

Biodiversité et gestion des systèmes aquatiques continentaux

Biodiversity and management
of inland aquatic ecosystems

C. LÉVÊQUE

SUMMARY

As a result of their island-like nature, inland waters are usually characterised by a high level of endemism for several animal groups. This patchy distribution also results in great genetic variability between populations. While inland waters occupy only 1-2% of emerged lands an unusual high proportion of vertebrates (around 1/3) inhabits or is strongly dependant on inland waters to complete their biological cycle. This remarkable concentration of vertebrate biodiversity is also extremely vulnerable, given that inland water aquatic resources world-wide have undergone severe deterioration.

The fragility of inland water ecosystems and their species has been recognised all over the world. These resources have been exposed to a variety of increasing pressures such as water extraction for domestic, agricultural and industrial uses, pollution (organic and inorganic), fishing, introduction of exotic species, habitat alterations in relation to water management, etc. These stressors to the inland water environments have affected, and will continue to affect life in all inland water ecosystems. One of the major causes of change in biodiversity has been, and most likely will continue to be long-term, climate change.

More knowledge is needed about the identification of species, how biological diversity is distributed, and what the trends observed on the short- to long-term biodiversity changes are.

In many tropical countries there are lakes and rivers lacking even the most basic research on fauna and flora. Pertinent information on biological diversity in most developing countries, when it exists, is too sparse or scattered to be of practical use. Therefore, efforts should be devoted to the development of computer data bases and information networks for the collection and storage of information dealing with the identification and distribution of freshwater biodiversity. Development of these systems would benefit from the expertise and collaboration of taxonomists all over the world.

Orstom, 213 rue La Fayette . 75480 Paris Cedex 10, France.

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : Bx17184 Ex:1

Fonds Documentaire ORSTOM



010017184

From the perspective of sustainable development, multiple-use management of aquatic ecosystems can provide the framework for achieving long-term sustainability of resources and for maintaining biodiversity. The future of biodiversity is closely linked to the management options at the watershed scale and a key issue is to promote an integrated basin management approach. However, a wise management of aquatic systems and the conservation of their biodiversity requires not only technical inputs, but also a good knowledge of social and economic issues. Valuation is a fundamental step in informing planners and resource managers about the economic importance of biodiversity in national development objectives, and to demonstrate the importance of different areas for the biological resources they contain. Research programs have also to be intensified on the complex relationships between biodiversity and aquatic ecosystems functioning which are still poorly understood. Some major ecological issues have been identified: how is system stability and resilience affected by species diversity, and to what extent could the integrity and sustainability of ecosystems be maintained in spite of species deletions resulting from degradation of environmental conditions? The relationship of species richness to such processes as biological productivity is still an open question.

The key to successful monitoring programs is to maintain the ability to detect general changes in the status of biodiversity and to identify tools that are adequate and appropriate for assessing the effectiveness of measures taken for the conservation of biodiversity through the sustainable use of aquatic systems. A variety of indicators of biological diversity in aquatic systems have been developed and may be employed. The precautionary principle, as adopted for fisheries by FAO, emphasises growing awareness that fisheries management cannot be seen in isolation and must fit an integrated context which satisfies the requirement both for long-term resource sustainability and environmental conservation.

An understanding of the effects of invading exotic organisms on freshwater systems should receive high priority in regard to their documented consequences on native biodiversity in ecosystems where they have been introduced. The knowledge required relates primarily to predictable effects of introduced species.

Key-words: biodiversity, inland waters, sustainable development, functional role, bioindicators, value of biodiversity, biomanipulations.

RÉSUMÉ

La biodiversité des eaux continentales se caractérise par une forte endémicité de nombreuses espèces résultant de la nature insulaire des milieux. Alors qu'elles n'occupent que 1-2 % des terres émergées une proportion importante de vertébrés (environ 1/3) vit dans les eaux continentales ou en dépendent étroitement pour réaliser leur cycle biologique. Certains systèmes aquatiques, comme les lacs dits anciens, sont de véritables laboratoires naturels pour étudier l'évolution, et il faut protéger ce patrimoine.

