

Ingénierie écologique et écologie de la restauration : spécificités et complémentarités

Geneviève Barnaud^a et Jean-Louis Chapuis^{ab}

Face à la détérioration de l'environnement, entraînant la perte de qualité de vie, de biodiversité, mais également de fonctions et de valeurs des écosystèmes, des politiques, des scientifiques et des ingénieurs ont réagi. Dès 1972, la Conférence sur l'environnement organisée par les Nations-Unies à Stockholm retenait le principe suivant : la capacité de la terre à produire des ressources renouvelables vitales doit être maintenue et, si possible, restaurée ou améliorée. Ce principe, repris et complété à l'assemblée générale des Nations-Unies en octobre 1982, s'est trouvé ensuite accolé à la notion de développement durable dans la Charte de la Terre de 1997 élaborée après le Sommet de la Terre (Rio, 1992). Depuis les années soixante-dix, les réglementations et les processus de production se voulaient plus respectueux de l'environnement. Pourtant, ces avancées ont montré leurs limites (coût, devenir des produits secondaires, impossibilité de traiter de la complexité du vivant). Parallèlement, des chercheurs et techniciens ont entrepris des projets visant à contrôler les facteurs de perturbation, à manipuler les processus et mécanismes, à récupérer si possible ou créer des propriétés écologiques jugées intéressantes. Dans ce contexte, deux principaux courants issus plus ou moins directement de l'écologie appliquée et fondamentale ont vu le jour au cours des années soixante-dix à quatre-vingt.

D'une part, l'ingénierie écologique qui couvre un champ large et pragmatique allant de la lutte contre la pollution diffuse ou l'érosion, à la gestion durable de systèmes écologiques productifs. Ses interventions résultent en général d'une combinaison de savoir provenant des sciences de l'ingénieur et de l'écologie, y compris le détournement de techniques ayant fait leur preuve dans la perturbation des systèmes écologiques. D'autre part, l'écologie de la restauration, discipline fondamentale, rattachée aux problématiques de conservation de la nature, qui vise à « remonter » des écosystèmes fonctionnels, diversifiés, durables et autonomes en analysant les processus en œuvre.

Passer en revue les origines et motivations des experts impliqués dans les champs considérés permet de comprendre en quoi et comment leurs manières de travailler sont complémentaires. Compte tenu des sources bibliographiques exploitées et de l'intérêt des zones humides comme modèles, les propos sont orientés vers ce type de milieux en Amérique du Nord.

L'ingénierie écologique

La surexploitation de certaines ressources, l'évolution démographique et les limites des techniques conventionnelles de traitement des pollutions sont à l'origine de la conception de systèmes de production moins dangereux pour

Les contacts

Muséum national d'histoire naturelle, département Écologie et gestion de la biodiversité,
^a USM Inventaire et suivi de la biodiversité
^b UMR ECOBIO 6553
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire,
case postale 51,
75005 Paris

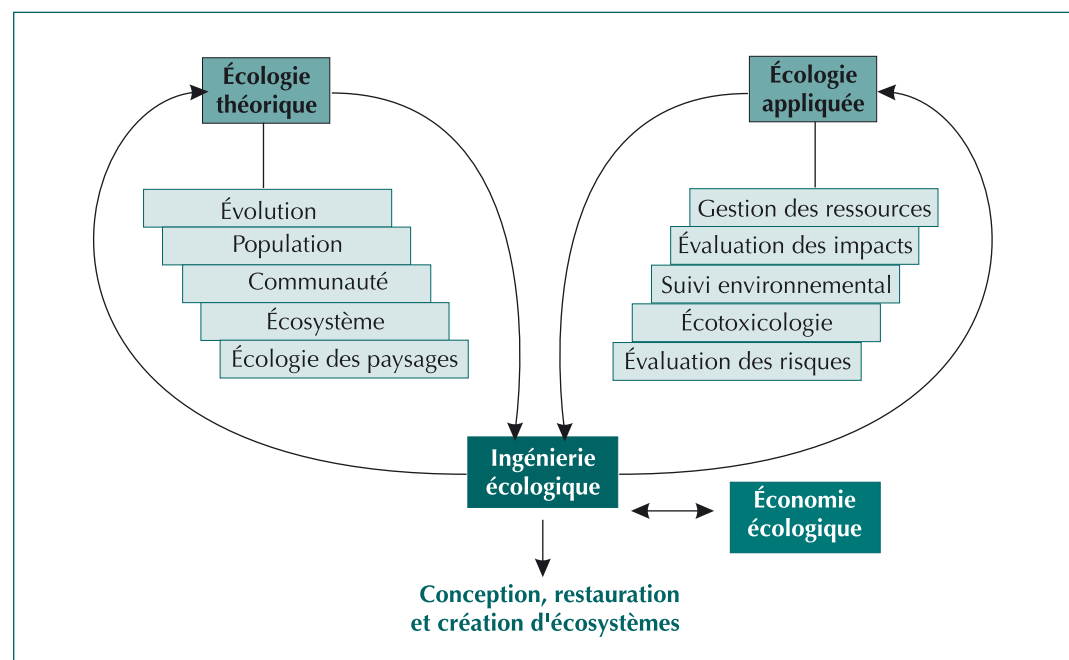
l'environnement et plus durables. Simultanément, des recherches en écologie mettaient en évidence la capacité des écosystèmes à être autonomes en « manipulant » leur environnement physique et chimique, à produire des biens et services utilisés par l'homme de manière empirique et de longue date. Par ailleurs, les avancées théoriques et appliquées ouvraient de nouvelles possibilités de valoriser les fonctions et services fournis par les écosystèmes dans le cadre du développement de technologies innovantes, économiques et durables.

À l'interface de l'écologie et des savoir-faire techniques

Dans leur ouvrage fondateur intitulé *Ecological engineering. An introduction to ecotechnology*, Mitsch et Jørgensen (1989) ont attribué à H.T. Odum l'invention de cette nouvelle discipline, au début des années soixante. Ce spécialiste américain, de grand renom en science de l'environnement, a formulé la première définition de ce nouveau champ d'investigation et d'intervention. Il s'agissait pour lui « d'une manipulation environnementale faite par l'homme en utilisant une faible quantité d'énergie supplémentaire pour contrôler des systèmes dans lesquels les forces énergétiques principales proviennent encore de sources naturelles. L'ingénierie écologique a pour point de départ un écosystème naturel, mais

les nouveaux écosystèmes développés peuvent différer un peu ». En 1971, Odum précisait : « La gestion de la nature est une ingénierie écologique, un comportement avec des aspects particuliers et supplémentaires par rapport à ceux de l'ingénierie traditionnelle. Un partenariat avec la nature serait un meilleur terme ». Les Chinois, précurseurs dans le domaine, conçoivent l'ingénierie écologique comme un système fondé sur le fonctionnement du vivant (recyclage, productivité, interactions spécifiques), combiné aux techniques traditionnelles ou nouvelles, pour obtenir simultanément différentes productions en un même lieu et sans rejets polluants (cf. rizières). Au début des années quatre-vingt, des Européens font référence à l'écotechnologie qu'ils définissent comme l'utilisation de toute technologie pour une gestion écologique des écosystèmes, avec comme objectif de diminuer les coûts des mesures et leurs dangers pour l'environnement (Straskraba, 1993). Charles et Kalaora (2003) lient l'apparition de l'ingénierie écologique au développement de problématiques d'aménagement et y voient « une incitation majeure à des démarches intégrées, donc aussi itératives, adaptatives et par étapes ».

Mitsch et Jørgensen (1989), considérant l'ingénierie écologique et l'écotechnologie comme des disciplines synonymes et normatives, ont retenu la définition de Mitsch proposée en 1988. Il s'agit



► Figure 1 – Relations entre écologie théorique, écologie appliquée et ingénierie écologique (d'après Mitsch, 1993).

de « *la conception d'une société humaine avec son environnement naturel pour le bénéfice des deux* ». Une légère modification a ensuite été apportée « *la conception d'écosystèmes durables qui intègrent la société humaine avec son environnement naturel pour le bénéfice des deux* ».

Pour la *Society for Ecological Restoration*, l'ingénierie écologique implique la manipulation de matériaux naturels, d'organismes vivants et de l'environnement physico-chimique pour atteindre des objectifs spécifiquement humains et résoudre des problèmes techniques. Elle diffère de l'ingénierie traditionnelle qui dépend de matériaux artificiels (acier, béton, etc.) et met en avant la certitude dans les prévisions (SER, 2002).

