

De l'écologie à l'ingénierie écologique

Par Luc ABBADIE et Yann DUSZA

Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Est, Créteil, Université Denis Diderot, CNRS, INRA, IRD

Restaurer les milieux naturels, les adapter aux changements climatiques, piloter les services écosystémiques délivrés par la biodiversité, créer *ex nihilo* des milieux en tant qu'alternatives ou que compléments à des solutions d'ingénierie technique : tels sont les enjeux scientifiques et opérationnels de l'ingénierie écologique. En s'appuyant sur les concepts et les théories de l'écologie scientifique, l'ingénierie écologique tente de relever quelques-uns des défis de la complexité écologique en produisant des milieux résilients et évolutifs capables de délivrer des services écosystémiques durables.

La question environnementale a profondément changé au cours de ces dernières décennies. Trois étapes majeures peuvent être repérées dans la perspective de l'ingénierie écologique. La première est la publication, en 1972, sous la houlette de Dennis Meadows, d'un rapport commandé par le Club de Rome au *Massachusetts Institute of Technology*, qui, comme l'indique son titre *The limits to growth*, attire l'attention sur l'imparable finitude de la croissance quantitative de l'humanité⁽¹⁾. La seconde étape a été le lancement en 2000 et 2002 du concept

d'anthropocène par Paul Crutzen, chimiste de l'atmosphère et prix Nobel de chimie, qui montre que l'espèce humaine est devenue un déterminant majeur d'un certain nombre de dynamiques géochimiques, physiques et biologiques à l'échelle planétaire⁽²⁾. La troisième étape est un ensemble de rapports des Nations Unies issus d'un *Millennium Ecosystem Assessment* et publiés en 2005, qui proclament la dépendance de l'humanité vis-à-vis de processus biophysiques et écologiques en train de changer dans un sens qui ne nous est pas favorable, et qui popularisent au passage le concept de service écosystémique⁽³⁾.

L'émergence d'un concept

Finitude des ressources, prise de contrôle partielle des humains sur la dynamique de la biosphère, dépendance des humains vis-à-vis d'une nature spontanée et lointaine : ces nouveaux paradigmes confortent une vision de plus en plus interventionniste de notre rapport à la nature. Celle-ci n'est pourtant pas totalement nouvelle. En effet, la conscience de la dégradation continue de la qualité de l'environnement, qui était alors l'apanage d'une infime minorité, avait déjà engendré des politiques de protection de la nature un peu partout dans le monde, après la Seconde guerre mondiale. Mais la seule préservation d'îlots de nature spontanée et de quelques espèces a été rapidement perçue comme insuffisante face à l'ampleur de la régression de la biodiversité des milieux naturels.

Photo © Volker Steger/SIEMENS-SPL-PHANIE



Prix Nobel de chimie 1995, Paul Crutzen (né en 1933) est professeur de chimie à l'Institut Max-Planck de chimie, à Mayence (Allemagne).

« La seconde étape a été le lancement en 2000 et 2002 du concept d'anthropocène par Paul Crutzen, chimiste de l'atmosphère et prix Nobel de chimie, qui montre que l'espèce humaine est devenue un déterminant majeur d'un certain nombre de dynamiques géochimiques, physiques et biologiques à l'échelle planétaire. »

1) MEADOWS (D. H.) & al., *The limits to growth*, A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind, *Universe Books*, New York, 1972.

2) CRUTZEN (Paul J.), "Geology of mankind", *Nature*, n°415, 23, 2002 (DOI :10.1038/415023a).

3) *Millennium Ecosystem Assessment*, "Ecosystems and Human Well-being: Synthesis", *Island Press*, Washington, DC, 2005.

