spécifique aux zones humides ; des tests supplémentaires de performance sont nécessaires ; indicateur prêt à l'emploi.
<i>Bioclimatic Ecosystem Resilience Index</i>			+	+				+		↓	×	×	+	Mieux aligné avec les objectifs de la résilience au changement climatique ; recherches nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
<i>Biodiversity Habitat Index</i>			+					+		↓	×	×	+	Des recherches sont nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
<i>Biodiversity Intactness Index</i>			+					+		↓	×	-	+	Des recherches sont nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
<i>Living Planet Index</i>			+				+	+	+	↓	×	+	+	Mieux aligné avec des objectifs liés aux espèces ; recherches nécessaires pour comprendre la pertinence et les seuils importants.
<i>Mean Species Abundance</i>			+				+	+	+	↓	×	×	+	Mieux aligné avec des objectifs liés aux espèces ; recherches nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
Index Liste Rouge des écosystèmes			+				+	+	+	↕	-	+	+	Mieux aligné avec des objectifs liés aux espèces ; recherches nécessaires pour comprendre la pertinence et les seuils importants.
<i>Species Habitat Index</i>			+					+		↓	×	×	+	Mieux aligné avec des objectifs liés aux espèces ; recherches nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
<i>Ecosystem Intactness Index</i>				+				+		↓	×	-	+	Des recherches sont nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
<i>Forest Landscape integrity Index</i>				+				+		↓	×	×	-	Spécifique aux forêts ; investissements nécessaires dans la couverture en données ; recherches nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
Couverture vive via <i>Vegetation Continuous Fields</i>				+				+		↓	×	-	+	Des recherches sont nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
<i>Ecosystem Health Index</i>			+	+	+		+	+	+	↕	+	+	-	Données spécifiques aux écosystèmes disponibles pour certains pays/régions mais pas à l'échelle mondiale ; investissements nécessaires dans la couverture en données.
<i>Live Coral Cover</i>					+		+			↓	+	+	+	Spécifique aux coraux ; indicateur prêt à l'emploi.
Surface de terres dégradées en proportion de la superficie totale du territoire					+			+		↑	×	-	+	Des recherches sont nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
<i>Vegetation Health Index</i>					+			+		↓	×	-	+	Des recherches sont nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
Turbidité de l'eau et une estimation du <i>Trophic State Index</i>					+			+		↓	+	-	+	Spécifique aux lacs ; davantage tester la performance ; indicateur prêt à l'emploi.
Observatoire des récifs coralliens (<i>Coral Reef Watch</i>)							+	+		↓	+	+	+	Spécifique aux coraux ; mieux aligné avec les objectifs de la résilience au changement climatique ; indicateur prêt à l'emploi.
<i>Human Footprint</i>							+		+	↓	×	-	+	Mieux aligné avec des objectifs relatifs à l'usage des terres ; recherches nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
<i>Marine Cumulative Human Impacts</i>							+	+		↓	-	-	+	Mieux aligné avec des objectifs relatifs à l'usage des mers ; recherches nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.
<i>Ocean Health Index</i>							+	+		↕	×	-	+	Mieux aligné avec des objectifs relatifs à l'usage des mers (changement d'usage, usage durable) ; recherches nécessaires pour comprendre la pertinence et tester la performance.



FICHE

4

Une approche combinant structure et processus à l'échelle des écosystèmes

Cette approche (Haase *et al.*, 2017, adaptée de Müller *et al.*, 2000 ; Müller, 2005) s'appuie sur des propriétés des écosystèmes pour identifier, à travers un ensemble de variables ciblées sur leurs structures (diversité biotique, hétérogénéité abiotique) et leurs processus (bilans en eau, énergie, matière), les changements de biodiversité. Cette approche est notamment utilisée au sein du réseau International long-term ecological research (ILTER), réseau de sites dédiés au suivi écologique sur le long terme et à la recherche.

Définition de l'intégrité

L'intégrité des écosystèmes représente ici la capacité de ces derniers à s'auto-organiser¹ - compte tenu de propriétés thermodynamiques, de réseaux d'interactions, d'emboîtements d'échelles spatio-temporelles, etc. - et reflète l'idée de « durabilité » d'un point de vue écologique.

La réflexion s'ancre principalement dans les caractéristiques structurelles et fonctionnelles des écosystèmes (voir Encart n°4.1).

Plus largement, les auteurs soulignent la complémentarité de cette approche avec celle des « variables essentielles de biodiversité », ensemble minimal de paramètres à mesurer pour surveiller l'état de la biodiversité, de l'échelle infraspécifiques aux écosystèmes (Pereira *et al.*, 2013) (voir Encart n°4.2).

États de référence

Dans les applications pratiques, les états de référence sont relatifs : il s'agit de comparer deux états (devenir d'un écosystème avec des usages des terres différents ; inter-comparaisons des indicateurs d'une année à l'autre...).

Indicateurs

Une vingtaine d'indicateurs d'intégrité est proposée (voir Tableau n°3) : ces indicateurs résument des informations relatives aux propriétés thermodynamiques, structurales, aux réseaux et aux interactions et peuvent être renseignés par des méthodes d'observation et de collecte de données traditionnelles. Ils sont organisés avec les variables, mesures et instrumentation pour la collecte de données recommandés pour suivre les différentes composantes de l'intégrité des écosystèmes pour différents environnements (terrestre, dulçaquicole, côtier). Une mise en regard des classes d'EBVs pouvant également être documentées est aussi réalisée (Haase *et al.*, 2017)



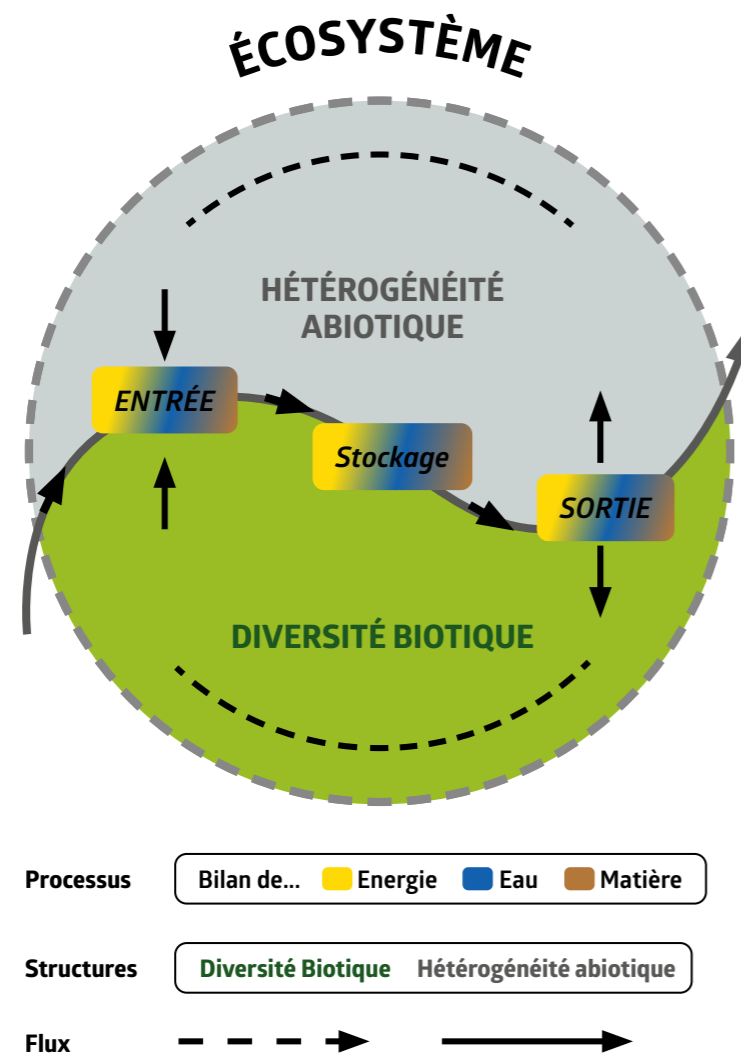
1. Les éléments microscopiques d'un système ouvert, désordonnés, non structurés et non orientés par des éléments extérieurs, composent des structures macroscopiques qui se manifestent par des gradients, des propriétés fonctionnelles collectives (issues de la somme de tous les éléments) et des propriétés fonctionnelles émergentes (qualités supplémentaires acquises à un niveau d'organisation supérieur, créées par les interactions du système et dépassant la somme de tous les éléments). L'auto-organisation découle de la relation étroite entre « structures » et « fonctions » et ses propriétés peuvent être caractérisées par des principes thermodynamiques (éloignement du point d'équilibre thermodynamique en créant des structures organisées et en stockant l'énergie exogène ; dégradation des gradients, ou structures supportant les processus fonctionnels, auto-organisés sous l'effet d'apport d'énergie exogène). Voir Müller et Fath, 1998 ; Kay, 1991.

Encart n°4.1 – Déclinaison théorique de l'intégrité des écosystèmes. D'après Haase *et al.*, 2017.

Le cadre de l'intégrité des écosystèmes présente une structure hiérarchique avec deux composantes primaires (structures des écosystèmes et processus écosystémiques) et cinq composantes secondaires imbriquées.

- La dimension structurelle comprend la diversité biotique (par ex. nombre de taxons choisis comme indicateurs) et l'hétérogénéité abiotique (par ex. type de sol, teneur en eau...).
- Les processus comprennent les bilans d'énergie, de matière et d'eau. Ces bilans peuvent être estimés sur la base des entrées (intrants), des stocks, des sorties (extrants) et d'autres variables d'état du système.

Les composantes structurelles décrivent essentiellement l'état du système, qui peut réagir à des pressions (par ex. changement climatique, changements d'usages des sols...), tandis que les composantes relatives aux processus reflètent directement les états et les pressions.



Crédits : UFZ - <https://www.ufz.de/1ter-d/index.php?en=43569&contentonly=1>

Encart 4.2 – Les variables essentielles de biodiversité : un cadre balayant les différents niveaux d'organisation du vivant

Le « Réseau d'observation de la biodiversité » (BON) du Groupe d'observation de la Terre (GEO), initiative mondiale, a fait émerger, en 2013, le concept de « variables essentielles de biodiversité » définies comme des « mesures nécessaires pour étudier, rapporter et gérer les changements de la biodiversité, en se concentrant sur l'état et la tendance des éléments de la biodiversité » (Pereira *et al.* 2013).

Une liste d'une vingtaine de variables, organisées en six classes et couvrant différents niveaux d'organisation du vivant a été proposée :

- Composition génétique (exemples de variables essentielles : diversité allélique, différenciation génétique des populations...).
- Populations d'espèces (exemples de variables essentielles : abondance des populations, structures des populations...).
- Traits de vie des espèces (exemples de variables essentielles : événements phénologiques, caractéristiques de comportement migratoire...).
- Composition des communautés (exemples de variables essentielles : diversité taxonomique, interactions spécifiques...).
- Fonctions des écosystèmes (exemples de variables essentielles : productivité primaire nette, régime de perturbations...).
- Structure des écosystèmes (exemples de variables essentielles : structure des habitats, étendue et fragmentation des habitats...).

La documentation de ces variables permet de représenter la biodiversité, construire des indicateurs, facilitant ainsi la « traduction » des données scientifiques sur la biodiversité en informations de contenu plus social, politique.

Ce cadre est décliné pour le climat et l'océan : les variables documentent alors l'évolution de paramètres clés du système climatique (précipitations, température, composition de l'atmosphère...) ou de l'océan (carbone organique dissout, abondance et distribution de poissons, étendue des mangroves et composition...).

Les échanges sur les variables et métriques correspondantes restent ouverts (par exemple : nombre d'individus, coloration des feuilles, domaine de tolérance thermique, salinité en surface, fréquence de feux, cartes de végétation...).