L'écologie fondamentale et appliquée fournissent des concepts à l'ingénierie écologique (figure 1), les connaissances obtenues à partir des succès et échecs des projets justifiant ou réfutant en retour des théories écologiques (Mitsch, 1996). En outre, les apports de l'écologie traditionnelle ne définissent pas à eux seuls le champ couvert par l'ingénierie écologique. On peut comparer cette relation à celle de l'ingénierie chimique avec la chimie ou de l'ingénierie biochimique avec la biochimie. Cette ingénierie, soucieuse du vivant, doit logiquement être considérée comme une nouvelle occupation relevant à la fois de l'écologie et de l'ingénierie, avec pour objectifs la réhabilitation d'écosystèmes très perturbés (pollution, aménagement-équipement) et la création de nouveaux écosystèmes durables présentant une valeur humaine et écologique.

Mitsch et Jørgensen (1989) ont attiré l'attention sur les risques de confusion avec deux autres principaux domaines :

– l'ingénierie environnementale axée sur les technologies de lutte contre la pollution à l'aide d'un apport énergétique et d'équipements artificiels dont le fonctionnement mime certains processus écologiques (filtrage, floculation, etc.). Elle a vu le jour au début des années soixante grâce au développement de l'écotoxicologie et de la modélisation pour établir les normes d'émission et évaluer la capacité d'auto-épuration des écosystèmes ;

– l'ingénierie biologique tournée plus spécialement vers les manipulations génétiques à l'échelle de la cellule pour produire de nouveaux organismes capables de remplir certaines fonctions. Cette option peut d'ailleurs présenter un risque environnemental.

Selon Mitsch (1998), l'ingénierie écologique englobe des activités faisant partie de l'agronomie, l'agroforesterie, l'ingénierie des territoires ou de pratiques implantées de manière empirique. De même, elle comprend des domaines synonymes ou similaires (restauration et réhabilitation d'écosystèmes, reconstruction d'habitats, biomanipulation, écologie industrielle ou synthétique, hydroécologie). À ce propos, on parle également en France de génie écologique, d'ingénierie des systèmes écologiques, de gestion écologique.

L'identification des écosystèmes les plus adaptés aux besoins humains ainsi que la compréhension de leur fonctionnement et de leurs fonctions se trouvent au cœur de l'ingénierie écologique. L'objectif est d'utiliser au mieux les multiples possibilités offertes par les mécanismes et processus développés par le vivant tout en le respectant ; le prototype de machine correspond alors à un écosystème. Par contre, l'ingénierie conventionnelle s'appuie sur des installations et des dispositifs artificiels pour éliminer, transformer, ou limiter les polluants, sans s'appuyer directement sur la contribution potentielle des écosystèmes manipulés. Pour Mitsch (1993, 1996), les concepts propres à l'écotechnologie, discriminants par rapport à l'ingénierie classique, s'énoncent comme suit :

(1) application de la notion d'autonomie ou d'auto-organisation ; (2) construction d'écosystèmes comme test à l'acide des théories écologiques ; (3) dépendance vis-à-vis des approches systémiques ; (4) conservation des sources d'énergie non renouvelables ; (5) conservation de la nature. Ils s'appliquent à différentes échelles, du mésocosme ou système clos (0,1-1 ha), à l'écosystème (1-10 ha), ou à la région (10-100 ha).

Comme le soulignent Mitsch et Jørgensen (2003), nous bénéficions de nombreuses expériences en ingénierie écologique, mais le socle théorique reste faible, les résultats des « recettes » appliquées n'étant pas systématiquement publiés dans des supports accessibles. En effet, des ingénieurs ont créé de nombreux milieux aquatiques sans forcément comprendre leur intégrité biologique et leur fonctionnement à long terme. Des écologues et paysagistes ont conçu des écosystèmes à partir de méthodes au cas par cas. Aujourd'hui, il est possible de formaliser l'utilisation de ces approches compte tenu des avancées en écologie systémique. Pour ces auteurs, nous devons maintenant comprendre comment nous pouvons influencer les processus dans les écosystèmes ainsi que

les interrelations entre composantes d'un écosystème, mais surtout comment les modifications apportées peuvent produire des changements dans les écosystèmes voisins.

Vers une institutionnalisation

La première conférence internationale sur l'ingénierie écologique s'est tenue à Trosa (Suède, 1991), avec comme objectif principal le traitement des eaux usées. Par la suite, un atelier a eu lieu à Washington en mai 1993. Depuis, des conférences se déroulent régulièrement sur ce thème dans différents pays.

DES RÉSEAUX ET DES PUBLICATIONS SPÉCIALISÉS
Une société, l'*International Ecological Engineering Society* (IEES) créée en 1993 [<http://www.iees.ch/>], a pour mission de promouvoir les contacts et d'améliorer les coopérations entre les scientifiques et les ingénieurs de différents pays. Il s'agit de faciliter les échanges d'informations entre des organisations scientifiques, des équipes d'enseignants, des associations non gouvernementales, des agences gouvernementales, des entreprises privées. Pour cela, des programmes de recherche sont initiés, des conférences et stages organisés, des études publiées. Des filiales de l'IEES ont vu le jour en Allemagne et en Amérique du Nord, cette dernière mettant l'accent sur l'organisation de programmes universitaires et la certification de professionnels.

L'IEES publie deux revues : *Ecological Engineering*, *The Journal of Ecotechnology* depuis 1992, et *EcoEng Newsletter* depuis 1999. D'autres sociétés de génie civil éditent des revues d'ingénierie environnementale contenant des articles à connotation écologique. Par ailleurs, de nombreux ouvrages spécialisés sont maintenant disponibles et traitent de thèmes centraux de l'ingénierie écologique, notamment le traitement d'effluents domestiques, miniers, etc.

DES PROGRAMMES INTERNATIONAUX ET DES FORMATIONS ADÉQUATES

Le SCOPE (*Scientific Committee on Problems of the Environment*), avec le soutien de l'*US National Academy of Sciences*, a approuvé un projet de séminaires pluriannuels concernant des équipes localisées sur trois continents. Il s'intitule *Ecological Engineering and Ecosystem Restoration* (Mitsch, 1996). L'une de ces rencontres a eu lieu à Paris en 1998 sur le thème « *Ecology engineering applied to river and wetland restoration* » (Mitsch et al., 2002).

Selon Mitsch et Jørgensen (2003), actuellement, l'écologie est peu enseignée aux ingénieurs qui en ont une image démodée : une discipline descriptive et non quantitative. Pour leur part, les scientifiques et gestionnaires de l'environnement ne sont pas coutumiers des approches pragmatiques visant à résoudre un problème environnemental précis. Ils ont du mal à passer de la description à la prédiction, au contraire des ingénieurs civils qui ont l'habitude d'appliquer des résultats scientifiques pour concevoir des systèmes et résoudre des problèmes, de disposer de plans précis et de prévisions sur le fonctionnement de l'équipement réalisé (Mitsch, 1998). Habitué aux procédures et pratiques standardisées, sans pour autant rejeter l'innovation scientifique, les ingénieurs ne comprennent pas qu'en écologie, l'adaptation au cas par cas de modèles est très souvent la règle. Malgré ces obstacles, il est intéressant de signaler que des ingénieurs spécialisés ont changé d'activité, passant par exemple, du drainage à la réhabilitation des zones humides dans des parcelles agricoles, mais aussi de la rectification du réseau hydrographique à la restauration des méandres.

Aux États-Unis, certains personnels de l'*US Army Corps of Engineers*, responsables des eaux à l'échelle fédérale, intervenant auparavant essentiellement pour faciliter la navigation et l'écoulement, se qualifient d'ingénieurs écologistes nationaux depuis la mise en place d'une politique offensive de restauration des milieux en application de la loi sur l'eau. Wurth (1996) met en avant des arguments en faveur d'un réel rapprochement entre les deux parties. Selon sa propre expérience, les étudiants ingénieurs sont attirés par les cours d'écologie portant sur des concepts qui leur sont familiers (entropie, système, modèle, analyse énergétique, etc.). Il prône une formation sur le fonctionnement des écosystèmes dans l'ensemble des cursus en ingénierie plutôt que la création de spécialités comme l'ingénierie écologique ou l'écologie industrielle. Partageant ce point de vue, Schaeffer (1996) pense que les ingénieurs pourraient aider en contrepartie les écologues, par exemple à standardiser les méthodes de mesure de la résistance et la résilience des écosystèmes, ou à quantifier des seuils de tolérance. Par contre, pour Charles et Kalaora (2003), il existerait en France un fossé entre la culture, la tradition professionnelle des ingénieurs et le mode de pensée des écologues. Compte tenu du rôle prépondérant des différents corps d'ingénieurs, ils s'interrogent sur le devenir d'une ingénierie écologique qui

se voudrait indépendante. Selon McCutcheon et Walski (1994), développer des cursus aboutissant à une certification professionnelle permettrait d'établir un pont entre écologie et ingénierie.