L'idée de restauration s'est peu à peu imposée. Sa concrétisation doit beaucoup au législateur nord-américain, qui a introduit dans une loi de 1972 relative à l'eau l'obligation de restaurer une zone humide dégradée, voire d'en créer une nouvelle en cas d'atteinte portée à une zone humide au cours d'un aménagement ⁽⁴⁾. Cette disposition, appliquée avec des modalités variées selon les États, a engendré aux États-Unis la constitution d'un nouveau secteur économique. En France, la loi de protection de la nature de 1976, qui a rendu obligatoire les études d'impact, a voulu elle aussi systématiser les pratiques de restauration en lançant la fameuse séquence « éviter-réduire-compenser » ⁽⁵⁾. Mais celle-ci est malheureusement restée quasi lettre morte jusqu'au Grenelle de l'Environnement.

En quoi le concept d'ingénierie écologique diffère-t-il de celui de restauration ? Il est clairement beaucoup plus large : il renvoie bien entendu aux opérations de restauration de milieux dégradés, mais il fait aussi référence à la création de nouveaux écosystèmes sur le terrain ou en milieu contrôlé, au pilotage des services écosystémiques, à l'atténuation des changements climatiques, à l'adaptation des systèmes écologiques aux changements climatiques et à l'érosion de la biodiversité et à la mise en œuvre de compensations. L'ingénierie écologique dépasse donc les objectifs traditionnels de restauration et de réparation de la nature pour franchir un degré supplémentaire d'instrumentalisation de la nature ⁽⁶⁾.

En ce sens, l'ingénierie écologique est une nouvelle forme de biotechnologie et d'ingénierie du vivant qui manipulerait non plus les gènes ou les cellules, mais les communautés et les écosystèmes. Elle pose donc les mêmes questions éthiques, juridiques et politiques que les biotechnologies traditionnelles, à cette différence près que tout ou presque reste à faire en ce qui la concerne ⁽⁷⁾. L'ingénierie écologique comporte à l'évidence une dimension prométhéenne : elle est positionnée pour « re-crée la nature » ⁽⁸⁾, et c'est en ce sens qu'elle s'inscrit dans le triptyque limites-impact-dépendance évoqué plus haut : puisque notre monde est fini et puisque nous dépendons totalement de lui, puisqu'il est sur des dynamiques qui ne nous conviennent pas mais que nous avons engendrées, sa « reprise en main » n'est plus une option, c'est une obligation. Au fond, l'ingénierie écologique se nourrit d'un constat d'échec : si la réparation et le pilotage sont devenus inévitables, c'est parce que la prévention et la prudence n'ont pas suffi.

L'enjeu d'une définition

Dans « ingénierie écologique », il y a « ingénierie » et il y a « écologique ».

Le terme « ingénierie » est clair : il désigne la mise en place de travaux et d'équipements à la lumière des connaissances scientifiques, et surtout techniques.

Le vocable « écologique » est, quant à lui, beaucoup plus ambigu, en raison de sa polysémie ⁽⁹⁾. Il peut en effet renvoyer aux qualificatifs d'écolo, de vert, de naturel...

Ce n'est évidemment pas de cela qu'il s'agit : l'ingénierie écologique a pour outil principal le vivant. Or, tous les organismes présentent un potentiel de croissance expo-

nentiel : utiliser des organismes, c'est utiliser des outils puissants qui peuvent se déployer très rapidement sur de grandes surfaces et générer avec efficacité les phénomènes escomptés, et ceux qui ne le sont pas.

L'ingénierie écologique peut engendrer des effets collatéraux négatifs, dont il est difficile de se prémunir (il suffit de penser à l'histoire écologique récente de l'Australie pour s'en convaincre). L'ingénierie écologique est tout sauf une ingénierie douce.