TABLEAU N°3 : INDICATEURS PROPOSÉS

Composants de l'IE et indicateurs de base		Variables / observations recommandées	Instrumentation et mesures sur site recommandées	Classe d'EBV	
Hétérogénéité abiotique	Habitats	Habitat / couverture	Cartographie des habitats, télédétection	Structure de l'écosystème	
	Sols	Teneur en humidité du sol / température	Mesures au delà des échelles, par ex. : capteurs de rayons cosmiques, réseau de capteurs sans fil, par ex. sondes Time Domain Reflectometry		
		Texture du sol, densité, pH, Corg	Inventaire des sols / cartographie des propriétés physiques et chimiques		
	Eau	Qualité de l'eau : température, pH, conductivité	Capteurs de qualité des eaux		
Air	Température de l'air, pression atmosphérique, rayonnement entrant à ondes courtes, vitesse et direction du vent, précipitations, humidité	Station climatique			
Diversité biotique	Faune	Abondance et identité...	... des oiseaux	Points de comptage / transects	Composition génétique, populations d'espèces, composition des communautés
			... des papillons	Transects	
			... des abeilles	Pièges combinés	
			... des carabes	Pièges à fosse	
			... des invertébrés benthiques	Échantillonnage multi-habitats	
	Richesse spécifique dans l'eau et le sol		eDNA (ADN environnemental ; détection d'espèces)		
	Diversité spécifique terrestre		Station multi-capteurs automatisée pour suivre la diversité spécifique terrestre (AMMOD) ; identification basée sur le <i>métabarcoding</i> de l'ADN		
Flore	Abondance des plantes vasculaires	Étude de la végétation pendant la période phénologique la plus appropriée			
Structure au sein de l'habitat	Structure verticale de la forêt (hauteur du peuplement, hauteur totale, diamètre)	Inventaires forestiers / télédétection	Structure de l'écosystème		
Bilan pour l'énergie	Concentration en CO ₂ , vapeur d'eau, albedo / bilan des radiations, flux thermique du sol, variables climatiques		Station avec système d'Eddy Covariance	Fonctionnement de l'écosystème	
	Surface foliaire (<i>Leaf Area Index</i> , LAI)		Capteur optique		
	Productivité primaire (biomasse au dessus de la surface)		Détection et télémétrie par la lumière (LiDAR) ; utilisation des données d'inventaires forestiers		
	Transpiration		Mesure du flux de sève		
Bilan pour la matière	Dépôt atmosphérique humide / sec / total		Échantillonneurs de dépôt		
	Rejet en eaux de surface ; coefficient d'absorption spectrale ; carbone organique dissout ; nutriments		Capteurs optiques ; sondes multiparamétriques		
	Chimie de l'eau des sols		Échantillonneurs de l'eau du sol et analyses		
Bilan pour l'eau	Écoulement : débit, température, pH, conductivité		Station hydrométriques (jaugeage, limnimétrie et mesures de variables physiques)		
	Eaux souterraines : niveau, température, conductivité spécifique		Stations souterraines		
	Égouttements et ruissellements		Échantillonneurs et collecteurs		
	Épaisseur de neige		Senseurs optiques		



FICHE 5

Une approche combinant propriétés des écosystèmes et pressions humaines

Cette approche s'appuie sur des propriétés des écosystèmes, des mesures de la diversité biologique aux niveaux espèces et populations, et des mesures de pressions humaines.

Elle est développée dans la [Directive cadre Stratégie pour le milieu marin](#) (DCSMM, 2008) dont l'objectif principal est le « bon état écologique des eaux » (Good Ecological Status, GES) défini à l'article 3. Cette approche est utilisée pour la politique maritime de l'Union européenne et s'applique à l'ensemble des pays européens dotés d'une façade littorale.

Définition de l'intégrité

La sémantique est ici différente car il s'agit de définir le bon état écologique. Celui-ci, défini à l'échelle de la région ou de la sous-région marine, est « l'état écologique des eaux marines tel que celles-ci conservent un océan et de mers écologiquement diversifiées et dynamiques, qui soient propres, en bon état sanitaire et productifs dans le cadre de leurs conditions intrinsèques, et que l'utilisation du milieu marin soit durable, sauvegardant ainsi le potentiel de celui-ci aux fins des utilisations et activités des générations actuelles et à venir ».

L'état écologique est quant à lui « l'état général de l'environnement des eaux marines, compte tenu de la structure, de la fonction et des processus des écosystèmes qui composent le milieu marin, des facteurs physiographiques, géographiques, biologiques, géologiques et climatiques naturels, ainsi que des conditions physiques, acoustiques et chimiques qui résultent notamment de l'activité humaine interne ou externe à la zone concernée ».

Le déploiement du bon état écologique développe trois grands thèmes : 1/ la structure, les fonctions et les processus des écosystèmes qui composent le milieu marin (diversité, abondance...), combinés aux facteurs physiographiques, géographiques, géologiques et climatiques qui leur sont associés (pour assurer le fonctionnement et conserver des capacités d'adaptation) ; 2 / les propriétés hydromorphologiques, physiques et chimiques des écosystèmes (turbidité...) et 3/ des pressions (pollutions, espèces exotiques...) et des activités humaines (pêche, mouillage, aquaculture, infrastructures au large...) (voir Encart n°5).

Onze « descripteurs » - avec des objectifs qualitatifs, des critères et des indicateurs associés - ont été établis et publiés au journal officiel de l'Union européenne : trois descripteurs portent sur l'état de la diversité biologique et des composantes des écosystèmes (structure, fonction) ; sept sur des pressions humaines ; un sur une activité (pêche).

États de référence

Les caractéristiques correspondant à un « bon état écologique » (états de référence à atteindre) sont définies par les États membres pour les eaux marines de chaque région ou sous-région marine qui le concernent. En France, la définition du « bon état écologique » a été revue et publiée par arrêté ministériel en 2019 : pour chaque descripteur, une liste des critères constitutifs, des échelles spatiales d'évaluation, des indicateurs et des valeurs seuils associées, des espèces, substances, activités visées ; des règles d'agrégation spatiale et temporelle ainsi que des règles d'intégration des indicateurs le cas échéant, a été établie (arrêté ministériel du 9 septembre 2019).

Indicateurs

Une liste d'indicateurs a été définie pour chaque descripteur (voir Tableau n°4). Par ailleurs, des correspondances avec d'autres directives (directive « habitats », directive cadre sur l'eau, etc.) ont été établies (Zampoukas *et al.*, 2012).

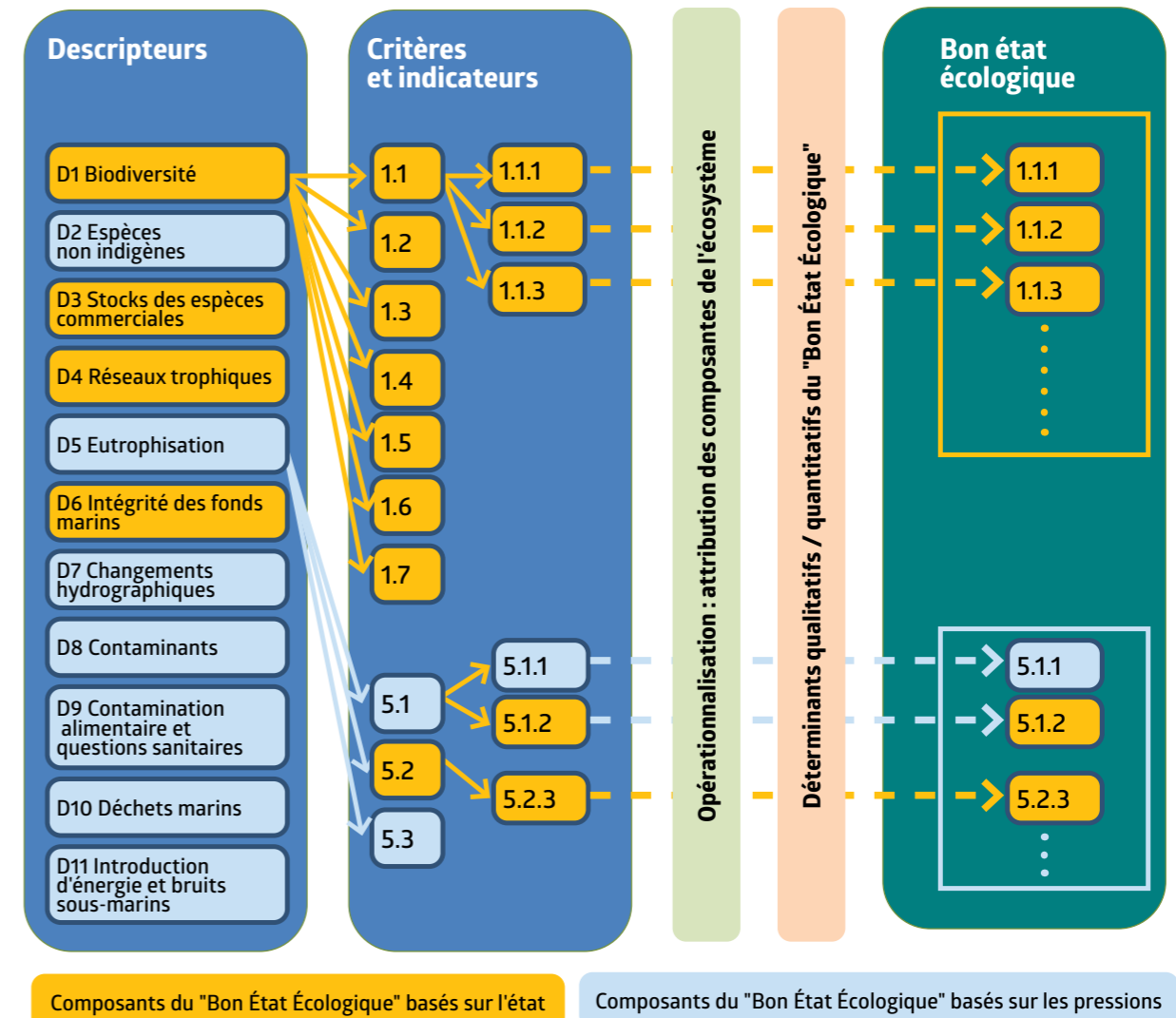
Encart n°5 – Composantes pour la détermination du Bon État Écologique (BEE) pour l'application de la directive-cadre "Stratégie pour le milieu marin" (DCSMM). D'après le contenu élaboré dans le cadre du projet KnowSeas : MSFD Guideline n°3 produced by Knowseas.

Il existe 11 descripteurs, 29 critères et 56 indicateurs. En raison de la variabilité des écosystèmes, les descripteurs, les critères et les indicateurs utilisés dans les évaluations peuvent varier. Le premier cycle d'application de la directive, d'une durée de 6 ans, a pêché par le manque d'harmonisation des méthodes de collecte de données, de données et d'établissement de seuils pour le bon état écologique (Palialexis et al. 2019).