Des enseignements en ingénierie écologique commencent à être proposés dans des universités nord-américaines, mais semblent encore trop orientés vers les aspects biologiques. Des programmes de certification professionnelle destinés aux écologues ont été mis en place par l'*Ecological Society of America* et, pour les spécialistes de zones humides, par la *Society of Wetland Scientists* et l'*US Army Corps of Engineers*. Selon Matlock *et al.* (2001), garantir la crédibilité de cette nouvelle profession implique une formation pluridisciplinaire, intégrant les théories et applications de l'ingénierie et de la science des écosystèmes, mais également des bases économiques.

Une question reste toutefois en suspens : un seul individu peut-il être compétent dans des domaines si différents ? Pour leur part, Mitsch et Jørgensen (2003) constatent que le milieu universitaire privilégie la spécialisation et les démarches analytiques par rapport aux approches synthétiques et directement appliquées. Ils prônent la formation de bons généralistes, mais aussi de spécialistes travaillant au sein d'équipes multidisciplinaires.

L'écologie de la restauration

L'histoire de ce courant reste à écrire, mais ses fondements ont été présentés dans l'ouvrage *Restoration ecology* (Jordan *et al.*, 1987a), actes d'un symposium organisé en 1984 à l'arboretum de l'université du Wisconsin-Madison. Le lieu n'est pas anodin, des opérations de reconstitution des communautés prairiales nord-américaines, suivies très précisément par des équipes scientifiques, y ont été initiées dès 1935. Lors de ce symposium, Aber et Jordan (1985) ont proposé le terme « écologie de la restauration » ou « écologie synthétique » pour que soient reconnus les apports fondamentaux des interventions visant à reconstituer des écosystèmes, communautés ou populations. Cette option représentait une révolution pour la communauté des protecteurs, les limites de la politique de mise « sous cloche » de portions de nature « vierge » se trouvaient ainsi officiellement reconnues. L'homme étant responsable de la perte de biodiversité, c'est à lui de prendre en charge les conséquences et d'essayer

de les réparer en mettant en œuvre ses connaissances scientifiques et techniques (Baldwin *et al.*, 1993). Position bien entendu controversée.

Le vocable « restauration écologique », plus courant que « écologie de la restauration », se réfère à des pratiques de terrain assez empiriques visant avant tout une efficacité maximale pour un coût minimal. Si parfois elles s'inspirent de connaissances écologiques, pour autant elles ne contribuaient pas directement au développement de cette discipline. Au cours des années soixante-dix, il s'agissait pour l'essentiel de récupérer des conditions, mécanismes et processus permettant d'améliorer la conservation des espèces et des communautés (Barnaud et Chapuis, 1999).

Une expérimentation écologique en vraie grandeur

L'écologie de la restauration a pris son essor au cours des années quatre-vingt. En pratique, elle englobe trois principales catégories de centre d'intérêt qui servent à définir les objectifs et les approches, la restauration (1) d'espèces, (2) d'écosystèmes ou de paysages, (3) de services écosystémiques (Ehrenfeld, 2000) ; le second niveau est ici privilégié. Elle correspond donc à la science dont les principes, modèles et méthodes fondent maintenant les interventions de restauration, réhabilitation, création d'écosystèmes qui, en retour, servent à valider des théories écologiques et à les enrichir (Barnaud, 1995). À son sujet, Bradshaw (1977) parle du véritable « test à l'acide » des théories, point de vue en partie contesté par Fabiani (1995) pour qui la diversité des interventions empêche la constitution d'un cadre expérimental unifié. Ainsi, MacMahon et Holl (2001) notent que peu de projets ont réellement servi de terrain d'expérimentation pour des recherches fondamentales au cours des 25 dernières années. Toutefois, pour Jordan *et al.* (1987b), l'enjeu n'est pas simplement notre capacité à « réparer », l'originalité de l'approche tient aussi à la maîtrise des processus impliqués. Restaurer signifie alors diriger un changement voulu en le freinant, l'accéléralant, le renversant, l'altérant ou en l'arrêtant. Les systèmes écologiques étant dynamiques et complexes, retrouver exactement les conditions et le fonctionnement antérieurs à la perturbation est quasiment impossible *in situ*. Il ne s'agit pas de copier la nature en détail mais de l'imiter en créant des systèmes similaires dans leurs principales caractéristiques, leur fonctionnement, et présentant un comporte-

ment autorégulé. Pour Cairns (1988), la restauration écologique revient à imiter un système en bonne santé et intégré dans le paysage naturel environnant. Il ajoute que les caractéristiques structurelles et fonctionnelles reconstituées ou substituées doivent être de plus grandes valeurs sociales, économiques, écologiques que celles de l'état perturbé ou modifié.

Plusieurs définitions de la restauration, la réhabilitation, la création d'écosystèmes ont été formulées. Nous retenons ici les énoncés adoptés par le Conseil scientifique du Programme national de recherche « Recréer la nature : réhabilitation, restauration et création d'écosystèmes » (ministère chargé de l'environnement, 1995-2003), inspirés des propositions de la *Society for Ecological Restoration* (SER) et d'Aronson *et al.* (1993). La restauration correspond à « *la transformation intentionnelle d'un milieu pour y rétablir un écosystème considéré comme indigène et historique. Le but de cette intervention est d'imiter la structure, le fonctionnement, la diversité, et la dynamique de l'écosystème prévu* ». La réhabilitation d'un écosystème « *consiste à lui permettre de retrouver ses fonctions essentielles en le situant sur une trajectoire naturelle favorable à l'un des états alternatifs stables* ». La création vise « *à construire ex nihilo un écosystème en compensation d'une destruction due à un aménagement de type lourd (infrastructure linéaire, urbanisation, exploitation minière...)* ».

Deux définitions supplémentaires de la restauration méritent d'être citées, la première pour sa simplicité : « *le retour d'un écosystème à des conditions approximatives, proches de celles avant la perturbation* » (NRC, 1992) ; la seconde pour son caractère international : « *le processus d'assistance à la réparation d'un écosystème dégradé, endommagé ou détruit* » (SER, 2002). Par ailleurs, la restauration diffère de la réhabilitation par ses démarches holistiques incompatibles avec une approche au coup par coup d'éléments isolés. De plus, la réhabilitation ne vise pas à un retour des écosystèmes à un état « naturel » antérieur, mais plutôt à fournir de nouveaux atouts à un paysage pour un usage ultérieur défini (NRC, 1992).

Des analogies sont employées pour caractériser la restauration écologique. Pour certains, elle correspondrait au travail d'un horloger qui, après avoir trouvé l'origine de la panne, démonte puis remonte le mécanisme. À partir de cette idée, Bradshaw (1987) considère qu'il s'agit d'un

véritable défi intellectuel puisque nous devons comprendre non seulement l'écosystème, mais aussi la nature du dommage, et comment le réparer. Pour d'autres, les démarches de l'écologue de la restauration et du médecin seraient proches. Effectivement, le praticien doit établir un diagnostic, supprimer la cause évidente du malaise, effectuer une ou des opérations plus ou moins lourdes, prescrire des remèdes homéopathiques ou allopathiques pour une durée adaptée aux symptômes. Ce raisonnement a été très critiqué pour de nombreuses raisons, dont sa nature réductrice ; le fonctionnement d'un organisme ne peut pas être complètement assimilé à celui d'un écosystème au risque de fausser la qualité de l'observation et du suivi. Dans les faits, éliminer la cause du dysfonctionnement n'est pas toujours réalisable, mais tous les moyens doivent être mis en œuvre pour la minimiser. Selon la nature du dommage, l'action peut prendre différentes formes : approche passive consistant à atténuer les effets des impacts négatifs et à laisser s'exprimer la résilience du système ; intervention active et utilisation de moyens techniques pour réparer les dommages touchant à la structure du système. Souvent, le protocole comprend une ou plusieurs des étapes suivantes : reconstruction des conditions physiques antérieures ; ajustement de la chimie du sol et de l'eau ; manipulation biologique sur les communautés végétales et animales (réintroduction, élimination d'espèces).