Les recherches sur l'origine et la dynamique de la biodiversité aquatique (inventaire, phylogénie, biogéographie) doivent se poursuivre, notamment pour les milieux tropicaux encore mal connus. Les relations fonctionnelles entre les espèces et les écosystèmes constituent un nouveau centre d'intérêt qui nécessite à la fois de revisiter les résultats déjà obtenus, de mettre en place des recherches spécifiques, et de développer des approches expérimentales. Quelles relations existe-t-il entre la biodiversité et la stabilité ou la productivité des écosystèmes par exemple ?

La biodiversité est un médiateur entre les systèmes écologiques et les systèmes sociaux dont la conservation s'inscrit dans la problématique du développement durable. La valorisation économique de la biodiversité pose de nouvelles questions à l'économie de l'environnement malgré les difficultés méthodologiques

rencontrées. Les questions qui intéressent les gestionnaires portent principalement sur l'état de santé des écosystèmes et les moyens de la caractériser (indicateurs biologiques par exemple). La gestion durable des ressources vivantes, et une meilleure évaluation des conséquences des introductions d'espèces (biomanipulations) constituent également des objectifs finalisés auxquels les recherches dans le domaine de la biodiversité aquatique se doivent d'apporter des éléments de réponse.

Mots clés : biodiversité, systèmes continentaux, développement durable, rôle fonctionnel, indicateurs biologiques, valeur économique, biomanipulations.

En quelques années, le terme biodiversité est devenu incontournable dans les milieux scientifiques et auprès du grand public. La question de la diversité biologique n'est pourtant pas une idée nouvelle car les sciences de la nature s'intéressent depuis longtemps à l'inventaire, à l'origine, et à la dynamique du monde vivant. Mais aussi longtemps que les ressources naturelles paraissaient inépuisables, ce domaine de recherche ne concernait principalement que le monde scientifique et ceux qui s'intéressaient peu ou prou au développement des connaissances naturalistes.

C'est l'inquiétude suscitée par la disparition massive et rapide des milieux naturels, sous l'effet conjugué des activités liées au développement et de moyens techniques de plus en plus puissants, qui a d'abord suscité un cri d'alarme des scientifiques et des associations de conservation de la nature. Simultanément, d'autres se sont inquiétés de la perte éventuelle de ressources domestiques et industrielles, mais également de ressources biologiques potentielles et jusqu'ici inexploitées. D'autres encore se sont posé la question des conséquences éventuelles d'une réduction de la diversité biologique sur le fonctionnement des écosystèmes, et plus généralement sur les phénomènes régulateurs de la biosphère.

Cette prise de conscience impliquant à la fois des composantes éthiques, scientifiques et économiques (LÉVÊQUE, 1997a ; PARIZEAU, 1997), est à l'origine d'un renouveau d'intérêt pour le monde vivant et son devenir. Elle conduit à se poser de nouvelles questions non seulement sur l'importance de la diversité biologique dans la régulation générale de la biosphère, mais également sur son rôle économique dans le cadre des biens et des services qui sont fournis par les milieux naturels (CONSTANZA *et al.*, 1997).