Objectifs qualitatifs pour les 11 descripteurs :

1. La diversité biologique est conservée. La qualité des habitats et leur nombre, ainsi que la distribution et l'abondance des espèces sont adaptées aux conditions physiographiques, géographiques et climatiques existantes.
2. Les espèces non indigènes introduites par le biais des activités humaines sont à des niveaux qui ne perturbent pas les écosystèmes.
3. Les populations de tous les poissons et crustacés exploités à des fins commerciales se situent dans les limites de sécurité biologique, en présentant une répartition de la population par âge et par taille qui témoigne de la bonne santé du stock.
4. Tous les éléments constituant le réseau trophique marin, dans la mesure où ils sont connus, sont présents en abondance et diversité normales et à des niveaux pouvant garantir l'abondance des espèces à long terme et le maintien total de leurs capacités reproductives.
5. L'eutrophisation d'origine humaine, en particulier pour ce qui est de ses effets néfastes, tels que l'appauvrissement de la biodiversité, la dégradation des écosystèmes, la prolifération d'algues toxiques et la désoxygénation des eaux de fond, est réduite au minimum.
6. Le niveau d'intégrité des fonds marins garantit que la structure et les fonctions des écosystèmes sont préservées et que les écosystèmes benthiques, en particulier, ne sont pas perturbés.
7. Une modification permanente des conditions hydrographiques ne nuit pas aux écosystèmes marins.
8. Le niveau de concentration des contaminants ne provoque pas d'effets dus à la pollution.
9. Les quantités de contaminants présents dans les poissons et autres fruits de mer destinés à la consommation humaine ne dépassent pas les seuils fixés par la législation communautaire ou autres normes applicables.
10. Les propriétés et les quantités de déchets marins ne provoquent pas de dommages au milieu côtier et marin.
11. L'introduction d'énergie, y compris de sources sonores sous-marines, s'effectue à des niveaux qui ne nuisent pas au milieu marin.

Encart n°5 – Composantes pour la détermination du Bon État Écologique (BEE) pour l'application de la directive-cadre "Stratégie pour le milieu marin" (DCSMM). D'après le contenu élaboré dans le cadre du projet KnowSeas : MSFD Guideline n°3 produced by Knowseas.



DESCRIPTEUR 1 : DIVERSITÉ BIOLOGIQUE La qualité des habitats et leur nombre, ainsi que la distribution et l'abondance des espèces sont adaptés aux conditions physiographiques, géographiques et climatiques existantes. 1.1.1 à 1.3.2 : au niveau des espèces 1.4.1 à 1.6.3 : au niveau des habitats 1.7.1 : au niveau des écosystèmes	
	1.1.1 Aire de répartition
	1.1.2 Schéma de répartition de ladite aire (le cas échéant)
	1.1.3 Aire couverte par les espèces (pour les espèces sessiles et benthiques)
	1.2.1 Abondance et/ou biomasse des populations, selon le cas
	1.3.1 Caractéristiques démographiques des populations (par exemple, structure par taille ou par âge, répartition par sexe, taux de fécondité, taux de survie/mortalité)
	1.3.2 Structure génétique des populations (le cas échéant)
	1.4.1 Aire de répartition
	1.4.2 Schéma de répartition de ladite aire
	1.5.1 Aire/zone de l'habitat
	1.6.1 État des espèces et communautés typiques
	1.6.2 Abondance relative et/ou biomasse, selon le cas
	1.6.3 Conditions physiques, hydrologiques et chimique
	1.7.1 Composition et proportions relatives des composants des écosystèmes (habitats et espèces)
DESCRIPTEUR 2 : ESPÈCES NON-INDIGÈNES Les espèces non indigènes introduites par le biais des activités humaines sont à des niveaux qui ne perturbent pas l'écosystème 2.1.1 : abondance et caractérisation de leur état 2.2.1 à 2.2.2 : incidences sur l'environnement	
	2.1.1 Tendances en matière d'abondance, d'évolution temporelle et de répartition spatiale dans le milieu naturel des espèces non indigènes, en particulier des espèces non indigènes envahissantes, notamment dans les zones à risques, en relation avec les principaux vecteurs et voies de propagation de telles espèces
	2.2.1 Rapport entre espèces non indigènes envahissantes et espèces indigènes dans certains groupes taxonomiques qui ont fait l'objet d'études approfondies (tels que poissons, algues macroscopiques ou mollusques), pouvant permettre de mesurer les changements dans la composition par espèce à la suite, par exemple, du déplacement des espèces indigènes
	2.2.2 Incidences des espèces non indigènes envahissantes au niveau des espèces, des habitats et des écosystèmes, lorsqu'elles peuvent être déterminées
DESCRIPTEUR 3 : ESPÈCES COMMERCIALES Les populations de tous les poissons et crustacés exploités à des fins commerciales se situent dans les limites de sécurité biologique, en présentant une répartition de la population par âge et par taille qui témoigne de la bonne santé du stock 3.1.1 à 3.1.2 : niveau de pression de l'activité de pêche 3.2.1 à 3.2.2 : capacité de reproduction du stock 3.3.1 à 3.3.4 : âge de la population et répartition par taille	
	3.1.1 Mortalité par pêche [F – Fishing mortality]
	3.1.2 Rapport entre captures et indice de biomasse [rapport captures/biomasse]
	3.2.1 Biomasse du stock reproducteur (SSB – Spawning Stock Biomass)
	3.2.2 Indices de biomasse
	3.3.1 Proportion de poissons plus grands que la taille moyenne de première maturation sexuelle
	3.3.2 Taille maximale moyenne pour l'ensemble des espèces (établie par les études des navires de recherche)
	3.3.3 Percentile de 95 % de la répartition par taille des poissons (constaté dans les études des navires de recherche)
	3.3.4 Taille de première maturation sexuelle (de nature à refléter l'ampleur des effets génétiques indésirables de l'exploitation)

DESCRIPTEUR 4 : RÉSEAU TROPHIQUE Tous les éléments constituant le réseau trophique marin, dans la mesure où ils sont connus, sont présents en abondance, avec une diversité normale, et à des niveaux pouvant garantir l'abondance des espèces à long terme et le maintien total de leurs capacités reproductives. 4.1.1 : productivité (production par unité de biomasse) des espèces ou groupes trophiques 4.2.1 : proportion des espèces sélectionnées au sommet du réseau trophique 4.3.1 : abondance/répartition des groupes trophiques/espèces clés	
	4.1.1 Performances des espèces prédatrices clés, sur la base de leur production par unité de biomasse (productivité)
	4.2.1 Poissons de grande taille [en poids]
	4.3.1 Tendances en matière d'abondance des espèces/groupes sélectionnés importants sur le plan fonctionnel
DESCRIPTEUR 5 : EUTROPHISATION L'eutrophisation d'origine humaine, en particulier pour ce qui est de ses effets néfastes, tels que l'appauvrissement de la biodiversité, la dégradation des écosystèmes, la prolifération d'algues toxiques et la désoxygénation des eaux de fond, est réduite au minimum. 5.1.1 à 5.1.2 : teneur en nutriments 5.2.1 à 5.2.4 : effets directs de l'enrichissement en nutriments 5.3.1 à 5.3.2 : effets indirects de l'enrichissement en nutriments	
	5.1.1 Concentration en nutriments dans la colonne d'eau
	5.1.2 Taux des nutriments [silicium, azote et phosphore] (le cas échéant)
	5.2.1 Concentration en chlorophylle dans la colonne d'eau
	5.2.2 Transparence de l'eau en liaison avec une augmentation de la quantité d'algues en suspension (le cas échéant)
	5.2.3 Abondance d'algues macroscopiques opportunistes
	5.2.4 Modification des espèces dans la composition de la flore, comme le rapport diatomées/flagellés, le basculement des espèces benthiques aux espèces pélagiques, ainsi que la floraison d'espèces sources de nuisance ou la prolifération d'algues toxiques (par exemple, cyanobactéries), causée par les activités humaines
	5.3.1 Abondance des algues et herbiers pérennes (par exemple, fucacées, zostères et posidonies), perturbés par la diminution de la transparence de l'eau
	5.3.2 Oxygène dissous, c'est-à-dire changements dus à un accroissement de la décomposition de matière organique et de la superficie de la zone concernée
DESCRIPTEUR 6 : INTÉGRITÉ DES FONDS MARINS Le niveau d'intégrité des fonds marins garantit que la structure et les fonctions des écosystèmes sont préservées et que les écosystèmes benthiques, en particulier, ne sont pas perturbés 6.1.1 à 6.1.2 : dommages physiques, compte tenu des caractéristiques du substrat 6.2.1 à 6.2.4 : état de la communauté benthique	
	6.1.1 Type, abondance, biomasse et étendue du substrat biogénique concerné
	6.1.2 Étendue des fonds marins sensiblement perturbés par les activités humaines, pour les différents types de substrats (les fonds marins affectés ne sont pas directement mesurés, mais l'abondance et la couverture des espèces benthiques peuvent être considérées comme une indication).
	6.2.1 Présence d'espèces particulièrement sensibles et/ou tolérantes
	6.2.2 Indices multimétriques évaluant l'état et la fonctionnalité de la communauté benthique, tels que la diversité et la richesse spécifiques et la proportion d'espèces opportunistes par rapport aux espèces sensibles
	6.2.3 Proportion de biomasse ou nombre d'individus de la population de macrobenthos au-dessus d'une taille précise
	6.2.4 Paramètres décrivant les caractéristiques (forme, pente et intercept) du spectre de taille de la communauté benthique

Indicateurs pour les différents descripteurs de la DCSMM. D'après JRC 2012 Scientific and technical report d'après la Décision de la Commission du 1^{er} septembre 2010 (C(2010)5956) relative aux critères et aux normes méthodologiques concernant le bon état écologique des eaux marines

DESCRIPTEUR 7 : CONDITIONS HYDROGRAPHIQUES**Une modification permanente des conditions hydrographiques ne nuit pas aux écosystèmes marins****7.1.1 : caractérisation spatiale des modifications permanentes****7.2.1 à 7.2.2 : incidence des changements hydrographiques permanents**

7.1.1	Étendue de la zone concernée par les modifications permanentes
7.2.1	Étendue spatiale des habitats concernés par la modification permanente
7.2.2	Changements concernant les habitats, en particulier pour ce qui est des fonctions assurées (par exemple, les zones de frai, d'alevinage et d'alimentation et les routes migratoires des poissons, animaux et mammifères), dus à la modification des conditions hydrographiques

DESCRIPTEUR 8 : CONTAMINANTS ET POLLUTION**Le niveau de concentration des contaminants ne provoque pas d'effets dus à la pollution****8.1.1 : concentration des contaminants****8.2.1 à 8.2.2 : effets des contaminants**

8.1.1	Concentration des contaminants mentionnés ci-dessus, mesurée dans la matrice appropriée (par exemple, biote, sédiments et eaux) selon une méthode garantissant la comparabilité avec les évaluations réalisées au titre de la directive 2000/60/CE
8.2.1	Niveaux des effets de la pollution sur les composants de l'écosystème concernés, en tenant compte des processus biologiques et des groupes taxinomiques sélectionnés pour lesquels un rapport de cause à effet a été établi et doit faire l'objet d'un suivi
8.2.2	Occurrence, origine (dans la mesure du possible), étendue des épisodes significatifs de pollution aiguë (par exemple, déversements d'hydrocarbures et de produits pétroliers) et leur incidence sur le biote physiquement dégradé par cette pollution

DESCRIPTEUR 9 : CONTAMINANTS DANS LES POISSONS ET AUTRES FRUITS DE MER**Les quantités de contaminants présents dans les poissons et autres fruits de mer destinés à la consommation humaine ne dépassent pas les seuils fixés par la législation communautaire ou les autres normes applicables****9.1.1 : teneurs maximales et nombre des contaminants**

9.1.1	Niveaux réels des contaminants qui ont été détectés et nombre de contaminants pour lesquels les teneurs maximales réglementaires ont été dépassées (Niveaux maximaux de certains contaminants présents dans le règlement de la Commission No 1881/2006)
-------	---

DESCRIPTEUR 10 : DÉCHETS MARINS**Les propriétés et les quantités de déchets marins ne provoquent pas de dommages au milieu côtier et marin****10.1.1 à 10.1.3 : caractéristiques des déchets présents dans l'environnement marin et côtier****10.2.1 : incidences des déchets sur la vie marine**