L'idée phare de l'écologie de la restauration concerne la prise en compte de la trajectoire des systèmes, des dimensions spatio-temporelles. Plusieurs schémas existent, celui de Bradshaw (1984) fondé sur deux variables globales, la structure (espèces-complexité) et le fonctionnement (biomasse-nutriments) de l'écosystème, permet de cerner la trajectoire potentielle. Quatre principales options sont offertes : laisser faire, réhabiliter, restaurer, créer un système alternatif. Restaurer revient alors à intervenir sur l'un des paramètres du modèle, par exemple le nombre d'espèces et/ou la concentration en nutriments, afin d'initier ou d'accélérer le rétablissement de l'écosystème vers un stade historique souhaité. D'autres modèles ont vu le jour afin de tenir compte de parcours et situations contrastées (Zedler et Callaway, 1999). Les débats sont vifs car le choix du système visé, historique ou homologue, la capacité à prendre en compte les rétroactions, à définir des seuils, en un mot l'intégration des échelles spatio-temporelles, conditionnent la conception

des modèles donc les trajectoires (Suding *et al.*, 2004). Engager une démarche prospective oblige alors à clarifier les objectifs et à réfléchir en termes de développement des écosystèmes en intégrant les perspectives dynamiques (Barnaud, 1995).

En Europe, se donner comme objectif un système primitif naturel n'a pas vraiment de sens puisqu'il est impossible de décrire les conditions du paysage avant toute altération substantielle par l'homme. On est donc conduit à opter pour une intervention plus réaliste en réhabilitant le régime de perturbation naturelle, l'hydrologie et d'autres processus écologiques intéressants du point de vue biologique (Noss, 1985). Chaque écosystème résultant d'une séquence unique d'événements climatologiques et biologiques, la restauration totale reste peu probable même dans les circonstances les plus favorables (Cairns, 1991). Sans recette universelle, Erenfeld (2000) insiste sur la nécessité de garder de la flexibilité dans le choix des objectifs dont la portée et les limites réelles gagneraient à être précisées. En conséquence, les projets de restauration correspondent davantage à une « reconstruction », ou à une amélioration de certains paramètres de l'écosystème endommagé par un ajustement de l'environnement physique et une gestion biologique (Barnaud, 1995). Ils sont à insérer dans la gamme des possibilités d'intervention en fonction de l'état de santé du système écologique, de la protection à l'abandon.

De ce fait, le concepteur de l'intervention doit, avant de planifier les travaux, choisir le système de référence qui servira également à évaluer ses résultats. La détermination du système de référence est très débattue, selon que les arguments écologiques, culturels, techniques ou financiers prédominent (Donadieu, 2002). En effet, le système « cible » peut différer d'un état historique en raison des conditions et contraintes actuelles ou de l'absence d'informations écologiques ou culturelles. L'un des systèmes les plus poussés de détermination d'écosystèmes « référence » concerne la procédure d'attribution de permis d'aménagement touchant les zones humides aux États-Unis. En raison de l'ampleur de leur destruction et dégradation, des mesures visant à l'acquisition et la restauration de ces milieux étaient inscrites dès 1934 dans une loi promue par les chasseurs d'oiseaux d'eau, complétées par des textes relatifs à la gestion de la qualité de l'eau (1977), à la préservation des terres agricoles (1985), des milieux côtiers (1990) et

estuariens (2000). Le dispositif voté en 1997, « *Wetlands Restoration and Improvement Act* », synthétise les conditions et modalités d'application de la mesure de « *mitigation banking* » visant à ne plus perdre de zones humides, ni à dégrader leurs fonctions. Si la compensation ne peut se faire sur le site équipé, les aménageurs, publics ou privés, doivent avoir auparavant restauré, créé, amélioré ou exceptionnellement préservé des zones humides localisées dans la même écorégion et remplissant des fonctions identiques à celles qui ont été détruites. Les différents modes de compensation des pertes en zones humides font ainsi appel à la notion de zones humides de référence dont le fonctionnement connu sert pour la comparaison des sites détruits à restaurer à équivalence de fonctions et valeurs (Smith, 2001). On détermine ensuite des classes et sous-classes régionales de zones humides à différents stades d'intégrité par grand type et des indices de fonctionnalité à partir de plusieurs paramètres. Il s'agit alors d'intervenir sur telle ou telle composante afin de suivre au plus près les modèles prédictifs établis et finalement d'obtenir un système autonome.

Sur le terrain, des remises en cause de la pertinence de la restauration écologique, parfois comparée au jardinage, voient le jour (Malakoff, 1998). Le suivi d'un marais de 8 hectares créé en 1985 sur la côte californienne a été mené à partir de 11 critères. Au bout de 13 ans, cette zone humide avait acquis 40 % des fonctionnalités du marais de référence (composition, cycle de l'azote, productivité), mais ne répondait toujours pas à l'objectif premier de l'opération : l'installation d'une espèce protégée de rîle (*Rallus longirostris levipes*). Les scientifiques impliqués pronostiquaient alors qu'il faudrait 40 ans pour obtenir un sol identique (Zedler et Callaway, 1999). Avec le recul, Zedler (2000) insiste sur l'impossibilité d'optimiser simultanément la biodiversité avec d'autres fonctions. En réalité, un système restauré nécessite souvent des manipulations ultérieures, notamment dans le contexte actuel de changements climatiques, d'invasion par des espèces autochtones et d'impact généralisé des activités humaines, sans parler des événements imprévisibles. Augmenter la capacité de prédiction des modèles afin de mieux cibler les interventions, savoir en fixer les limites, autant de conditions à remplir pour faire face aux projets de restauration de grande ampleur comme les 2 500 hectares de marais

à la Delaware Bay, les 2 millions d'hectares de marécages et les 7,7 millions de zones rivulaires tampon dans la partie en aval du Mississippi pour sauver le Golfe du Mexique de l'asphyxie (Mitsch et Gosselink, 2000). La mobilisation de chercheurs pour répondre aux besoins de ces grands chantiers initiés par des agences environnementales devient cruciale (Zedler, 2000 ; Teal, 1998). Sinon, la coupure entre approches techniques et scientifiques risque de s'accroître au détriment des deux parties.

Comme en ingénierie écologique, les échelles spatiales et temporelles d'intervention varient énormément, la restauration ou plutôt la réhabilitation pouvant concerner un chapelet de mares, un tronçon fluvial, la rivière Kissimmee en Floride pour redonner un fonctionnement hydrologique correct au parc national des Everglades, la baie du Mont-St-Michel et l'estuaire de la Somme en cours de désensablement. Actuellement, des opérations de planification mettant en avant la conservation de la biodiversité dans des territoires, des régions écologiques, des bassins versants, sont envisagées en couplant les mesures de protection et les programmes de restauration (Groves *et al.*, 2000). Il s'agit alors d'identifier les priorités d'intervention en termes de populations, de communautés et d'écosystèmes menacés, localisés dans une matrice paysagère avec des « noyaux » et des corridors fonctionnant en réseaux. Il faut déterminer ce qui est potentiellement « restaurable » (taille, état, existence de fragments fonctionnels, etc.) ainsi qu'un seuil minimal d'intervention pour garantir la viabilité du système. Du fait de la sensibilité des systèmes aquatiques aux influences environnantes et de l'importance du régime hydrologique, une méthode d'évaluation a été mise au point pour planifier la restauration des zones humides à l'échelle d'un bassin versant (Brooks *et al.*, 2002).