Le qualificatif « écologique » renvoie aussi à une science, l'écologie ⁽¹⁰⁾. Réaliser une opération d'ingénierie écologique, c'est-à-dire (par exemple) modifier une forêt pour en faire un puits de carbone plus efficace ou créer une zone humide pour contribuer à l'épuration des eaux résiduaires, ou encore modifier une communauté de poissons pour lutter contre l'eutrophisation d'un plan d'eau, c'est en réalité manipuler ou créer un système complexe, c'est-à-dire un ensemble constitué d'un grand nombre d'éléments en interaction les uns avec les autres et dont le comportement n'est pas déductible du comportement des éléments considérés individuellement. En exagérant à peine, on peut dire que personne n'a jamais réussi à gérer un système écologique en tenant compte de sa complexité, ce qui est sans aucun doute à l'origine de bien des problèmes d'environnement. L'agriculture productiviste occidentale en est malheureusement une « bonne » illustration.

Dès son origine, l'écologie s'est constituée autour du projet d'analyser l'organisation et la dynamique des systèmes écologiques complexes. Au fil des décennies, cumulant observations, expérimentations et modélisations, elle s'est dotée d'un capital de théories qui lui permettent aujourd'hui de disposer d'une connaissance prédictive, qui rend l'écologie applicable. De fait, c'est là que réside le grand enjeu de la définition de l'ingénierie écologique, celui de l'innovation. La théorie écologique permet un cadrage des actions d'ingénierie écologique, qui, grâce à une explicitation de la complexité et des échelles de

(4) HOUGH (P.) & ROBERTSON (M.), "Mitigation under section 404 of the Clean Water Act: where it comes from, what it means", *Wetlands Ecology and Management*, 17, 2009, pp. 15-33.

(5) Article 2 de la loi n°76-629 du 10 juillet 1976 : « Le contenu de l'étude d'impact qui comprend au minimum une analyse de l'état initial du site et de son environnement, l'étude des modifications que le projet y engendrerait et les mesures envisagées pour supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables pour l'environnement ».

(6) Une forme extrême d'approche réparatrice est la partie biologique de la géo-ingénierie, qui, autour des questions de séquestration du dioxyde de carbone, d'albédo et de transpiration, envisage de manipuler sur de gigantesques surfaces continentales ou océaniques des communautés végétales (forêts et phytoplancton, principalement).

(7) Voir à ce sujet MARIS (Virginie), *Nature à vendre - Les limites des services écosystémiques*, Paris, Éditions Quae, 2014.

(8) « Recréer la nature » a été le nom d'un programme de recherche lancé en 1995 par le ministère de l'Environnement.

(9) Voir BLOUIN (Manuel), « Définir l'ingénierie écologique : quels enjeux ? », in REY (Freddy), GOSSELIN (Frédéric) & DORÉ (Antoine), *Ingénierie écologique : action par et/ou pour le vivant ?*, Paris, Éditions Quae, 2014.

(10) Pour une définition possible de l'écologie, voir ABBADIE (L.), « L'écologie, une science pour le développement durable », in EUZEN (A.), EYMARD (L.) & GAILL (F.), *Le Développement durable à découvert*, Paris, CNRS Éditions, 2013.

temps et d'espace impliquées, peut aider à identifier les trajectoires les plus probables du système et à en minorer les effets collatéraux indésirables.

De ce fait, la définition de l'ingénierie écologique donnée par le Programme interdisciplinaire de recherche en ingénierie écologique du CNRS en 2008 ⁽¹¹⁾ semble avoir conservé toute sa pertinence : « *L'ingénierie écologique désigne le corpus des savoirs mobilisables pour la gestion de milieux, la conception, la réalisation et le suivi d'aménagements ou d'équipements inspirés de, ou basés sur les mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques (auto-organisation, diversité, structures hétérogènes, résilience, par exemple)* ». Si la nature est prise comme modèle, c'est en raison non pas d'une quelconque sacralisation de celle-ci, mais bien d'une volonté de s'inspirer de, ou de copier « les organisations et les dynamiques qui ont été testées et validées par le crible de l'évolution » ⁽¹²⁾.