10.1.1	Tendances concernant la quantité de déchets répandus et/ou déposés sur le littoral, y compris l'analyse de la composition, la répartition spatiale et, si possible, la source des déchets
10.1.2	Tendances concernant les quantités de déchets présents dans la colonne d'eau (y compris ceux qui flottent à la surface) et reposant sur les fonds marins, y compris l'analyse de la composition, la répartition spatiale et, si possible, la source des déchets
10.1.3	Tendances concernant la quantité, la répartition et, dans la mesure du possible, la composition des microparticules (notamment les microplastiques)
10.2.1	Tendances concernant la quantité et la composition des déchets ingérés par les animaux marins (par exemple, analyse du contenu de l'estomac)

DESCRIPTEUR 11 : BRUIT SOUS-MARIN ET ÉNERGIE**L'introduction d'énergie, y compris de sources sonores sous-marines, s'effectue à des niveaux qui ne nuisent pas au milieu marin****11.1.1 : répartition temporelle et spatiale de sons impulsifs haute fréquence, basse fréquence et moyenne fréquence****11.2.1 : son continu basse fréquence**

11.1.1	Proportion, répartition sur une année calendaire, dans des zones d'une surface déterminée, et répartition spatiale des jours où les sources sonores anthropiques dépassent des niveaux susceptibles d'avoir une incidence significative sur les animaux marins, mesurés sous la forme de niveaux d'exposition au bruit (en dB re 1µPa ² .s) ou de niveaux de pression acoustique de crête (en dB re 1µPa _{peak}) à un mètre, sur la bande de fréquences de 10 Hz à 10 kHz
11.2.1	Tendances concernant le niveau sonore ambiant dans les bandes de tiers d'octave 63 et 125 Hz (fréquence centrale) [re 1µPa RMS; niveau sonore moyen dans ces bandes d'octaves sur une année], mesuré par des stations d'observations et/ou au moyen de modèles, le cas échéant



FICHE

6

L'index de résilience bioclimatique des écosystèmes (*Bioclimatic Ecosystem Resilience Index, BERI*)

L'index de résilience bioclimatique des écosystèmes (*Bioclimatic Ecosystem Resilience Index, BERI*) (Ferrier *et al.*, 2020) a été initialement développé pour répondre aux objectifs d'Aichi définis dans le cadre de la Convention sur la diversité biologique (CDB) avant 2020. Il permet d'évaluer les variations spatiales et temporelles de la capacité des écosystèmes à conserver leur diversité biologique face au changement climatique.

Cet index a été mis au point en intégrant :

- Les changements potentiels dans la composition en espèces au fil du temps le long de gradients environnementaux.
- La connectivité d'une zone avec les zones d'habitat environnantes en relativement bon état et susceptibles d'abriter un assemblage d'espèces à la composition est similaire – cela pour six scénarios de changement climatique plausibles, projetés jusqu'en 2050.

Le BERI est ensuite exprimé sous forme de ratio par rapport à la connectivité réalisable si la zone d'intérêt analysée était entourée d'une étendue continue d'habitats en très bon état (exempt de pressions) et n'était soumise à aucun changement climatique.

Le calcul est réalisé pour de petites zones (cellules) et peut être agrégé à des échelles intéressantes pour le rapportage (par ex. pays, écorégion...).

Le calcul de l'index a été testé sur le biome forestier tropical humide avec une attention particulière pour la zone indo-malaisienne et les zones adjacentes. Les tendances de la répartition spatiale du BERI suggèrent que les niveaux de perte et de fragmentation des habitats dans un paysage sont des facteurs déterminants de la capacité des écosystèmes à conserver la diversité biologique face au changement climatique : les grandes étendues de forêts intactes présentent des valeurs de l'index plus élevées que les paysages moins intacts. Cependant, les résultats suggèrent également d'importantes variations de la capacité des différentes zones de forêts intactes à conserver la diversité biologique, au-delà de ce qui s'explique simplement par l'étendue et l'état de l'habitat dans ces zones (par ex. certaines parties de l'Amazonie présentent des valeurs beaucoup plus faibles que celles auxquelles on pourrait s'attendre eu égard à l'étendue et l'état de l'habitat). Une étude à une échelle régionale, plus fine, sur le Sud-Ouest de Bornéo suggère ainsi que la topographie et la vitesse de changement climatique comptent dans la capacité estimée des zones forestières à conserver la diversité biologique dans le cadre du changement climatique en jouant sur différents gradients (altitudes des habitats, régime de précipitations...).



REPÈRE

1

Une approche basée sur la composition des populations d'espèce est-elle un bon indicateur de l'intégrité des écosystèmes ?

L'intégrité des écosystèmes est définie, dans le cadre mondial de la biodiversité, en termes de caractéristiques relatives à « composition », « structure » et « fonction » : c'est une notion qui dépasse la composition en espèces et son état par rapport à un état moins anthropisé.

Des indices couramment calculés pour mesurer le caractère intègre de la biodiversité par rapport à des écosystèmes de référence dits « intacts » – comme l'abondance moyenne des espèces (*mean species abundance*, MSA, Schipper *et al.* 2019) ou l'indice d'intégrité de la biodiversité (*Biodiversity Intactness Index*, BII, Newbold *et al.* 2016) – sont souvent utilisés comme des proxys de l'intégrité des écosystèmes. Ces indices ne mesurent cependant que la partie « composition ». De plus, en se basant sur des états de référence d'écosystèmes naturels, ils ne sont pas nécessairement de bons indicateurs de l'intégrité, de l'état, de la santé des écosystèmes gérés (Secretariat of the CBD, 2022).

Cas du Biodiversity Intactness Index

L'approche combine une mesure de la biodiversité à l'échelle des populations d'organismes et des mesures des pressions anthropiques qui causent son déclin afin de calculer un « index d'intégrité de la biodiversité » (*Biodiversity Intactness Index*, BII, Scholes et Biggs, 2005). Le BII est ainsi un indicateur de l'abondance moyenne d'un ensemble diversifié d'organismes de groupes taxonomiques bien décrits (espèces exotiques exclues) dans une zone géographique donnée, par rapport à leurs populations de référence.

Cette approche est notamment utilisée pour suivre l'effet des pressions humaines sur la biodiversité, y compris à l'échelle locale (*Local Biodiversity Intactness Index*, LBII), et l'indicateur est régulièrement calculé en utilisant les données de la [base de données PREDICTS](#) (*Projecting Responses of Ecological Diversity in Changing Terrestrial Systems*, Hudson *et al.*, 2016). Enfin, en renseignant sur le changement d'abondance de population de plusieurs espèces, elle voisine avec les notions de « risque d'extinction d'espèces » ou encore de « limites planétaires ».

Sa construction s'articule autour de quatre thèmes : l'abondance de populations d'espèces de divers groupes taxonomiques, la richesse spécifique, les impacts d'usages des terres sur ces populations et l'utilisation de données d'observation (populations, espèces), de dire d'experts et d'occupation des sols.

Encart A - Formule de l'index d'intégrité de la biodiversité (biodiversity intactness index, BII). D'après Scholes & Biggs, 2005

Le BII donne l'impact moyen d'un ensemble d'activités humaines (usages des terres), pondéré par la richesse et la surface, sur des populations d'un groupe d'organismes dans une zone donnée.

L'impact sur une population (I_{ijk}) est défini comme la population d'un groupe (ou taxon) i d'espèces soumis à l'activité k dans l'écosystème j , relativement à la population de référence dans le même type d'écosystème. Le calcul est le suivant :

$$BII = (\sum_i \sum_j \sum_k R_{ij} A_{jk} I_{ijk}) / (\sum_i \sum_j \sum_k R_{ij} A_{jk})$$

Avec R_{ij} la richesse (nombre d'espèces) du taxon i dans l'écosystème j

Et A_{jk} la surface avec l'usage des terres k dans l'écosystème j (les usages de terres étant classés selon une typologie d'une dizaine d'usages max.).

I_{ijk} peut être estimé espèce par espèce au sein de groupes taxonomiques par dire d'experts; R_{ij} peut être extrait de base de données de comptages d'espèces; A_{jk} peut être extrait de bases de données d'occupation des sols.

C'est donc une estimation des impacts d'un ensemble d'usages des terres (de la protection totale à l'urbanisation en passant par la culture et l'extraction s.l.) sur la taille de populations de groupes d'espèces dites « écologiquement similaires » (par ex. « plantes herbacées ») qui est réalisé, pour une surface donnée et les écosystèmes (par ex. « prairies ») qui s'y trouvent - plus qu'une estimation de l'intégrité des écosystèmes (voir Encart A).

L'état de référence est ici établi en tenant compte des populations contemporaines dans de grandes zones protégées, utilisées comme substitut, comme proxy des populations avant la société industrielle moderne – ou encore, pour les zones géographiques déjà très transformées au début de l'ère moderne, en choisissant une année spécifique comme référence.

REPÈRE

2

L'intégrité écologique
peut-elle être reliée
au capital naturel pour
soutenir la conservation ?

Mora (2019) postule qu'intégrité écologique et capital naturel peuvent être articulés : d'un côté, l'intégrité écologique est utilisée comme base pour l'évaluation des impacts humains ; de l'autre, le capital naturel - stocks de ressources naturelles renouvelables et non renouvelables, qui combinés, produisent un flux d'avantages ou de "services" pour les humains - peut être évalué par une série d'indicateurs (actifs naturels, flux biophysiques, bénéfices retirés...).

Pour l'auteur, le capital naturel est lié à l'intégrité écologique lorsque tout stock de ressources naturelles, ou d'actifs environnementaux, qui fournit un flux de biens ou de services présent et à venir, devient critique pour une utilisation durable : ce « capital naturel critique » permet des fonctions écologiques importantes et n'est pas substituable naturellement ou artificiellement. D'un point de vue écologique, c'est la partie de l'environnement naturel qui doit être maintenue pour conserver les processus écologiques clés actuels et futurs. L'intégrité écologique, au-delà de la surface, constitue un moyen d'estimer la qualité des écosystèmes impactés par les activités humaines et, partant, du capital naturel.

En outre, la dimension de « valeurs » relie les deux notions : il y a d'un côté une « valeur écologique » estimée par l'intégrité, à travers un prisme plus dynamique que statique ; de l'autre, une « valeur économique » basée sur la quantification des valeurs d'usage et de non-usage de l'écosystème et de son état. Cette valeur peut être formulée aux points de basculement de la durabilité - durabilité qui peut, justement, être analysée à travers la qualité, la quantité et la « valeur écologique ».

Un pas plus avant, des entreprises du secteur de la « greentech », mobilisant de grands volumes de données, l'intelligence artificielle, la technologie blockchain, etc., s'emparent de la notion d'intégrité des écosystèmes et de ses bases scientifiques pour faire de la préservation de la biodiversité une alternative économique intéressante. *In fine*, il s'agit de faciliter la rétribution financière des propriétaires qui maintiennent la santé et le fonctionnement des écosystèmes de leurs biens fonciers. Ce type de mécanisme peut être à l'origine d'effets positifs ou, au contraire, présenter des risques pour la biodiversité.

Des cas d'usages se développent, notamment pour les forêts, en mettant en balance préservation, exploitation et déforestation *via* une méthode de suivi des changements forestiers et d'évaluation du statut d'intégrité. Trois variables sont utilisées : la productivité primaire nette (NPP) pour approximer le fonctionnement de l'écosystème, la perte de connectivité (LFC) pour approximer la structure de l'écosystème et l'indice d'intégrité de la biodiversité (BII) pour approximer la composition de la communauté ou de l'écosystème. En fonction de la valeur écologique déduite, des jetons de monnaie virtuelle sont attribués aux propriétaires (1 jeton = x euros) et leur vente - auprès d'entreprises, d'organisations ou d'individus qui souhaitent contribuer à la protection de la nature - est facilitée.