Pour des projets de grande envergure, la consultation des populations impliquées, avant intervention, paraît encore plus évidente. À ce propos, le programme interdisciplinaire développé aux Pays-Bas pour répondre à une politique volontariste de reconquête d'espaces « naturels », affichée en 1990, est très intéressant. Il s'agit d'un modèle informatique couplé à un système d'information géographique (SIG), le LEDESS (*Landscape Ecological Decision-Support System*) conçu comme outil d'aide à la planification à l'échelle des paysages (Harms *et al.*, 1993 ; Harms, 1995). Mis au point au départ sur un territoire triangulaire

(conurbation Rotterdam-Amsterdam-Utrecht) où la demande de « nature » est très forte, il a été ensuite généralisé au territoire national. Son originalité consiste, à partir d'un traitement précis des données physiques, biologiques, sociales, économiques, à proposer des scénarios détaillés de paysages dont la configuration plus ou moins « sauvage » est symbolisée par le choix d'espèces « phares » (barge, busard, loutre, élan) et dont les différentes composantes (géographiques, biologiques, socio-économiques) sont simulées et intégrées. Selon les options, l'aménagement du territoire comprend plus ou moins d'interventions pour protéger et restaurer des habitats, les différents paysages obtenus étant représentés de manière très pédagogique sous forme de blocs diagrammes. Le modèle offre aux politiques et au public la possibilité de choisir un scénario avec ses conséquences, en illustrant aussi le fait que l'on ne peut pas tout avoir.

En tant que discipline, l'écologie de la restauration connaît des remises en cause de ses objectifs tels que définis par la SER (2002). Certaines bases théoriques font l'objet de critiques, en particulier l'utilisation de notions comme l'intégrité ou la santé des écosystèmes. Dans un registre différent, la place accordée respectivement aux scientifiques et aux acteurs concernés par un projet est discutée, sachant que le choix des objectifs relève au final d'un jugement de valeur (Davis et Slobodkin, 2004). Il s'agit de reconnaître que la restauration ne dépend pas seulement de positions scientifiques, mais comprend aussi les décisions prises pas les sociétés quant aux buts à atteindre, aux coûts et bénéfices des opérations, à la valorisation de la nature, aux questions d'éducation et de politique, aux options philosophiques (Allen, 2003). Pour Winterhalder *et al.* (2004), les écologues doivent relativiser leur jugement de valeur et intervenir à toutes les étapes de la procédure. Leurs connaissances servent à définir l'état de dégradation, la cible potentielle, les modalités opérationnelles et l'évaluation des résultats.

Quoi qu'il en soit, le nombre de projets réalisés, en cours et prévus, fait que la restauration et la création d'écosystèmes sont maintenant considérées comme une « industrie » (Mitsch et Jørgensen, 2003). Les expériences et les modèles sont plus poussés pour certains systèmes écologiques, comme les prairies, forêts tempérées ou tropicales, milieux aquatiques, alors que la restauration d'écosystèmes marins reste encore balbutiante. Pour les zones humides, selon leur

type, les chances de réussite varient également : plus l'hydrologie et l'écologie du système sont complexes, plus sa restauration sera délicate, longue, voire impossible comme pour certains milieux comme les tourbières et marais tourbeux, fruits de centaines d'années d'évolution.

L'officialisation en tant que discipline

La croissance rapide de l'écologie de la restauration comme discipline scientifique a été montrée par une analyse des ouvrages et articles parus de 1986 à 1998 (Young, 2000), alors que ses atouts et points faibles ont été analysés (Barnaud, 1995) et le sont en permanence.

UNE SOCIÉTÉ SAVANTE ET DES VECTEURS DE DIFFUSION DES IDÉES

Créée en 1987, la *Society for Ecological Restoration International* développe les activités habituelles à ce genre d'organisation (conférences annuelles, groupes de travail, etc.) et comporte 14 sections réparties en Amérique du Nord, Europe, Australie, Inde [www.ser.org/]. Dans un « abécédaire » rédigé par son groupe de travail [Science et politique générale] (SER, 2002), elle s'est donnée pour mission « de promouvoir la restauration écologique comme moyen de soutenir la diversité de vie observée sur terre et de rétablir une relation écologiquement saine entre la nature et la culture ». Les adhérents appartiennent à divers corps de métiers, allant des scientifiques aux gestionnaires, en passant par les paysagistes. Des publications paraissent régulièrement dont un guide sur la mise en place et la gestion de projets de restauration (Clewell et al., 2000).

La société édite depuis 1993 le journal *Restoration Ecology* et gère le forum « *Ecological Restoration* » qui remplace depuis 1998 « *Restoration & Management Notes* », forum créé en 1981 et exclusivement voué à la restauration d'écosystèmes. Le journal est spécialisé dans les textes originaux en restauration écologique et biologique et publie également des articles sur les aspects physico-chimiques (sol, air, eau) et les fonctions hydrologiques. Des revues plus ou moins spécialisées traitent aussi du sujet, comme *Ecological Management & Restoration*, créée en 2000 par l'*Ecological Society of Australia*, et qui aborde également les dimensions socio-économiques des projets de restauration, ou *Journal of Applied Ecology* de la *British Ecological Society* (Omerod, 2003), sans oublier divers journaux publiant

des textes fondamentaux ou appliqués en conservation de la nature (*Biological Conservation*, *Conservation Biology*...).

DES PROJETS ET DES FORMATIONS SCIENTIFIQUES SPÉCIFIQUES

Le programme du SCOPE, mentionné ci-dessus, comprend un volet restauration. Des centres de recherche, localisés en Amérique, Europe, Asie ou Australie, affichent ce thème dans leur intitulé et objectifs. Si l'écologie de la restauration était perçue jusqu'à ces dernières années comme une spécialisation de l'écologie théorique et appliquée, pour certains, elle fait maintenant partie de l'ingénierie écologique ; pour d'autres, elle s'insère en tant que courant dans la biologie de la conservation. Cependant, selon Young (2000), la biologie de la conservation et l'écologie de la restauration sont complémentaires et visent à préserver la biodiversité, la première agissant plutôt à court terme et dans l'urgence des situations de crise, la seconde à long terme et normalement à une échelle plus vaste.

Pour Mitsch et Jørgensen (2003), la formation en restauration et création d'écosystèmes nécessite non seulement des programmes en biologie-écologie, mais aussi des formations techniques, de nombreuses universités offrant maintenant des cursus adaptés ou des sessions avec stage sur le terrain. Egan (2002) souligne aussi l'obligation d'apprendre à travailler en coordination, à organiser et à mener une équipe dans la mesure où les opérations de restauration sont longues et complexes à mettre en œuvre. Il note l'importance des questions sociales et politiques posées par ces manipulations du vivant. Des bureaux d'études, travaillant en collaboration avec des équipes scientifiques, ont également investi le champ. Toujours aux États-Unis, le « *Five Star Restoration Program* » a été mis en place pour favoriser, grâce à un financement modeste, des projets locaux d'éducation et de formation à la restauration de zones humides et rivières (USEPA, 2003). Les 300 actions en cours, de taille et d'ambition variables, mobilisent des participants de divers horizons et âges.

Un socle commun, des objectifs et démarches distincts

Schématiquement, l'ingénierie écologique a pour objectif la résolution de problèmes environnementaux en valorisant des processus naturels et en récupérant, à des fins écologiques,

des technologies ayant fait leurs preuves dans la destruction des écosystèmes. Comme le note Mitsch (1993), elle vise à « *établir un pont conceptuel entre ingénieurs et écologues* ». Elle part du principe qu'il est possible d'imiter les capacités de production ou de recyclage des nutriments des systèmes écologiques, en n'hésitant pas à piloter les mécanismes, afin d'obtenir une augmentation de production durable et/ou de traiter des effluents produits par l'homme. Il s'agit alors de construire des systèmes écologiques, parfois des mésocosmes, ou d'orienter des écosystèmes existants vers une fonction privilégiée, par exemple l'épuration. Le résultat correspond, en règle générale, à des systèmes alternatifs. Toutefois, l'optimisation d'une fonction risque de se faire au détriment d'une autre et de transformer à l'extrême la nature en « techno-nature » selon l'expression de Charles et Kalaora (2003). Par exemple, affecter une zone humide exclusivement à la dénitrification d'une pollution agricole diffuse peut provoquer un changement de la végétation avec la domination des espèces eutrophes provoquant une modification du cortège d'insectes.

Par comparaison, l'écologie de la restauration affiche d'emblée un objectif de lutte contre la perte de biodiversité pour le bien de tous et l'épanouissement individuel, en permettant aux écosystèmes dégradés de récupérer leur intégrité. Il s'agit donc de réparer les impacts négatifs des activités humaines et les divers dysfonctionnements des écosystèmes. L'intérêt immédiat de ces opérations ne semble pas toujours perceptible. Le champ couvert par l'écologie de la restauration paraît ainsi à la fois plus élitiste et nettement plus ambitieux que celui de l'ingénierie.