Les bases écologiques de l'ingénierie écologique

L'ingénierie écologique opérationnelle est ancrée dans l'empirisme. Cela suffit, dans bien des cas, notamment

lorsque l'objectif assigné à un écosystème restauré ou créé repose sur le maintien d'une ou de quelques espèces ou sur une ou quelques fonctions particulières dans un contexte biophysique relativement stable.

Mais cet empirisme a toutes les chances de se révéler insuffisant si les objectifs sont pluriels et si le contexte biophysique est variable, ce qui est désormais toujours le cas ne serait-ce qu'en raison du changement climatique et de l'érosion de la biodiversité. En contexte changeant, la prédiction ne peut reposer sur une extrapolation : l'explicitation de la complexité devient inévitable.

Manipuler un système complexe est toujours aventureux. À de rares exceptions près, il n'est pas envisageable de répondre à la question « Sur quel bouton dois-je appuyer pour obtenir tel résultat ? ». En revanche, il est possible de baser l'action sur un certain nombre d'avancées concep-

(11) ABBADIE (L.), BASTIEN-VENTURA (C.) & FRASCARIA-LA-COSTE (N.), « Bilan et enjeux du programme interdisciplinaire Ingeco du CNRS (2007-2001) : un tournant pour l'ingénierie écologique en France ? », *Nature, Sciences, Sociétés*, n°23, 2015, pp. 389-396.

(12) ABBADIE (L.), « Nature sous contrôle », in *La Recherche* 415, supplément « Objectif Terre 2050 », 2008, pp. 80-81.



Photo © Rowan E. Bestmann/ ROBERT HARDING PICTURE LIBRARY- BIOSPHOTO

Système de traitement novateur et écologique des eaux usées de la ville de Riyad (Arabie Saoudite), 2010.

« Une opération d'ingénierie écologique doit avant tout reposer sur une vision systémique. Un système qui est tout d'abord local : toutes les composantes et tous les processus de l'écosystème sont liés entre eux et se modifient l'un l'autre. Restaurer ou créer un système écologique, c'est manipuler des interactions. »

tuelles de la recherche en écologie, notamment autour des questions de durabilité et de résilience.

Une opération d'ingénierie écologique doit avant tout reposer sur une vision systémique. Un système qui est tout d'abord local : toutes les composantes et tous les processus de l'écosystème sont liés entre eux et se modifient l'un l'autre. Restaurer ou créer un système écologique, c'est manipuler des interactions. Ignorer ces interactions, cela reviendrait à renoncer à connaître les dynamiques à long terme du système et à détecter les effets collatéraux de l'action envisagée. L'écologie n'est pas en mesure aujourd'hui de préciser et de quantifier toutes ces interactions, même si les progrès réalisés en la matière sont quotidiens. Elle peut, en revanche, notamment grâce aux outils de simulation numérique, proposer *a minima* des scénarios probables et permettre ainsi de prendre une décision mûrement réfléchie.

Un système est aussi régional. Tout écosystème fait partie d'un réseau d'écosystèmes similaires constituant le méta-écosystème et s'inscrit dans des réseaux d'écosystèmes dissemblables. La durabilité d'un écosystème repose sur sa capacité à échanger avec l'« extérieur » : des gènes, des individus, des espèces, des matériaux et de l'énergie. Ainsi, il ne sert à rien, par exemple, de reconstituer une zone humide dans une carrière abandonnée s'il n'y a pas une autre zone humide à une distance raisonnable, distance qui peut être déterminée scientifiquement. Les continuités écologiques, les corridors et les milieux intermédiaires dans lesquels se situe la zone d'intervention en conditionnent la réussite.