REPÈRE

3

Écosystèmes naturels, gérés... de quoi parle-t-on dans les cadres scientifiques et politiques mondiaux ?

Dans le cadre mondial pour la biodiversité, les écosystèmes naturels sont considérés comme des zones formées d'assemblages viables d'espèces végétales et/ou animales d'origine largement indigène (le terme d'habitat est aussi très employé) et/ou dans lesquelles l'activité humaine n'a pas modifié, de façon essentielle, les fonctions écologiques primaires et la composition des espèces (d'après PNUE-WCMC glossary, 2019).

Côté Ipbes (Ipbes glossary), il s'agit de zones qui n'ont pas été significativement altérées par l'humain. Dans le cadre de l'Agence européenne de l'environnement (EEA Glossary), il s'agit d'écosystèmes où l'impact de l'humain n'a pas été plus important que celui de toute autre espèce indigène et n'a pas affecté la structure de l'écosystème depuis la révolution industrielle. L'impact humain exclut ici les changements d'ampleur mondiale, tels que les changements climatiques dus au réchauffement de la planète.

Toujours dans le cadre mondial, les écosystèmes intacts et sauvages sont définis comme des paysages terrestres et marins largement intacts sur le plan biologique et écologique, à faible densité de population humaine et pratiquement dépourvus d'infrastructures industrielles. Cela n'exclut pas l'occupation humaine, mais plutôt les activités humaines qui entraînent des perturbations biophysiques importantes.

Les écosystèmes gérés, quant à eux, peuvent être définis comme ceux dont la composition résulte d'une gestion humaine volontaire et orientée – facteur souvent plus puissant que le climat ou le sol – pour en retirer des services (par ex. dans le cas d'aquaculture, d'agriculture, d'aménagement d'agrément urbain...) (d'après Diaz *et al.*, 2020). Ces espaces abritent la majorité de la diversité d'espèces domestiquées et une part importante de biodiversité sauvage.

Ces écosystèmes entrent dans la catégorie des écosystèmes modifiés, écosystèmes définis comme des zones susceptibles de contenir une grande proportion d'espèces d'origine non indigène, et/ou dans lesquelles l'activité humaine a considérablement modifié les fonctions écologiques initiale et la composition en espèces. Il s'agit souvent d'espaces productifs (d'après PNUE-WCMC glossary, 2019), fournissant notamment de la biomasse.

Écosystèmes naturels et écosystèmes gérés

Au regard de ces différentes terminologies, on peut retenir les deux définitions simples suivantes dans le cadre d'utilisation de la notion d'intégrité des écosystèmes :

- Les écosystèmes naturels - terrestres et marins - sont ceux « dont la composition en espèces est principalement naturelle ou native et déterminée par les conditions climatiques et géophysiques ». Cela ne signifie pas qu'ils ne sont pas, hier et aujourd'hui, sous influence anthropique ni qu'ils ne sont pas modifiés par l'humain, mais à un niveau tel qu'ils ne peuvent pas être qualifiés de « gérés ».
- Les écosystèmes gérés - terrestres et marins - sont ceux « dont la composition et le fonctionnement biotique sont plus fortement transformés par des manipulations délibérées, souvent pour répondre à des besoins humains spécifiques, tels que la production alimentaire, le logement ou même les loisirs. »

Ces deux types sont positionnés sur un gradient allant de zones exemptes d'influence humaine (hormis le changement climatique) à des zones fortement anthropisées. Ils coexistent dans des mosaïques complexes.

Écosystèmes semi-naturels

Entre ces définitions, importantes lorsqu'il s'agit d'établir des bilans ou de définir des objectifs chiffrés, il existe tout un gradient d'écosystèmes où on trouvera à positionner les écosystèmes dits semi-naturels, depuis des écosystèmes dont les processus et la diversité biologiques sont intacts bien qu'altérés par les activités humaines (Ipbes glossary) jusqu'à ceux dont la composition, le fonctionnement ou la fonction ont été considérablement modifiés par les activités humaines et qui peuvent avoir évolué dans le cadre d'activités humaines traditionnelles et dépendent du maintien de ces activités pour conserver leur composition, leur structure et leur fonction caractéristiques (d'après PNUE-WCMC glossary, 2019).

Les habitats natifs

Ce sont les habitats dont les espèces sont naturellement présentes, évoluent au sein de leur(s) aire(s) de répartition naturelle(s) passée(s) ou présente(s) et de leur(s) aire(s) de dispersion potentielle(s). Ces espèces, qui ont co-évolué, sont adaptées au sol, au climat, aux autres espèces (par ex. pollinisateurs, espèces à cycles biologiques sur différentes plantes, relations hôtes-parasites). Les habitats natifs sont ainsi dominés par des espèces végétales indigènes. Leur composition et structure sont substantiellement similaires à celles des habitats qui auraient été présents en l'absence d'activités humaines intensives.

Ils ne sont pas exempts d'activités humaines.

Le rôle positif des habitats natifs au sein espaces productifs est bien documenté. Il varie selon les conditions locales : contribution à la régulation de la protection et la régénération des sols, la purification de l'eau et de l'air, la pollinisation, la protection contre les ravageurs, l'atténuation de l'acidification des océans et l'atténuation du changement climatique, la limitation des inondations, des glissements de terrain, de la salinisation... Ces habitats contribuent également à la fourniture de denrées alimentaires, d'énergie, de médicaments et de ressources génétiques, ainsi qu'aux aspects non matériels d'une bonne qualité de vie.



REPÈRE

4

Mesurer la capacité adaptative et évolutive pour en rendre compte en termes d'intégrité des écosystèmes : quelles sont les questions ?

L'intégrité des écosystèmes comprise comme l'intégrité des processus au sein de l'écosystème – plus que l'intégrité de sa composition vis-à-vis d'un état de référence – implique de protéger les capacités d'évolution des espèces au sein des écosystèmes. La mesure de cette capacité adaptative ou évolutive est confrontée aux mêmes difficultés classiques pour se situer entre des stratégies différentes :

- Maintenir des populations de grande taille et bien connectées ce qui permet en général de maintenir aussi la diversité génétique au sein de celles-ci mais ne représente pas un objectif distinct des objectifs de conservation fondés sur la démographie classique ;
- Utiliser la diversité moléculaire neutre comme un indicateur de la démographie passée et donc indirectement (et imparfaitement) de la diversité adaptative ;
- Utiliser la diversité au niveau moléculaire dans les séquences codantes, mais avec une compréhension limitée (et restreinte à très peu d'espèces ou populations) du rôle exact de cette diversité dans l'adaptation et la résilience des populations et des écosystèmes ;
- Estimer la diversité héritable de traits écologiques connus pour leur fonction dans l'écosystème par des approches de génétique ou génomique quantitative mais coûteux à mesurer et également fort restreint à une poignée de cas d'études.

Dans le contexte de la notion d'intégrité des écosystèmes, ces difficultés générales à estimer le potentiel évolutif se doublent par la nécessité de comprendre quels traits/variants moléculaires affectent non seulement une espèce focale, mais aussi le maintien de ses interactions et interdépendances avec les autres espèces.

Par ailleurs, une partie des recherches dédiées au rôle des processus évolutifs dans la résilience des écosystèmes s'intéresse à la façon dont la microévolution affecte le franchissement des points de bascule des écosystèmes en s'appuyant sur la modélisation. Par exemple :

- Des boucles de rétroactions affectant l'évolution elle-même peuvent produire des effondrements brutaux de certaines populations dans un environnement changeant (Osmond & Klausmeier (2017) dans le cas de l'adaptation à un environnement changeant progressivement, voir aussi toute la littérature sur le « suicide évolutif », réponse évolutive aux pressions qui augmente la probabilité d'extinction), ceci notamment illustré par l'effet de la fragmentation des paysages sur l'évolution de la dispersion (par exemple Rousset et Ronce, 2004) ;

- L'adaptation permet de ne pas s'approcher de ces points de bascule, ou au contraire, rend le retour en arrière plus difficile une fois le point de bascule franchi du fait de l'adaptation à un état alternatif (Chaparro-Pedraza *et al.* 2021).

Il existe aussi des interactions complexes entre différents mécanismes de résilience à différents niveaux d'organisation de la biodiversité. Ainsi :

- Un certain nombre de résultats expérimentaux suggèrent que la diversité infraspécifique contribue à la résilience de communautés et d'écosystèmes et au maintien d'une forte diversité interspécifique suite aux perturbations (voir les exemples discutés dans Lavergne *et al.* 2010).
- Cependant Thompson et Fronhofer (2019) montrent, *via* des simulations, qu'augmenter les capacités d'adaptation rapide des espèces peut compromettre le maintien de la diversité quand un ensemble d'espèces différentes migrent et s'adaptent à un gradient environnemental changeant dans le temps et l'espace – comme dans le cas du changement climatique. Cet effet contre-intuitif est expliqué par des effets de monopolisation résultant d'interactions entre la compétition interspécifique et l'évolution de niches plus larges chez certaines espèces qui empêchent d'autres espèces de migrer pour suivre le climat auquel elles sont historiquement adaptées.
- Inversement, d'autres études théoriques suggèrent qu'une forte diversité spécifique peut contraindre l'évolution au sein des espèces comme un mécanisme de résilience et d'adaptation des communautés (De Mazancourt *et al.* 2008).

Enfin, l'évolution des caractéristiques de certains systèmes biologiques, dans les circonstances de leur habitat naturel, a favorisé des traits qui les rendent moins résilients (par exemple : faible distance de dispersion, longue durée de vie, fort degré de spécialisation, auto-incompatibilité, la dépendance à une unique espèce clé de voûte pour un écosystème entier). Ceci pose questions : ces systèmes doivent-ils bénéficier d'un statut de protection plus fort du fait de leur résilience faible ? ou bien faut-il encourager leur modification pour accroître leur résilience (par exemple accélérer le cycle de vie en réduisant la longévité des arbres par des coupes pour accélérer la vitesse d'adaptation) ?

Ces questions en appellent d'autres, pratiques et éthiques. Ainsi, est-ce que les flux de gènes assistés contribuent à l'intégrité des écosystèmes en augmentant la résilience d'espèces clés dans ces systèmes ? ou risquent-ils, au contraire, en remplaçant un génotype dominant par un autre, de modifier plus profondément l'écosystème qu'on pourrait le soupçonner comme le suggèrent les travaux de Whitham *et al.* (2006) ?

BIBLIOGRAPHIE

Arrêté du 9 septembre 2019 relatif à la définition du bon état écologique des eaux marines et aux normes méthodologiques d'évaluation (JORF n°0224 du 26 septembre 2019)

Beyer, H. L., Venter, O., Grantham, H. S., & Watson, J. E. (2019). Substantial losses in ecoregion intactness highlight urgency of globally coordinated action. *Conservation Letters*, 13(2). <https://doi.org/10.1111/conl.12692>

Bourret, V., O'Reilly, P. T., Carr, J. W., Berg, P. R., & Bernatchez, L. (2011). Temporal change in genetic integrity suggests loss of local adaptation in a wild Atlantic salmon (*Salmo salar*) population following introgression by farmed escapees. *Heredity*, 106(3), 500-510. <https://doi.org/10.1038/hdy.2010.165>

Cairns, J. (1975). Quantification of biological integrity. Dans R. Kent Ballentine & L. J. Guarraia, *The integrity of water, proceedings of a symposium* (pp.171-188). U.S. Environmental Protection Agency.