Dans ce contexte, il semble légitime de se demander si ces deux courants sont vraiment indépendants ou affiliés. Pour des auteurs, l'ingénierie écologique engloberait la restauration et la réhabilitation. De notre point de vue, si le but global semble identique : récupérer un environnement de meilleure qualité dans le cadre d'un développement durable, et le postulat de départ proche, c'est-à-dire s'appuyer sur les connaissances relatives au fonctionnement du vivant pour obtenir des systèmes plus ou moins autorégulés, toutefois, plusieurs points différencient les deux approches :

- la restauration vise à reconstituer l'intégrité d'un écosystème. Plusieurs options s'offrent alors,

le scientifique n'étant pas obligatoirement la personne la plus habilitée à choisir le système de référence. Pour sa part, l'ingénierie écologique vient en réponse à un problème environnemental donné, pas forcément simple à aborder, mais circonscrit ;

- en ingénierie, il est admis de forcer une ou des fonctions à l'aide d'une configuration artificielle éloignée d'une forme naturelle ; en restauration, il s'agit de récupérer un fonctionnement le plus complet et autonome possible en optant pour des techniques « douces » ;

- la prévision des résultats et du calendrier est théoriquement exigée d'un projet d'ingénierie écologique, même si une marge d'incertitude reste acceptée en raison d'une conception des systèmes fondée en partie sur des processus liés au vivant. En restauration par contre, la difficulté de détermination du système cible, compte tenu de sa dynamique spatio-temporelle et de sa complexité, s'ajoute au caractère incertain des phénomènes naturels et rend les prévisions délicates. Malgré des avancées significatives, les méthodes et les modèles ne peuvent pas être généralisés sans précaution et adaptation, contrairement à ceux de l'ingénierie traditionnelle ;

- les procédés de l'ingénierie écologique doivent fournir des résultats assez rapidement sous la forme d'une amélioration quantifiée du problème environnemental traité. La restauration d'écosystèmes fonctionnels demande quant à elle du moyen, voire du long terme, la réussite ou l'échec s'exprimant plus souvent en tendances d'évolution, en modèles qualitatifs, qu'en données chiffrées ;

- le suivi des opérations à partir de paramètres bien identifiés est automatique en ingénierie pour assurer un fonctionnement correct du projet. Par contre, les dispositifs d'évaluation des résultats en restauration sont en général jugés marginaux, faute de moyens et d'intérêts, ce qui rend difficile l'appréciation de la récupération de toutes les fonctions (Bazin et Barnaud, 2002). Pourtant, les surprises ne manquent pas et de nouvelles manipulations des compartiments du système sont dans certains cas nécessaires ;

- l'écologie de la restauration intéresse avant tous des écologues, biologistes de la conservation et protecteurs de la nature, alors que l'ingénierie écologique, à l'interface entre les sciences de l'ingénieur et de l'écologie, concerne une com-

munauté d'experts plus vaste et ne pouvant que se renforcer avec l'exigence de développement durable ;

– enfin, les commanditaires d'ingénierie ou de restauration écologique diffèrent en partie. L'ingénierie intéresse de plus en plus les collectivités territoriales, les industriels, les exploitations agricoles importantes, qui commencent à y voir un intérêt financier et une amélioration potentielle de leur image. La restauration attire quant à elle plutôt les administrations et organisations non gouvernementales en charge de la protection de la nature ou de gestion de ressources naturelles, les constructeurs d'infrastructures et les industriels miniers ne s'y soumettant que contraints par les législations. Pourtant, là aussi les mentalités évoluent. Ainsi l'exemple souvent cité de l'alimentation en eau de la ville de New York montre qu'à des échelles importantes, l'acquisition et la restauration de zones de captage éloignées ont été jugées largement moins onéreuses que la construction d'une station de traitement, tout en fournissant des bénéfices écologiques et sociaux supplémentaires à la région.

D'autres sujets concernant les divergences ou points communs entre l'ingénierie écologique et l'écologie de la restauration mériteraient d'être discutés, par exemple la comparaison des méthodes de suivi et d'évaluation de la réussite des objectifs, des modèles préconisés, de la relation à la nature sous-jacente à ces manipulations, des conséquences éthiques, sociales, économiques des interventions, etc.

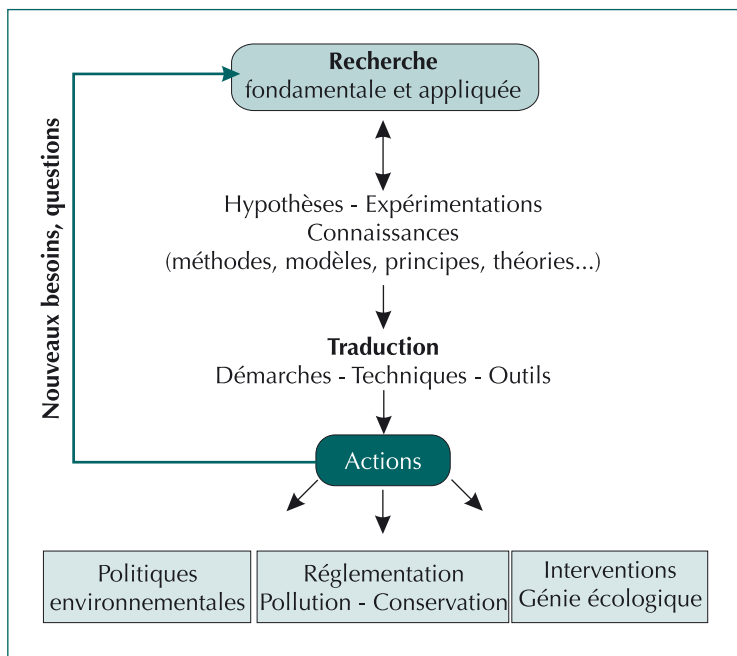
Toutefois, la tendance actuelle est à un rapprochement des deux courants. De fait, les écologues de la restauration s'intéressaient avant tout aux aspects biologiques, par manipulation des espèces, des communautés, et de leur habitat, au détriment de la prise en compte matérielle des conditions physico-chimiques, démarche qui a montré ses limites dans les zones humides où la reconstitution de l'hydropériode et de la dynamique des perturbations s'est révélée incontournable (Middleton, 1999). Ils se sont alors rendu compte de la nécessité d'inclure dans leurs projets des travaux et équipements pour modeler le sol, rétablir un régime hydrologique correct, etc. Par ce biais, ils font appel aux compétences des ingénieurs écologues ou agronomes, hydrauliciens, forestiers, etc. Inversement, les ingénieurs s'aperçoivent du besoin d'insérer leurs dispositifs dans l'environnement global, dans la mesure où

leurs interventions présentent des effets perturbant les écosystèmes voisins. Ainsi, la frontière entre les deux courants devient de plus en plus floue.

Conclusion

Pour M.-E. Soulé (1989) ou E.-O. Wilson (1992), grands défenseurs de la biodiversité, le XXI^e siècle sera celui de la restauration en écologie et de l'essor des écothérapies comme moyen complémentaire au développement d'une conservation de la nature plus scientifique. Les promoteurs des activités d'ingénierie écologique sont quant à eux optimistes au sujet de leur croissance future (Mitsch et Jørgensen, 2003), une fois les obstacles persistants entre les écologues et les ingénieurs surmontés, par le biais d'une formation adaptée et/ou par la constitution d'équipes ayant des démarches interdisciplinaires. Plus généralement, il semble que le parti pris de concevoir une planification durable par le biais d'une gestion adaptative, comprenant des objectifs socio-économiques, écologiques, esthétiques, gagne du terrain, même si la demande sociale est encore mal formulée. L'utilisation, à une échelle spatio-temporelle appropriée, des principes et outils de l'ingénierie écologique et de l'écologie de la restauration devient ainsi un véritable défi. L'intérêt des interventions doit alors être évalué dans un contexte général incluant les changements globaux (climat, cycles biogéochimiques) et leurs impacts notamment sur la répartition des espèces (disparition, invasion).