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA DIVERSITÉ BIOLOGIQUE DES EAUX CONTINENTALES

Les bassins hydrographiques fluviaux et lacustres sont comparables à des îles, isolées les unes des autres par des barrières terrestres infranchissables aux espèces strictement aquatiques. La plupart des espèces de poissons, de mollusques, ou de crustacés décapodes par exemple, ne peuvent coloniser d'autres bassins qu'à l'occasion de connexions qui s'établissent entre ces bassins lors d'inondations exceptionnelles, de captures, ou d'événements géologiques modifiant le cours des fleuves. Il en résulte :

- un taux d'endémicité relativement important, notamment dans les lacs et rivières qui sont restés isolés durant des millions d'années comme les Grands lacs d'Afrique de l'Est, les lacs Baikal, Biwa, Titicaca, ainsi que les bassins de l'Amazone et du Congo par exemple ;
- une grande variabilité génétique entre les populations d'espèces à vaste répartition mais occupant des systèmes isolés depuis des périodes plus ou moins longues ;
- la nécessité pour les espèces qui doivent survivre *in situ* ou disparaître lorsque les conditions deviennent défavorables, de s'adapter rapidement aux changements du milieu. Beaucoup développent des formes de résistance (diapause par exemple) qui leurs permettent d'attendre des périodes plus propices ou qui favorisent la dissémination. De manière générale les espèces d'eau douce ont plutôt développé des stratégies démographiques de type « K », alors que les espèces marines sont plutôt de type « r », mais l'on trouve bien entendu les deux types de stratégies dans l'un ou l'autre milieu.

Une autre caractéristique des eaux continentales est le fait qu'elles hébergent non seulement un nombre important de micro-organismes, d'algues et d'invertébrés, mais également une quantité de vertébrés hors de proportion avec la superficie qu'elles occupent. En effet, les lacs et rivières ne représentent que 0,01 % des eaux de la planète, pour une surface qui avoisine 1 à 2 % des terres émergées. On estime qu'il y a au moins 10 500 espèces de poissons d'eau douce sur les quelques 24 600 espèces de poissons décrites, ce qui représente environ 1/4 des vertébrés connus. Mais si l'on prend en compte l'ensemble des autres vertébrés (batraciens, reptiles, oiseaux et mammifères) qui dépendent étroitement des eaux continentales pour accomplir leur cycle biologique, on peut estimer qu'au moins 1/3 des vertébrés sont présents dans les hydrosystèmes ou en sont très dépendants.

Cette grande richesse biologique est également l'une des plus menacées par le développement des activités humaines. Les hommes se sont le plus souvent installés à proximité des eaux douces indispensable à leurs besoins. Dans certaines régions, les habitats aquatiques ont été largement modifiés par la chenalisation, les barrages, les endiguements, les prélèvements d'eau. Depuis longtemps, les rivières servent de canal d'évacuation à des industries polluantes : laiteries, tanneries (pollutions organiques), et plus récemment, industries chimiques. Les modifications dans l'usage des sols et l'occupation des terres sont à l'origine de phénomènes d'érosion provoquant l'envasement des hydrosystèmes, alors que les engrais et pesticides agricoles favorisent l'eutrophisation et polluent les eaux superficielles et les nappes souterraines. Il ne faut pas oublier non plus les modifications apportées dans les communautés biologiques par l'exploitation des ressources vivantes, et les conséquences parfois considérables des introductions d'espèces. L'« écologie catastrophe » a décrit dans le détail nombre d'événements particulièrement dramatiques, que ce soit ceux de la mer d'Aral, du lac Victoria ou des Grands lacs américains. Mais en réalité, beaucoup d'espèces aquatiques disparaissent dans l'indifférence, en particulier dans les milieux tropicaux encore mal connus. Cette indifférence provient en partie d'une répulsion instinctive du public par rapport aux animaux aquatiques à sang froid, ou vis-à-vis de certains types de milieux tels les marais que l'on s'est efforcé d'assécher pendant longtemps pour éviter les maladies.

Les changements climatiques ont été, et seront encore dans le futur, une des causes majeures de changement à long terme de la biodiversité aquatique.

PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ASSOCIÉES AU CONCEPT DE BIODIVERSITÉ

Si le concept de biodiversité ne modifie pas radicalement notre conception de l'écologie, il nous incite cependant à nous interroger, plus que par le passé, sur le rôle du monde vivant dans le fonctionnement des systèmes. Dans cette perspective, nombre de connaissances acquises peuvent être réinterprétées parfois de manière un peu différente.