Carter, S. K., Fleishman, E., Leinwand, I. I. F., Flather, C. H., Carr, N. B., Fogarty, F. A., Leu, M., Noon, B. R., Wohlfeil, M. E., & Wood, D. J. A. (2019). Quantifying Ecological Integrity of Terrestrial Systems to Inform Management of Multiple-Use Public Lands in the United States. *Environmental Management*, 64(1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01163-w>

Chaparro-Pedraza, P. C. (2021). Fast environmental change and eco-evolutionary feedbacks can drive regime shifts in ecosystems before tipping points are crossed. *Proceedings Of The Royal Society B Biological Sciences*, 288(1955). <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.1192>

Conference of the Parties (CoP) to the Convention on Biological Diversity (CBD) . *Decision adopted by the CoP of the CDB. 15/4 Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework*. (2022). CBD/COP/DEC/15/4. Available in French from : <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-15/cop-15-dec-04-fr.pdf>

Convention on Biological Diversity (CBD) Glossary. (2022). <https://www.cbd.int/doc/c/e999/4bbe/d981f88c804a1c54f6fc51c8/wg2020-05-04-fr.pdf>

De Mazancourt, C., Johnson, E., & Barraclough, T. G. (2008). Biodiversity inhibits species' evolutionary responses to changing environments. *Ecology Letters*, 11(4), 380-388. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01152.x>

Díaz, S., Zafra-Calvo, N., Purvis, A., Verburg, P. H., Obura, D., Leadley, P., Chaplin-Kramer, R., De Meester, L., Dulloo, E., Martín-López, B., Shaw, M. R., Visconti, P., Broadgate, W., Bruford, M. W., Burgess, N. D., Cavender-Bares, J., DeClerck, F., Fernández-Palacios, J. M., Garibaldi, L. A., . . . Zanne, A. E. (2020). Set ambitious goals for biodiversity and sustainability. *Science*, 370(6515), 411-413. <https://doi.org/10.1126/science.abe1530>

Díaz-Delgado, R., Cazacu, C., & Adamescu, M. (2018). Rapid Assessment of Ecological Integrity for LTER Wetland Sites by Using UAV Multispectral Mapping. *Drones*, 3(1), 3. <https://doi.org/10.3390/drones3010003>

Directive 2008/56/CE du Parlement européen et du Conseil du 17 juin 2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive-cadre «stratégie pour le milieu marin») (JOUE du 25.06.2008, version du 06.07.2017). <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/56/oj>

European Environment Agency (EEA) Glossary. (2024). <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary>

Ferrier, S., Harwood, T. D., Ware, C., & Hoskins, A. J. (2020). A globally applicable indicator of the capacity of terrestrial ecosystems to retain biological diversity under climate change : The bioclimatic ecosystem resilience index. *Ecological Indicators*, 117, 106554. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106554>

Future Earth (biodiscovery), GEOBON. (2022). *Expert input to the post-2020 Global biodiversity framework for the 34th SBSSTA : Transformative actions on all drivers of biodiversity loss are urgently to achieve the global goals by 2050*. <https://www.cbd.int/doc/c/5735/c241/efeeac8d7685af2f38d75e4e/sbstta-24-inf-31-en.pdf>

Garibaldi, L. A., Oddi, F. J., Miguez, F. E., Bartomeus, I., Orr, M. C., Jobbágy, E. G., Kremen, C., Schulte, L. A., Hughes, A. C., Bagnato, C., Abramson, G., Bridgewater, P., Carella, D. G., Díaz, S., Dicks, L. V., Ellis, E. C., Goldenberg, M., Huaylla, C. A., Kuperman, M., . . . Zhu, C. (2020). Working landscapes need at least 20 % native habitat. *Conservation Letters*, 14(2). <https://doi.org/10.1111/conl.12773>

Grantham, H. S., Duncan, A., Evans, T. D., Jones, K. R., Beyer, H. L., Schuster, R., Walston, J., Ray, J. C., Robinson, J. G., Callow, M., Clements, T., Costa, H. M., DeGemmis, A., Elsen, P. R., Ervin, J., Franco, P., Goldman, E., Goetz, S., Hansen, A., . . . Watson, J. E. M. (2020). Anthropogenic modification of forests means only 40 % of remaining forests have high ecosystem integrity. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19493-3>

Haase, P., Tonkin, J. D., Stoll, S., Burkhard, B., Frenzel, M., Geijzendorffer, I. R., Häuser, C., Klotz, S., Kühn, I., McDowell, W. H., Mirtl, M., Müller, F., Musche, M., Penner, J., Zacharias, S., & Schmeller, D. S. (2017). The next generation of site-based long-term ecological monitoring : Linking essential biodiversity variables and ecosystem integrity. *The Science Of The Total Environment*, 613-614, 1376-1384. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.111>

Hansen, A. J., Noble, B. P., Veneros, J., East, A., Goetz, S. J., Supples, C., Watson, J. E. M., Jantz, P. A., Pillay, R., Jetz, W., Ferrier, S., Grantham, H. S., Evans, T. D., Ervin, J., Venter, O., & Virnig, A. L. S. (2021). Toward monitoring forest ecosystem integrity within the post-2020 Global Biodiversity Framework. *Conservation Letters*, 14(4). <https://doi.org/10.1111/conl.12822>

Hansen, A., Noble, B., Veneros, J., East, A., Goetz, S., Supples, C., Watson, J., Jantz, P., Pillay, R., & Jetz, W. (2021). Towards monitoring ecosystem integrity within the Post-2020 Global Biodiversity Framework. *Pre-print*. <https://doi.org/10.32942/osf.io/eyqw5>

Hill, S., Harrison, M., Maney, C., Fajardo, J., Harris, M., Ash, N., Bedford, J., Danks, F., Guaras, D., Hughes, J., Jones, M., Mason, T., & Burgess, N. (2022). The Ecosystem Integrity Index : a novel measure of terrestrial ecosystem integrity. *bioRxiv* (Cold Spring Harbor Laboratory). <https://doi.org/10.1101/2022.08.21.504707>

Hill, S. L., Gonzalez, R., Sanchez-Ortiz, K., Caton, E., Espinoza, F., Newbold, T., Tylianakis, J., Scharlemann, J. P. W., De Palma, A., & Purvis, A. (2018). Worldwide impacts of past and projected future land-use change on local species richness and the Biodiversity Intactness Index. *bioRxiv* (Cold Spring Harbor Laboratory). <https://doi.org/10.1101/311787>

Hudson, L. N., Newbold, T., Contu, S., Hill, S. L. L., Lysenko, I., De Palma, A., Phillips, H. R. P., Alhusseini, T. I., Bedford, F. E., Bennett, D. J., Booth, H., Burton, V. J., Chng, C. W. T., Choimes, A., Correia, D. L. P., Day, J., Echeverría-Londoño, S., Emerson, S. R., Gao, D., . . . Purvis, A. (2016). The database

of the PREDICTS (Projecting Responses of Ecological Diversity In Changing Terrestrial Systems) project. *Ecology And Evolution*, 7(1), 145-188. <https://doi.org/10.1002/ece3.2579>

Hutchinson, W. F., Van Oosterhout, C., Rogers, S. I., & Carvalho, G. R. (2003). Temporal analysis of archived samples indicates marked genetic changes in declining North Sea cod (*Gadus morhua*). *Proceedings Of The Royal Society B Biological Sciences*, 270(1529), 2125-2132. <https://doi.org/10.1098/rspb.2003.2493>

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (Ipbes) Glossary. (2024). <https://www.ipbes.net/glossary>

Karr, J. R., Larson, E. R., & Chu, E. W. (2021). Ecological integrity is both real and valuable. *Conservation Science And Practice*, 4(2). <https://doi.org/10.1111/csp2.583>

Karr, J. R., & Dudley, D. R. (1981). Ecological perspective on water quality goals. *Environmental Management*, 5(1), 55-68. <https://doi.org/10.1007/bf01866609>

Karr, J.R., Fausch, K.D., Angermeier, P.L., Yant, P.R., Schlosser, I.J. (1986). *Assessing Biological Integrity in Running Waters : A Method and Its Rationale*. (Special publication). Illinois Natural History Survey. ISSN 0888-9546

Kay, J. J. (1991). A nonequilibrium thermodynamic framework for discussing ecosystem integrity. *Environmental Management*, 15(4), 483-495. <https://doi.org/10.1007/bf02394739>

Keith, D. A., Rodríguez, J. P., Rodríguez-Clark, K. M., Nicholson, E., Aapala, K., Alonso, A., Asmussen, M., Bachman, S., Basset, A., Barrow, E. G., Benson, J. S., Bishop, M. J., Bonifacio, R., Brooks, T. M., Burgman, M. A., Comer, P., Comín, F. A., Essl, F., Faber-Langendoen, D., . . . Zambrano-Martínez, S. (2013). Scientific Foundations for an IUCN Red List of Ecosystems. *PLoS ONE*, 8(5), e62111. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062111>

Kennedy, C. M., Oakleaf, J. R., Theobald, D. M., Baruch-Mordo, S., & Kiesecker, J. (2019). Managing the middle : A shift in conservation priorities based on the global human modification gradient. *Global Change Biology*, 25(3), 811-826. <https://doi.org/10.1111/gcb.14549>