Un écosystème est un système évolutif, et sa capacité à se modifier est la clé de son maintien dans le temps, éventuellement sous des formes renouvelées (c'est ce que l'on appelle sa « résilience »). Plusieurs caractéristiques semblent impliquées dans sa capacité de changer avec son environnement (y compris dans sa dimension biologique, avec, par exemple, la survenue d'une maladie), même si quelques exceptions ont pu être signalées ou suggérées :

- En premier lieu, la diversité biologique de l'écosystème, que celle-ci soit génétique ou spécifique, ce qui conduit à construire des écosystèmes d'une diversité supérieure à la diversité minimale (si tant est que celle-ci existe) afin de maximiser les passages de relais entre les organismes le constituant, lesquels sont les garants de la continuité de son fonctionnement ;
- Ensuite, l'hétérogénéité de l'organisation de l'écosystème, tant en termes de conditions physico-chimiques (création de sols d'épaisseurs différentes, par exemple) qu'en termes de structure démographique (s'assurer d'une multiplicité des classes d'âge dans un peuplement d'arbres, par exemple) ;
- Le régime des perturbations est un point souvent oublié : l'exposition de l'écosystème à des perturbations localisées et irrégulières (ouverture d'une clairière dans une forêt, par exemple) est un mécanisme principal d'entretien des hétérogénéités et de la biodiversité ;
- Le recours à des espèces locales permet non seulement de ne pas appauvrir la diversité génétique, mais aussi

d'augmenter les chances de disposer d'espèces qui soient capables de répondre aux contraintes de l'environnement et à leurs changements les plus probables localement : on peut en effet considérer que les espèces locales disposent de l'information génétique qui leur sera nécessaire en cas de changement, une information transmise par leurs ancêtres qui ont déjà connu des changements analogues (ce que semblent confirmer les apports récents de l'épigénétique)⁽¹³⁾ ;

- Enfin, un autre point souvent méconnu est le fait que les organismes vivants changent très fortement les conditions physico-chimiques des milieux dans lesquels ils se trouvent, et c'est d'ailleurs pour cela qu'ils sont un outil privilégié de l'ingénierie écologique. Cela signifie que la modification d'un milieu pour accueillir telle ou telle communauté n'est pas définitive, parce que celle-ci, une fois installée, va à son tour modifier le milieu, et pas nécessairement à son avantage. On est là confronté à la notion de rétroaction, qui peut constituer un outil ou, au contraire, une contrainte pour l'ingénierie écologique.

Le déploiement de l'ingénierie écologique

Au-delà de la restauration de milieux naturels justifiée par des raisons patrimoniales, esthétiques, éthiques, paysagères ou utilitaristes (restauration de zones humides pour se protéger contre des crues, par exemple), l'ingénierie écologique se déploie progressivement dans le milieu urbain pour favoriser l'adaptation de ce dernier au changement climatique, dans le milieu agricole avec l'invention de l'agroécologie, en foresterie avec les perspectives de séquestration du dioxyde de carbone, dans l'ensemble du paysage avec le développement des trames vertes et bleues et la mise en œuvre de la compensation écologique. Par son approche systémique, elle peut permettre de remettre en cohérence les fonctionnements des diverses composantes d'un territoire. Mais elle ouvre aussi la voie à une spécialisation outrancière de vastes surfaces qui pourraient être entièrement dédiées à la maximisation de tel ou tel service écosystémique (le risque est particulièrement élevé en ce qui concerne la séquestration de CO₂).

Les modalités de la conception et de la mise en œuvre des opérations d'ingénierie écologique soulèvent les mêmes problèmes économiques, sociaux et culturels que toute autre ingénierie. Mais, une différence majeure, comme nous l'avons dit plus haut, est que l'ingénierie écologique est un outil très puissant de modelage du milieu de vie des humains, qui peut concerner très vite de vastes territoires et beaucoup de monde, et qui peut engendrer des catastrophes écologiques de grande ampleur quand elle est mal utilisée. La concertation, la clarté et le contrôle démocratique sont des prérequis absolus d'une ingénierie écologique réellement au service d'un développement durable.

(13) L'épigénétique analyse les mécanismes moléculaires qui modulent l'expression des gènes des organismes, notamment en fonction des variations de leur environnement.