En France, plusieurs entreprises récentes marquent l'intérêt des communautés scientifiques et ingénieriales pour le domaine. Ainsi, après la tenue d'un colloque au titre provocateur « Recréer la nature – Réhabilitation, restauration et création d'écosystèmes » (Marais d'Orx, 1994) visant à une synthèse des connaissances et à repérer les lacunes (Lecomte *et al.*, 1995), le ministère chargé de l'environnement a lancé en 1995 un programme national de recherche interdisciplinaire sur le même thème. Les équipes devaient impérativement comprendre des partenaires directement intéressés par les acquis des projets (gestionnaires, techniciens, administration, industriels, ONG, etc.). Ce programme a donné lieu à un séminaire de lancement en 1997, occasion de débattre des concepts et méthodes (Barnaud et Chapuis, 1997), et à un colloque de restitution en 2001 comprenant la présentation des résultats obtenus par les 20 projets retenus (Chapuis *et al.*, 2001, 2002). Fin 2001, le CNRS (Programme



▲ Figure 2 – Relations réciproques entre la recherche et l'action.

Environnement, Vie et Sociétés) a initié un séminaire « Écologie, biologie, techniques, sociétés : vers de nouvelles perspectives éthiques et politiques ? ». Durant les ateliers organisés en 2000-2003, les diverses composantes (écologiques, techniques, philosophiques, sociales, économiques) de l'ingénierie écologique ont fait l'objet d'un examen et de discussions approfondies, donnant lieu à une publication prévue en 2004. La conception, par le Cemagref et l'Engref, des journées sur l'ingénierie écologique en 2003 souligne encore la nécessité d'échanger sur le sujet et de réfléchir aux enseignements à mettre en place pour intégrer les approches propres à l'écologie et à l'ingénierie traditionnelle, tout en valorisant l'expérience acquise par les équipes sollicitées. Dans l'idéal, les relations entre la recherche et l'action devraient suivre un schéma comprenant des rétroactions structurées (figure 2). En réalité, les effets en cascade ou cumulés des interventions « bien intentionnées » sont encore mal ou peu maîtrisés, situation appelant à une grande prudence dans les projets.

Comme le remarquent Charles et Kalaora (2003), l'ingénierie écologique au stade actuel n'a rien d'une « boîte à outils universelle ».

La reconnaissance des rôles remplis par les écosystèmes, leurs fonctions et valeurs, offre des arguments sonnants et trébuchants pour justifier leur conservation et restauration, et certains protecteurs de la nature ont su s'en emparer. Mais ces évaluations de services rendus sont souvent sous-évaluées faute de données sur la valeur de la biodiversité et d'une orientation anthropocentrique des estimations. Pour bon nombre d'écologues et biologistes de la conservation, il est évident que les avancées de l'ingénierie écologique et de l'écologie de la restauration servent à faire avancer les connaissances et réciproquement, mais elles ne peuvent en aucun cas servir d'alibi à la poursuite des destructions. La conservation vient toujours en priorité surtout dans un contexte concurrentiel de moyens financiers et humains (MacMahon et Holl, 2001). En outre, intervenir de manière curative est parfois impossible, compte tenu des limites de l'écotechnologie, et cette option coûte nettement plus cher qu'une action préventive de protection. Dans un autre registre, les « réparateurs » et « soigneurs » de la nature vont devoir définir une déontologie pour encadrer leurs occupations. En effet, par bien des aspects, ils se trouvent dans une position proche de celle des restaurateurs d'objets anciens et se posent des questions sur le niveau d'intervention, la valeur intrinsèque du naturel, de l'authentique, de l'artefact, de l'artificiel, de la copie, du faux, etc. (Elliot, 1997).

Avec l'inscription d'un objectif de développement durable dans les législations et dans un contexte de changements globaux, il semble donc qu'ingénieurs écologistes et écologues de la restauration vont devoir faire preuve d'imagination pour restaurer notre « capital naturel », en plus des qualités jusque-là requises : la patience, l'engagement, la capacité de dialogue et d'organisation, la souplesse, l'attention, et une certaine conviction. Comme l'affiche Environnement Canada : « Restaurer les habitats, un investissement pour la vie ». □

Remerciements

Nous tenons à remercier les organisateurs des journées sur l'ingénierie écologique à Grenoble, qui ont su préserver le sérieux des exposés et des discussions dans une ambiance décontractée. Nos réflexions proviennent de travaux menés dans le cadre du programme national de recherche sur les zones humides, du programme « Récréer la nature », et plus spécifiquement de recherches réalisées dans les îles subantarctiques, actions soutenues par le ministère de l'Écologie et du Développement durable et l'Institut polaire (IPEV, Pr 276).

Résumé

L'origine, les objectifs et les applications de l'ingénierie écologique et de l'écologie de la restauration diffèrent. Si la première est issue de la combinaison de principes écologiques avec le savoir-faire des ingénieurs, la seconde résulte de démarches scientifiques. L'ingénierie écologique vise à résoudre un problème d'environnement à l'aide de connaissances sur le fonctionnement du vivant et de techniques adaptées. Son champ d'intervention est large et pragmatique. La restauration écologique a pour but la sauvegarde de la biodiversité par la récupération de communautés viables et d'écosystèmes fonctionnels. Ces actions ambitieuses se conçoivent à moyen et long terme. Les deux courants cherchent à confirmer leur originalité grâce à des réseaux et supports de diffusion spécifiques, alors qu'ils s'enrichissent l'un l'autre.

Abstract

The origin, objectives and applications of ecological engineering and restoration ecology are different. While the former results from the combination of ecological principles with civil engineers know-how, the latter is the result of scientific approaches. Ecological engineering aims at solving an environmental problem based on a good understanding of the living world as well adapted techniques. Its scope is broad and pragmatic. The purpose of ecological restoration is biodiversity conservation by recovering viable communities and functional ecosystems. These ambitious approaches are designed on the medium or long term. Both try to assert their originality through specific networks and communication media, whereas they benefit one from the other.

Bibliographie

- ABER, J.-D.; JORDAN, W.-R., 1985, Restoration ecology: an environmental middle ground, *BioScience*, 35, p. 399.
- ALLEN, E.-B., 2003, New directions and growth of restoration ecology, *Restoration Ecology*, 11, p. 1-2.
- ARONSON, J. *et al.*, 1993, Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands. I. A view from the south, *Restoration Ecology*, 1, p. 8-17.
- BALDWIN, A.-D. *et al.*, 1993, Introduction : ecological preservation versus restoration and invention, in *Beyond preservation, restoring and inventing landscape?* Baldwin, A.S. (eds), University of Minnesota Press, Minneapolis, p. 3-16.
- BARNAUD, G., 1995, À l'interface de la pratique et de la théorie : l'écologie de la restauration, *Natures, Sciences, Sociétés*, 3 (hors série), p. 36-50.
- BARNAUD, G. ; CHAPUIS, J.-L. (eds), 1997, *Actes du Séminaire de lancement du programme national de recherche « Récréer la nature »*, ministère de l'Environnement, MNHN-IEGB, 1-2 avril 1997, Paris, 35 p.