La biodiversité n'est pas seulement l'inventaire des espèces animales et végétales, mais concerne trois niveaux emboîtés de la hiérarchie biologique : (i) la *diversité des espèces*, qui est la manière la plus classique, et souvent la plus simple, d'apprécier la richesse biologique d'un système ou d'une aire géographique ; la notion d'espèce est cependant discutée, en particulier chez les micro-organismes ; (ii) la *diversité génétique*, qui est l'ensemble de l'information génétique contenue dans tous les êtres vivants. Cette diversité est nécessaire pour que les espèces puissent s'adapter aux modifications du milieu où elles vivent ; (iii) la *diversité écologique*, qui est celle des écosystèmes constitués par des complexes d'espèces (ou biocénoses) et leur environnement physique. Ces écosystèmes évoluent en fonction du temps, notamment sous l'effet des variations climatiques saisonnières ou à long terme, ainsi que sous l'effet des activités humaines.

Si l'on peut présenter simplement la biodiversité par ces trois volets, l'enjeu des recherches sur le fonctionnement des écosystèmes est en réalité de prendre en compte les interrelations entre les différents niveaux hiérarchiques, et non pas de les traiter séparément. Il faut faire en sorte que des disciplines dont les objets d'étude et les méthodes ont divergé au cours de l'histoire, telles que la biologie de l'évolution, la biologie des populations et l'écologie des écosystèmes, puissent de nouveau converger autour de problématiques écologiques communes.

C'est ainsi qu'une écologie centrée sur l'individu est actuellement en train d'émerger alors que dans la littérature écologique les espèces ont été traitées pendant longtemps comme des entités monolithiques. Ce sont les individus, non les espèces, qui interagissent dans un système, qui mangent ou sont mangés, qui vivent et qui meurent, qui capturent et transfèrent de l'énergie. Pour comprendre le rôle de la diversité génétique dans le fonctionnement des écosystèmes, c'est bien au niveau des individus qu'il faut se situer. De même, les théories de l'évolution s'intéressent à l'individu porteur d'innovations, puis à la population (ensemble d'individus d'une même espèce) pour étudier les mécanismes de la sélection naturelle résultant, par exemple, des fluctuations du milieu ambiant. Alors que l'adaptabilité de chaque individu est déterminée par son génotype, et est exprimée par une certaine plasticité phénotypique, le polymorphisme génétique permet l'adaptabilité globale de la population. Cette approche « individu centrée » renforce les relations entre les recherches sur la génétique, la dynamique des populations, et le fonctionnement des écosystèmes.

D'autre part, on prend désormais en compte le fait que la diversité actuelle des flores et des faunes résulte de l'histoire des systèmes aquatiques continentaux qui a contraint, selon les périodes, les espèces à s'adapter (évolution et spéciation) ou à disparaître. On réalise également que les communautés animales et végétales sont des entités complexes, aux interactions multiples, dont nous commençons seulement à découvrir les mécanismes. Outre la prédation et ses con-

séquences qui ont constitué l'un des principaux thèmes de réflexion de l'écologie, on s'intéresse également aux relations mutualistes ainsi qu'aux divers modes de communication entre individus et entre espèces. L'étude des flux de matière et d'énergie qui avait constitué le thème majeur du Programme Biologique International dans les années 1960, n'est en réalité qu'une caricature un peu trop simplifiée du fonctionnement des écosystèmes. La mise en évidence des cascades trophiques, des boucles de rétroaction, de la boucle microbienne, montrent que la diversité biologique n'est pas seulement un assemblage d'espèces, résultat passif des contraintes physico-chimiques du milieu, mais qu'elle joue de manière rétroactive un rôle important dans le fonctionnement de l'écosystème, y compris dans la régulation des processus physiques et biogéochimiques. La vision actuelle est donc bien celle d'un ensemble interactif dans le temps et dans l'espace, dans lequel la diversité du monde vivant réagit et s'adapte aux fluctuations de son environnement, tout en intervenant sur l'évolution de cet environnement. La biodiversité est ainsi un équilibre dynamique entre des processus tels que l'adaptation et la spéciation, les migrations et les extinctions.