- KnowSeas project, Whyte, H., Icely, D. (2013). Indicators and setting targets. Supporting the Marine Strategy Framework, Seven Guidelines. <https://www.msfd.eu/knowseas/guidelines/3-INDICATORS-Guideline.pdf>
- Lavergne, S., Mouquet, N., Thuiller, W., & Ronce, O. (2010). Biodiversity and Climate Change : Integrating Evolutionary and Ecological Responses of Species and Communities. *Annual Review Of Ecology Evolution And Systematics*, 41(1), 321–350. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144628>
- Manuel-Navarrete, D., Kay, J. J., & Dolderman, D. (2004). Ecological Integrity Discourses: Linking Ecology with Cultural Transformation. *Human Ecology Review*, 11(3), 215–229. <http://www.jstor.org/stable/24707715>
- Mora, F. (2018). The use of ecological integrity indicators within the natural capital index framework : The ecological and economic value of the remnant natural capital of México. *Journal For Nature Conservation*, 47, 77–92. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2018.11.007>
- Müller, F. & B. Fath (1998). The Physical Basis of Ecological Goal Functions - Fundamentals, Problems, and Questions. In: Müller, F. & M. Leupelt (Eds.), *Eco Targets, Goal Functions, and Orientors*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Müller, F. & B. Fath (1998). The Physical Basis of Ecological Goal Functions – An integrative discussion. In: Müller, F. & M. Leupelt (Eds.), *Eco Targets, Goal Functions, and Orientors*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Müller, F. (2005). Indicating ecosystem and landscape organisation. *Ecological Indicators*, 5(4), 280–294. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.03.017>
- Müller, F., & Burkhard, B. (2010). Ecosystem Indicators for the Integrated Management of Landscape Health and Integrity. Dans S. Jørgensen, L. Xu, R. Costanza (Eds.) *Handbook of ecological indicators for assessment of ecosystem health* (pp. 387-419). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/EBK1439809365>
- Müller, F., Hoffmann-Kroll, R., & Wiggering, H. (2000). Indicating ecosystem integrity — theoretical concepts and environmental requirements. *Ecological Modelling*, 130(1–3), 13–23. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00210-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00210-6)
- Newbold, T., Hudson, L. N., Arnell, A. P., Contu, S., De Palma, A., Ferrier, S., Hill, S. L. L., Hoskins, A. J., Lysenko, I., Phillips, H. R. P., Burton, V. J., Chng, C. W. T., Emerson, S., Gao, D., Pask-Hale, G., Hutton, J., Jung, M., Sanchez-Ortiz, K., Simmons, B. I., . . . Purvis, A. (2016). Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary ? A global assessment. *Science*, 353(6296), 288–291. <https://doi.org/10.1126/science.aaf2201>
- Nicholson, E., Watermeyer, K. E., Rowland, J. A., Sato, C. F., Stevenson, S. L., Andrade, A., Brooks, T. M., Burgess, N. D., Cheng, S., Grantham, H. S., Hill, S. L., Keith, D. A., Maron, M., Metzke, D., Murray, N. J., Nelson, C. R., Obura, D., Plumptre, A., Skowno, A. L., & Watson, J. E. M. (2021). Scientific foundations for an ecosystem goal, milestones and indicators for the post-2020 global biodiversity framework. *Nature Ecology & Evolution*, 5(10), 1338–1349. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01538-5>
- Noss, R. F. (1990). Indicators for Monitoring Biodiversity : A Hierarchical Approach. *Conservation Biology*, 4(4), 355–364. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1990.tb00309.x>
- Parrish, J.D., Braun, D.P., Unnasch R.S. (2003). Are We Conserving What We Say We Are? Measuring Ecological Integrity within Protected Areas. *BioScience*, 53(9), 851–860. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0851:AWCWWS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0851:AWCWWS]2.0.CO;2)
- Pereira, H. M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G. N., Jongman, R. H. G., Scholes, R. J., Bruford, M. W., Brummitt, N., Butchart, S. H. M., Cardoso, A. C., Coops, N. C., Dulloo, E., Faith, D. P., Freyhof, J., Gregory, R. D., Heip, C., Höft, R., Hurtt, G., Jetz, W., . . . Wegmann, M. (2013). Essential biodiversity variables. *Science*, 339(6117), 277–278. <https://doi.org/10.1126/science.1229931>
- Osmond, M. M., & Klausmeier, C. A. (2017). An evolutionary tipping point in a changing environment. *Evolution*, 71(12), 2930–2941. <https://doi.org/10.1111/evo.13374>
- Palialexis, A., Connor, D., Damalas, D., Gonzalvo, J., Micu, D., Mitchell, I., Korpinen, S., Rees, A. & Somma, F. (2019). Indicators for status assessment of species, relevant to MSFD Biodiversity Descriptor. Publications Office Of The European Union. <https://doi.org/10.2760/282667>
- Pereira, H. M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G. N., Jongman, R. H. G., Scholes, R. J., Bruford, M. W., Brummitt, N., Butchart, S. H. M., Cardoso, A. C., Coops, N. C., Dulloo, E., Faith, D. P., Freyhof, J., Gregory, R. D., Heip, C., Höft, R., Hurtt, G., Jetz, W., . . . Wegmann, M. (2013b). Essential biodiversity variables. *Science*, 339(6117), 277–278. <https://doi.org/10.1126/science.1229931>
- UN Environment Programme World Conservation Monitoring Centre (PNUE-WCMC) Glossary. (2024). <https://www.unep-wcmc.org/en/news/the-a-z-of-biodiversity>
- Quinlan, A. E., Berbés-Blázquez, M., Haider, L. J., & Peterson, G. D. (2015). Measuring and assessing resilience : broadening understanding through multiple disciplinary perspectives. *Journal Of Applied Ecology*, 53(3), 677–687. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12550>
- Roche, P. K., & Campagne, C. S. (2017). From ecosystem integrity to ecosystem condition : a continuity of concepts supporting different aspects of ecosystem sustainability. *Current Opinion In Environmental Sustainability*, 29, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.12.009>
- Rogers, B. M., Mackey, B., Shestakova, T. A., Keith, H., Young, V., Kormos, C. F., DellaSala, D. A., Dean, J., Birdsey, R., Bush, G., Houghton, R. A., & Moomaw, W. R. (2022). Using ecosystem integrity to maximize climate mitigation and minimize risk in international forest policy. *Frontiers In Forests And Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.929281>
- Rohwer, Y., & Marris, E. (2021). Ecosystem integrity is neither real nor valuable. *Conservation Science And Practice*, 3(4). <https://doi.org/10.1111/csp.2.411>
- Rousset, F., & Ronce, O. (2004). Inclusive fitness for traits affecting metapopulation demography. *Theoretical Population Biology*, 65(2), 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.tpb.2003.09.003>
- Schipper, A. M., Hilbers, J. P., Meijer, J. R., Antão, L. H., Benítez-López, A., De Jonge, M. M. J., Leemans, L. H., Scheper, E., Alkemade, R., Doelman, J. C., Mylius, S., Stehfest, E., Van Vuuren, D. P., Van Zeist, W., & Huijbregts, M. A. J. (2019). Projecting terrestrial biodiversity intactness with GLOBIO 4. *Global Change Biology*, 26(2), 760–771. <https://doi.org/10.1111/gcb.14848>
- Scholes, R. J., & Biggs, R. (2005). A biodiversity intactness index. *Nature*, 434(7029), 45–49. <https://doi.org/10.1038/nature03289>
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity. *Detailed scientific and technical information to support the review of the proposed goals and targets in the updated zero draft of the post-2020 global biodiversity framework*. (2021). CBD/SBSTTA/24/INF/21. Available from : <https://www.cbd.int/doc/c/21ab/d0fe/625d61435079e80fde83d851/sbstta-24-inf-21-en.pdf>
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity. *Science briefs on targets, goals and monitoring in support of the post-2020 global biodiversity framework negotiations*. (2022). CBD/WG2020/4/INF/2/Rev.2. Available from: <https://www.cbd.int/doc/c/6053/38a4/3710d6e83f5b006ef774607d/wg2020-04-inf-02-rev-01-en.pdf>
- Theobald, D. M. (2013). A general model to quantify ecological integrity for landscape assessments and US application. *Landscape Ecology*, 28(10), 1859–1874. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9941-6>
- Thompson, P. L., & Fronhofer, E. A. (2019). The conflict between adaptation and dispersal for maintaining biodiversity in changing environments. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 116(42), 21061–21067. <https://doi.org/10.1073/pnas.1911796116>
- Tomimatsu, H., Sasaki, T., Kurokawa, H., Bridle, J. R., Fontaine, C., Kitano, J., Stouffer, D. B., Vellend, M., Bezemer, T. M., Fukami, T., Hadly, E. A., Van Der Heijden, M. G., Kawata, M., Kéfi, S., Kraft, N. J., McCann, K. S., Mumby, P. J., Nakashizuka, T., Petchey, O. L., . . . Yachi, S. (2013). FORUM : Sustaining ecosystem functions in a changing world : a call for an integrated approach. *Journal Of Applied Ecology*, 50(5), 1124–1130. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12116>
- Wurtzebach, Z., & Schultz, C. (2016). Measuring Ecological Integrity : History, Practical Applications, and Research Opportunities. *BioScience*, 66(6), 446–457. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw037>
- Whitham, T. G., Bailey, J. K., Schweitzer, J. A., Shuster, S. M., Bangert, R. K., LeRoy, C. J., Lonsdorf, E. V., Allan, G. J., DiFazio, S. P., Potts, B. M., Fischer, D. G., Gehring, C. A., Lindroth, R. L., Marks, J. C., Hart, S. C., Wimp, G. M., & Wooley, S. C. (2006). A framework for community and ecosystem genetics : from genes to ecosystems. *Nature Reviews Genetics*, 7(7), 510–523. <https://doi.org/10.1038/nrg1877>
- Zampoukas, N., Henna, P., Bigagli, E., Hoepffner, N., Hanke, G. & Cardoso, C. (2012). Monitoring for the Marine Strategy Framework Directive : Requirements and Options. *Publications Office Of The European Union*. <https://doi.org/10.2788/77640>

ANNEXES

ANNEXE 1 : LES BASES DE LA DÉFINITION DE L'INTÉGRITÉ DES ÉCOSYSTÈMES DANS LE CADRE MONDIAL : INFORMATIONS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES PARTAGÉES LORS DES NÉGOCIATIONS

En avril 2021, l'organe subsidiaire chargé de fournir des avis scientifiques, techniques et technologiques (SBSTTA) a été invité à examiner les objectifs et cibles de l'avant-projet de cadre mondial. Un document d'informations scientifiques et techniques¹, produit par le secrétariat exécutif de la Convention sur la diversité biologique, a été fourni comme support aux discussions. Des éléments relatifs à l'intégrité des écosystèmes figuraient parmi les informations fournies (Encart A). Ces éléments s'appuient sur un ensemble d'articles scientifiques et lient trois notions : l'intégrité, la connectivité et la surface des écosystèmes. Pour ces notions, un bilan est réalisé pour divers écosystèmes (intégrité des forêts, surface des zones humides, fragmentation des cours d'eau...). Des liens sont également faits avec les notions de conservation, de restauration et de réhabilitation, de naturalité (au sens d'écosystèmes composés principalement d'espèces natives et déterminées par le climat et l'environnement géophysique) ainsi qu'avec les contributions de la nature aux personnes.

Une définition de l'intégrité des écosystèmes est proposée : elle est issue des travaux de [Hansen et al.](#) (2021). Elle sera maintenue et figurera dans le glossaire du cadre mondial (voir partie 1.1).

Focus - Informations scientifiques et techniques fournies par le secrétariat exécutif de la CDB comme support aux discussions à l'organe subsidiaire chargé de fournir des avis scientifiques, techniques et technologiques (SBSTTA) - Les éléments ci-dessous reprennent les passages du document se référant à l'intégrité².

Définition et état

La superficie, la connectivité et l'intégrité des écosystèmes sont essentielles pour la protection des espèces et la diversité génétique, le fonctionnement des écosystèmes et pour la fourniture continue de services écosystémiques (contributions de la nature aux personnes).

Un écosystème est généralement considéré comme étant intègre lorsque ses caractéristiques écologiques dominantes (par exemple la composition, la structure, la fonction et les processus écologiques) surviennent dans des gammes de variations naturelles et pouvant réagir et récupérer de la plupart des perturbations. Les indicateurs d'intégrité peuvent inclure la structure, la fonction et la composition d'un écosystème relativement à la gamme de variation pré-industrielle de ces caractéristiques.

La connectivité écologique est importante pour maintenir l'intégrité des écosystèmes à travers des parcelles fragmentées.

Globalement l'étendue et l'intégrité de la plupart des écosystèmes naturels déclinent et ces tendances se poursuivront dans un scénario business-as-usual. Certains scénarios démontrent qu'il est possible de renverser ces tendances et d'atteindre une augmentation substantielle dans l'étendue globale et l'intégrité des écosystèmes naturels d'ici 2050.

1. <https://www.cbd.int/doc/c/21ab/d0fe/625d61435079e80fde83d851/sbstta-24-inf-21-en.pdf>

2. Pour un historique complet de la préparation de l'actuel cadre, voir : <https://www.cbd.int/article/first-draft-global-biodiversity-framework-one-pagers>

Objectif et suivi

Pour atteindre la Vision 2050, une hausse nette significative à la fois dans la surface, la connectivité et l'intégrité des écosystèmes est nécessaire.

La perte des zones sauvages intactes existantes, de zones avec de fortes valeurs de biodiversité et d'intégrité, des écosystèmes rares ou vulnérables, ceux essentiels pour les fonctions planétaires, et ceux ne pouvant pas être restaurés, doit être évitée.

Au regard de la restauration, il convient de noter que la récupération de l'intégrité des écosystèmes (incluant la diversité et l'abondance des communautés d'espèces interagissant dans les écosystèmes) présente une inertie par rapport à la récupération surfacique des écosystèmes. La restauration peut comprendre : (a) la restauration des zones converties en habitats naturels ; (b) l'amélioration de l'intégrité écologique des zones naturelles dégradées ; et (c) la réhabilitation des zones converties et dégradées (par exemple, les terres agricoles dégradées) pour améliorer à la fois la productivité et l'intégrité.