- BARNAUD, G. ; CHAPUIS, J.-L., 1999, De l'écologie de la restauration à l'ingénierie écologique, où en est-on ? IInd International Conférence on Restoration Ecology, Groningen, Pays-Bas, 25-30 août 1998, *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, n° 36, p. 117-123.
- BAZIN, P. ; BARNAUD, G., 2002, Du suivi à l'évaluation : à la recherche d'indicateurs opérationnels en écologie de la restauration, *Revue d'Écologie (Terre et Vie)*, suppl. 9, p. 201-224.
- BRADSHAW, A.-D., 1977, Conservation problems in the future, *Proceedings of the Zoological society of London*, 197, p. 77-96.
- BRADSHAW, A.-D., 1984, Ecological principles and land reclamation practice, *Landscape Planning*, 11, p. 35-48.
- BRADSHAW, A.-D., 1987, Restoration: an acid test for ecology, in *Restoration ecology. A synthetic approach to ecological research*, Jordan III, W.-R. et al. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, p. 23-29.
- BROOKS, R.-P. et al., 2002, Using Reference Wetlands for Integrating Wetland Inventory, Assessment, and Restoration for Watersheds. in *Watershed-based Wetland Planning and Evaluation. A Collection of Papers from the Wetland Millennium Event* (August 6-12, 2000; Quebec City, Canada), Tiner, R.W. (compiler), Association of State Wetland Managers, Inc., New York, p. 9-15.
- CAIRNS, J., 1988, Restoration ecology: the new frontier, in *Rehabilitating damaged ecosystems*, Boca Raton, Florida, Cairns J. (ed.), CRC Press. Inc., p. 2-11.
- CAIRNS, J., 1991, The status of the theoretical and applied science of restoration ecology, *The Environmental Professional*, 13, p. 186-194.
- CHAPUIS, J.-L. et al. (eds), 2001, *Principaux résultats scientifiques et opérationnels. Recréer la nature: réhabilitation, restauration et création d'écosystèmes*, Programme national de recherche MATE, MNHN, Paris, 173 p. + annexes.
- CHAPUIS, J.-L. et al. (eds), 2002, *Programme national de recherche « Recréer la nature » : réhabilitation, restauration et création d'écosystèmes*, Actes du colloque de Grenoble (11-13 septembre 2001), *Revue d'Écologie (Terre et Vie)*, suppl. 9, 261 p.
- CHARLES, L. ; KALAORA, B., 2003, L'ingénierie écologique entre écologie, technique et aménagement : des enjeux durables, in *Quelles natures voulons-nous ? Pour une approche socio-écologique du champ de l'environnement*, LÉVÊQUE, C. ; VAN DER LEEUW, S. (eds), Collection Environnement, Elsevier, Paris, p. 225-235.
- CLEWELL, A. et al., 2000, Guidelines for Developing and Managing Ecological Restoration Projects. A Society for Ecological Restoration publication, non paginée, www.ser.org/.
- DAVIS, M.-A. ; Slobodkin, L.-B., 2004, The science and values of restoration ecology, *Restoration Ecology*, 12, p. 1-3.
- DONADIEU, P., 2002, Les références en écologie de la restauration, *Revue d'Écologie (Terre et Vie)*, suppl. 9, p. 109-119.
- EGAN, D., 2002, What are we afraid of ? *Ecological Restoration*, 20, p. 1-2.
- ELLIOT, R., 1997, *Faking nature: the ethics of environmental restoration*, Routledge, London, 177 p.
- EHRENFELD, J., 2000, Defining the limits of restoration: the need for realistic goals, *Restoration Ecology*, 8, p. 2-9.
- FABIANI, J.-L., 1995, Les créateurs de la nature. Enjeu et justification d'une pratique paradoxale, *Natures, Sciences, Sociétés*, 3 (hors série), p. 84-92.
- GROVES, C. et al., 2000, *Designing a geography of hope: a practitioner's handbook for ecoregional conservation planning*, The Nature Conservancy, volume I, second edition, 83 p.

HARMS, W.-B., 1995, Scenarios for nature development, in *Scenario Studies for the rural environment*, SCHOUTE J.-F.-T. et al. (eds), Kluwer Academic Publishers, p. 391-403.

HARMS, B. et al., 1993, Landscape planning for nature restoration: comparing regional scenarios, in *Landscape ecology of a stressed environment*, VOS, C.-C. ; OPDAM, P. (eds), Chapman and Hall, London, p. 197-218.

JORDAN III, W.-R. et al. (eds), 1987a, *Restoration ecology. A synthetic approach to ecological research*, Cambridge University Press, Cambridge, 342 p.

JORDAN III, W.-R. et al., 1987b, Restoration ecology: ecological restoration as a technique for basic research, in *Restoration ecology. A synthetic approach to ecological research*, JORDAN III W.-R. et al. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, p. 3-21.

LECOMTE, J. et al. (eds), 1995, Actes du colloque « Recréer la Nature », *Natures-Sciences-Sociétés*, 3 (hors série), 92 p.

MACMAHON, J.-A. ; HOLL, K.-D., 2001, Ecological restoration. A key to conservation biology's future, in *Conservation biology. research priorities for the next decade*, SOULÉ, M.-E. ; ORIANS, G.-H., Society for Conservation Biology, Island Press, Washington, p. 245-269.

MALAKOFF, D., 1998, Restored wetlands flunk real-world test, *Science*, 280, p. 371-372.

MATLOCK, M.-D. et al., 2001, Ecological engineering: a rationale for standardized curriculum and professional certification in the United States, *Ecological Engineering*, 17, p. 403-409.

MCCUTCHEON, S.-C. ; WALSKI, T.-M., 1994, Ecological engineers: friend or foe? *Ecological Engineering*, 3, p. 109-112.

MIDDLETON, J., 1999, *Wetland restoration, flood pulsing, and disturbance dynamics*, John Wiley & Sons, New York, 388 p.

MITSCH, W.-J., 1993, Ecological engineering. A cooperative role with the planetary life-support system, *Environmental Science & Technology*, 27, p. 438-445.

MITSCH, W.-J., 1996, Ecological engineering: a new paradigm for engineers and ecologists, in *Engineering within ecological constraints*, SCHULZE, P.-C. (ed.), National Academy of Engineering, National Academy Press, Washington, p. 111-128.

MITSCH, W.-J., 1998, Ecological engineering – the 7-year itch, *Ecological Engineering*, 10, p. 119-130.

MITSCH, W.-J. ; Gosselink, J.-G., 2000, *Wetlands*, Third Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 920 p.

MITSCH, W.-J. ; JØRGENSEN, S.-E. (eds), 1989, *Ecological engineering: an introduction to ecotechnology*, John Wiley & Sons, New York, 472 p.

MITSCH, W.-J. ; JØRGENSEN, S.-E., 2003, *General environmental engineering, ecological engineering and ecosystem restoration*, John Wiley & Sons, New York, 424 p.

MITSCH, W.-J. et al., 2002, Editorial – Ecological engineering applied to river and wetland restoration, *Ecological Engineering*, 18, p. 529-541.

NOSS, R.-F., 1985, On characterizing presettlement vegetation: how and why, *Natural Areas Journal*, 5, p. 513.

NRC, 1992, *Restoration of aquatic ecosystems. Science, technology and public policy*, Committee on restoration of aquatic ecosystems – Science, technology, and public policy, Water science and technology Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, 552 p.

ORMEROD, S.-J., 2003, Restoration in applied ecology: editor's introduction, *Journal of Applied Ecology*, 40, p. 44-50.

- ORMEROD, S.-J., 2003, Restoration in applied ecology: editor's introduction, *Journal of Applied Ecology*, 40, p. 44-50.
- SCHAEFFER, D.-J., 1996, Do no harm: a new philosophy for reconciling engineering and ecology, in *Engineering within ecological constraints*, SCHULZE, P.-C. (ed.), National Academy of Engineering, National Academy Press, Washington, p. 187-196.
- SER, 2002, The SER primer on ecological restoration, Society for Ecological Restoration Science & Policy Working Group, www.ser.org.
- SMITH, R.-D., 2001, Developing a reference wetland system, in *Hydrogeomorphic approach to assessing wetland functions: guidelines for developing regional guidebooks*, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, 12 p.
- SOULÉ, M.-E., 1989, Conservation biology in the twenty-first century: summary and outlook, in *Conservation for the twenty-first century*, WESTERN, D. ; PEARL, M.-C. (eds), Oxford University Press, Oxford, p. 297-303.
- STRASKRABA, M., 1993, Ecotechnology as a new means for environmental management, *Ecological Engineering*, 2, p. 311-331.
- SUDING, K.-N. ; GROSS, K.-L. ; HOUSEMAN, G.-R., 2004, Alternative states and positive feedbacks in restoration ecology, *TRENDS in Ecology and Evolution*, 19, p. 46-53.
- TEAL, J., 1998, President's address, *SWS Bulletin*, 15, p. 3.
- USEPA, 2003, River Corridor and Wetland Restoration, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, www.epa.gov/owow/wetlands/restore/.
- WILSON, E.-O., 1992, *La diversité de la vie*, Odile Jacob, Science, Paris, 496 p.
- WINTERHALDER, K. ; CLEWELL, A.-F. ; ARONSON, J., 2004, Values and science in ecological restoration – A response to Davis and Slobodkin, *Restoration Ecology*, 12, p. 4-7.
- WURTH, A.-H. Jr, 1996, Why aren't all engineers ecologists ? in *Engineering within ecological constraints*, SCHULZE, P.-C. (ed), National Academy of Engineering, National Academy Press, Washington, p. 129-137.
- YOUNG, T.-P., 2000, Restoration ecology and conservation biology, *Biological Conservation*, 92, p. 73-83.
- ZEDLER, J.-B., 2000, Progress in wetland restoration ecology, *Trends in Ecology & Evolution*, 15, p. 402-407.
- ZEDLER, J.-B. ; CALLAWAY, J.-C., 1999, Tracking wetland restoration: do mitigation sites follow desired trajectories ? *Restoration Ecology*, 7, p. 69-73.