Quelques grands thèmes, traditionnels et/ou nouveaux, s'inscrivent à l'heure actuelle dans la dynamique des recherches sur la biodiversité :

Origine, inventaire et dynamique de la biodiversité

L'inventaire des espèces aquatiques est une tâche encore inachevée. Si la flore et la faune sont relativement bien connues dans les milieux tempérés, ce n'est pas le cas en général des régions tropicales. On estime, par exemple, que près de 90 % des microorganismes présents dans l'environnement n'ont pas encore été décrits. Cependant la banalisation des techniques de séquençage devrait permettre des progrès rapides dans la connaissance de la diversité des microorganismes. Des progrès considérables sont possibles en facilitant l'accès à l'information existante, disséminée actuellement dans de nombreux ouvrages ou dans des musées. La constitution de bases de connaissances sur la taxonomie, la distribution, et la biologie des espèces, est un outil indispensable pour le développement ultérieur des recherches.

Les milieux aquatiques continentaux, offrent également des situations privilégiées pour l'étude des processus de spéciation, en particulier les lacs dits anciens, caractérisés par un taux important d'endémicité (MARTENS *et al.*, 1994). On a pu comparer ces milieux à de véritables laboratoires de l'évolution, malheureusement menacés par les conséquences des activités humaines.

La prise en compte de l'histoire et de la dynamique des hydrosystèmes est importante pour comprendre la distribution actuelle de la biodiversité. Beaucoup de milieux ont disparu, entraînant l'extinction définitive des espèces endémiques comme le montrent des restes fossiles. En particulier, les fluctuations climatiques liées aux périodes glaciaires qui se sont succédées au cours du quaternaire, ont été à l'origine de l'assèchement de nombreux milieux aquatiques tropicaux, alors que les hydrosystèmes tempérés étaient pris sous les glaces. Les espèces aquatiques ont dû survivre le plus souvent dans des zones refuges avant de recoloniser les milieux libérés par la fonte des glaciers, ou remis en eau par l'accroissement de la pluviométrie. Ces zones refuges ont été, par exemple, le cours inférieur du Mississippi pour les poissons d'eau douce nord américains ou le Danube pour les espèces européennes.

Enfin, les progrès de la biologie moléculaire permettent d'étudier maintenant la diversité et la variabilité génétique des populations, et de discuter la notion d'espèce. De nombreux travaux portent actuellement sur la compréhension des mécanismes de l'adaptation et de la spéciation en liaison avec les changements de l'environnement biotique et abiotique.

Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes

Les relations fonctionnelles entre les espèces et les écosystèmes sont encore mal connues dans les milieux aquatiques. C'est pourtant une étape nécessaire pour répondre à un ensemble de questions que se posent à la fois les scientifiques et les gestionnaires : toutes les espèces sont-elles nécessaires au bon fonctionnement des systèmes ? Dans cette perspective, quelques questions sont toujours l'objet de débats (LÉVÊQUE, 1995) :

Diversité génétique, comportements, et dynamique des peuplements

Les recherches en biologie des populations ont montré pour certaines espèces l'existence d'une grande variabilité génétique. Chez les crustacés planctoniques comme les Daphnies par exemple, il existe des complexes d'espèces constitués de différents clones. Certains d'entre eux correspondent à des "espèces génétiques" alors que d'autres sont des hybrides de ces espèces. Il semble que cette diversité corresponde à des stratégies adaptatives qui permettent aux espèces d'accroître leurs chances de survie face aux fluctuations du milieu. Les différences observées dans les comportements migratoires au sein d'espèces planctoniques, peuvent être également attribués à des différences génétiques. Ce champ de recherche, ainsi que celui des communications chimiques entre espèces qui peuvent influencer sur le comportement, sont en pleine expansion.