Un réseau efficace de zones protégées et d'autres mesures de conservation basées sur les surfaces sera un outil important dans le maintien de la surface et de l'intégrité des écosystèmes.

Suivre les progrès nécessitera des informations à la fois sur l'étendue et l'intégrité des écosystèmes. Compte tenu de la diversité des écosystèmes, de leurs dynamiques et des pressions qui s'exercent sur eux, des informations ventilées par type d'écosystème et à différentes échelles seront probablement nécessaires. Si les informations sur l'étendue des écosystèmes naturels sont assez bien connues (notamment grâce à la télédétection), comparativement, il y a moins d'informations sur l'intégrité des écosystèmes.

Facteurs de perte, services et intégrité

Traiter les questions de changement d'occupation des sols contribue directement à l'amélioration des surfaces et de la connectivité des écosystèmes, ainsi qu'à l'intégrité des écosystèmes, alors que traiter les autres facteurs directs de perte de biodiversité (exploitation des espèces, espèces exotiques envahissantes, pollutions et changement climatique) contribue à divers aspects de l'intégrité des écosystèmes, incluant la richesse et la composition en espèces.

Cependant, la fourniture continue des contributions de la nature aux populations humaines peut être compromise par le déclin continu de la superficie, de la connectivité et de l'intégrité des écosystèmes ainsi que par le déclin des services de régulation qui soutiennent cette fourniture.

Les actions portant sur les conflits humains-nature et l'utilisation des espèces sauvages traitent des questions liées à l'étendue et à l'intégrité des écosystèmes. De même les actions visant la durabilité des services écosystémiques contribuent à améliorer l'intégrité des écosystèmes gérés. Également, la conservation de la diversité et de l'abondance des espèces est essentielle pour l'intégrité (fonctionnement et composition des communautés vivantes) des écosystèmes et contribue à la conservation de la diversité génétique.

La capacité de la nature à continuer d'apporter sa contribution aux populations humaines dépend de la superficie et de l'intégrité des écosystèmes naturels et gérés et de leurs espèces constitutives, ainsi que de la diversité génétique intraspécifique et de la diversité phylogénétique interspécifique.

L'amélioration de l'intégrité écologique des habitats naturels dégradés et la réhabilitation des habitats convertis et dégradés pour améliorer à la fois la productivité et l'intégrité dépendraient de la résolution des contraintes logistiques et d'autres contraintes pratiques.

Pour assurer la fourniture de services écosystémiques et maintenir l'intégrité des processus écologiques planétaires, les écosystèmes naturels doivent être maintenus et restaurés au-delà des aires protégées et la biodiversité doit également être entretenue dans les écosystèmes gérés.

Publications citées

Hansen *et al.*, 2021
Grantham *et al.*, 2021
Bourret *et al.*, 2011
Hutchinson *et al.*, 2003

Par ailleurs, un document d'expertise scientifique, indépendante, organisée par Future Earth (programme bioDISCOVERY) et le secrétariat de GEO BON, est venu alimenter la préparation du cadre. Dans cette expertise, les auteurs ont formulé cinq recommandations qui mettent en lumière l'intérêt d'utiliser la notion d'intégrité des écosystèmes au-delà des espaces naturels protégés :

- Définir l'intégrité en termes de caractéristiques des écosystèmes : « composition », « structure » et « fonction ». Il en découle que des indicateurs de suivi de l'intégrité nécessitent de rendre compte de l'évolution de ces caractéristiques, et pas seulement des pressions qui s'y exercent - un proxy de l'intégrité étant alors le caractère « intact » ou *intactness* de pressions anthropiques : voir Repère 1, encart A.
- Considérer l'intégrité des écosystèmes naturels (dans et hors des aires protégées) mais aussi celle des écosystèmes gérés (voir Repère 1 et Repère 3). La notion d'intégrité des écosystèmes pourrait s'appliquer à la cible 10 du cadre mondial de la biodiversité, relative à « une gestion durable des zones agricoles, aquacoles, halieutiques et forestières » et aux « services écosystémiques ».
- Définir, pour les écosystèmes gérés, des objectifs quantitatifs et qualitatifs d'intégrité distincts de ceux des écosystèmes naturels. L'interconnexion des écosystèmes naturels avec les écosystèmes gérés, orientés vers la multifonctionnalité, peut permettre une réalisation solidaire des fonctions écologiques et des services réciproques : écosystèmes gérés assurant la connectivité entre écosystèmes naturels ; écosystèmes naturels fournissant des habitats à diverses espèces. Ainsi, l'interconnexion entre les écosystèmes plus ou moins gérés par l'Humain permet de conserver des fonctions écologiques et d'assurer la fourniture d'un bouquet de services. Par exemple, les habitats semi-naturels dans les écosystèmes agricoles fournissent des habitats et des ressources pour des pollinisateurs (pollinisation entomophile) ou aux auxiliaires qui bénéficient aux cultures. Les auteurs indiquent des cibles chiffrées avec un « gain net d'au moins 5 % dans la superficie, la connectivité et l'intégrité des systèmes naturels, et d'au moins 20 % de l'intégrité des écosystèmes gérés. », cela dans un cadre visant « à ce que 20 % de la surface terrestre et marine des écosystèmes gérés soient des "habitats indigènes intacts" (c'est-à-dire 20 % d'habitats "naturels" dans la mosaïque des paysages multifonctionnels) » (Garibaldi *et al.*, 2020) pour faciliter, de façon appropriée et locale, le développement des actions nécessaires pour atteindre les objectifs du cadre mondial de la biodiversité – Voir Partie n°3.

- Définir également des états de référence et des indicateurs différents selon qu'on s'intéresse aux écosystèmes naturels ou aux écosystèmes gérés. Les caractéristiques des écosystèmes naturels ou gérés contribuent différemment à leur intégrité respective. Dans le cas d'un écosystème naturel, un état « cible » peut être déterminé, par exemple, par un état de référence historique et son biote indigène (tout en tenant compte du changement climatique). Dans certains écosystèmes gérés (ou dégradés), il peut être impossible, ou non souhaité, de revenir à un état « originel » et un nouvel état peut être visé, sur la base de la fourniture de fonctions et/ou de services écosystémiques. Notons que cette recommandation appelle la discussion : les processus écologiques étant les mêmes, on pourrait considérer que c'est la valeur des indicateurs qui devrait varier entre les types d'écosystèmes et cela même au sein d'écosystèmes gérés. D'un autre côté, un distinguo est nécessaire car les écosystèmes gérés sont soumis à des perturbations plus intenses et fréquentes dans la mesure où elles sont volontaires et nécessaires par définition de la gestion (ex. récolte, coupes rases...). Dès lors, rester dans les gammes de variations préindustrielles n'a pas de sens... De fait, préserver l'intégrité d'un écosystème géré pourrait revenir à maintenir sa gestion, et donc à faire perdurer les pressions anthropiques.
- Enfin, de lier explicitement « intégrité » et « restauration », l'intégrité faisant référence à la fonctionnalité d'un écosystème, aux processus écologiques.

ANNEXE 2 : RAPIDE APERÇU HISTORIQUE DE LA NOTION D'INTÉGRITÉ DES ÉCOSYSTÈMES

La littérature scientifique est riche de diverses définitions, de filiations ou de divergences entre ces définitions (Wurtzebach et Schultz, 2016).

Pour en citer quelques-unes : Leopold l'introduit à la fin des années 40 pour caractériser les exigences de base pour la stabilité des communautés biotiques. Cairns (1977) y associe une vision analytique et des notions de dynamique et de résilience : « La somme de l'intégrité chimique, physique et biologique peut être assimilée à l'intégrité écologique. Un système intègre peut résister, et se remettre de, à la plupart des perturbations imposées par les processus environnementaux naturels, ainsi qu'à de nombreuses perturbations majeures induites par l'homme », puis Karr and Dudley (1981) celles de référence à un état naturel, mais aussi les aspects de composition, structure et fonction à l'échelle des communautés : « nous définissons l'intégrité écologique comme la capacité d'un système écologique à soutenir et à maintenir une communauté d'organismes dont la composition, la diversité et l'organisation fonctionnelle sont comparables à celles des habitats naturels d'une région ».

Ce concept a été développé par Parrish *et al.* (2003), qui ont proposé « qu'un système écologique est intègre lorsque ses caractéristiques écologiques dominantes (par exemple, les éléments de la structure, de la composition, de la fonction et des processus écologiques) se situent à l'intérieur de leur plage de variation naturelle ». Dans cette veine, la définition de Hansen *et al.* (2021) étend au niveau des écosystèmes et précise la référence à un état principalement déterminé par l'environnement climatique et géophysique existant.

D'autres définitions se basent sur les principes de la thermodynamique et le concept de l'auto-organisation écologique (Müller, 2005). D'autres encore mettent l'accent sur le caractère entier ou complet.

Les définitions varient également selon que les auteurs considèrent la biodiversité et les écosystèmes comme partie intégrante - écosystème étant défini comme un environnement (biotope) et les organismes (biocénose) qui y vivent ; ou qu'ils considèrent les écosystèmes et la biodiversité comme deux compartiments distincts – cette dernière référence alors uniquement aux espèces et à leurs interactions.



Fondation pour la recherche sur la biodiversité. (2024).

Intégrité des écosystèmes : approches scientifiques et implications pratiques.

Coll. Expertises et synthèses. Paris, France : FRB, 82 pages.

Rédaction et relecture

Aurélie Delavaud, Ophélie Ronce, Christophe Leboulanger, Hervé Jactel, Fanny Lavastrou, Hélène Soubelet, Denis Couvet.

Contribution

Ce travail a été réalisé dans le cadre de réflexions menées par des membres de la mandature 2022-2025 du Conseil scientifique de la FRB : Luc Abbadie (Sorbonne Universités), Cécile Albert (CNRS), Adeline Barnaud (IRD), Didier Bazile (Cirad), Aurélien Besnard (EPHE), Philippe Billet (Université de Lyon, vice-président du CS de la FRB), Valérie Boisvert (Université de Lausanne), Joachim Claudet (CNRS), Sabrina Gaba (INRAE), Jennifer Harris (BRGM), Hervé Jactel (INRAE), Christophe Leboulanger (IRD), Ophélie Ronce (CNRS, présidente du CS de la FRB), Léa Tardieu (INRAE), Juliette Young (INRAE).

Crédits photographiques : unsplash

Graphisme :

Mise en page : Cellard Marie

© FRB 2025

ISBN : 979-10-91015-71-4

Afin de préserver la biodiversité, la Convention sur la diversité biologique (CDB), à travers le cadre mondial pour la biodiversité, propose de se préoccuper des écosystèmes, de leur intégrité et de leur résilience.

La FRB a initié, fin 2022, un travail autour de la notion « d'intégrité des écosystèmes », creusant ses dimensions à travers différentes approches scientifiques. Composantes d'un écosystème, mesures et indicateurs, usages de cette notion sont autant de questions soulevées et analysées dans ce document. Les implications pratiques des réponses à apporter peuvent être multiples et antagonistes. Aussi, ces questions doivent être posées dans un cadre dynamique – et évolutif – de la biodiversité !

La Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB) a pour mission de favoriser les activités de recherche sur la biodiversité en lien avec les acteurs de la société. Susciter l'innovation, développer et soutenir des projets, diffuser les connaissances et mobiliser l'expertise sont au cœur de ses actions.

Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB)
195, rue Saint-Jacques 75005 Paris
www.fondationbiodiversite.fr
@FRBiodiv



Soutiens institutionnels de la FRB