Diversité biologique et stabilité des écosystèmes

La diversité biologique joue-t-elle un rôle dans la stabilité des écosystèmes et leur aptitude à retrouver un état d'équilibre à la suite de perturbations d'origine externe ou interne ? On peut penser intuitivement que des systèmes plus diversifiés sont plus stables que les systèmes simplifiés, dans la mesure où la multiplicité des proies, des prédateurs, et des réseaux trophiques permet d'amortir les fluctuations éventuelles. Cependant des modèles de simulation laissent à penser que la diversification pourrait au contraire induire l'instabilité. En réalité, on ne dispose pas d'informations suffisantes pour valider ou non ces hypothèses, et diverses observations donnent des résultats contradictoires.

Dans ce contexte, on s'interroge également sur le rôle des espèces rares. Sont-elles des espèces en voie de disparition mal adaptées aux conditions de milieux actuelles ? Ou au contraire, sont-elles une forme d'assurance sur l'avenir en constituant un stock d'espèces susceptibles de remplacer les espèces actuellement dominantes si les conditions de milieux viennent à changer ?

Diversité biologique et productivité des écosystèmes

Que se passe-t-il à l'intérieur d'un écosystème si la diversité biologique est réduite ? Y a-t-il une relation entre la diversité biologique, d'une part, et la biomasse ou la productivité des systèmes, d'autre part ? Dans l'état actuel des con-

naissances, il apparaît que la diversité n'est pas un élément déterminant de la productivité des écosystèmes et que ces derniers peuvent fonctionner normalement avec un petit nombre d'espèces. Certaines zones humides ou certains lacs salés, par exemple, montrent de fortes productivités biologiques avec un nombre réduit d'espèces.

Un aspect particulier concerne le rôle de la diversité biologique dans le cycle des éléments nutritifs nécessaires à la production primaire. La circulation des éléments nutritifs ou de la matière vivante dépend de nombreuses composantes biologiques qui vont réguler la nature et la complexité des circuits, ainsi que l'importance des flux. De nombreuses fonctions comme la nitrification et la dénitrification, la fixation d'azote, la dépollution, sont assurées essentiellement par des micro-organismes dont on connaît encore mal le rôle dans les processus fonctionnels de l'écosystème. On s'interroge également sur le rôle que peuvent jouer des prédateurs terminaux comme les poissons sur la circulation des éléments nutritifs, à travers la bioturbation, l'excrétion, le transport entre les différents compartiments de l'écosystème (par exemple du littoral vers le pélagique ou inversement).

BIODIVERSITÉ AQUATIQUE ET DEMANDE SOCIALE

Les économistes parlent des biens et services rendus par la biodiversité aux sociétés humaines. Les biens sont les ressources vivantes aquatiques (poissons, crevettes, mollusques, végétaux aquatiques) qui font l'objet d'une exploitation et d'une utilisation intensive de la part de certaines sociétés qui en tirent l'essentiel de leurs ressources alimentaires et domestiques. Quant aux services, il s'agit par exemple de l'épuration des eaux par les zones humides ou la végétation riveraine. De même la végétation du bassin versant joue un rôle régulateur pour les crues et prévient l'érosion des sols. Enfin les milieux aquatiques exercent un attrait indiscutable sur le plan des loisirs.

La question de la conservation de la biodiversité est au centre d'un débat de nature politique, en ce qui concerne les choix qui doivent être faits entre différents modes de développement et les priorités relatives à accorder à l'économie ou à la conservation des milieux naturels. Les scientifiques peuvent apporter des éléments de nature technique pour éclairer ce débat, et aider à la recherche de nécessaires compromis pour une gestion à long terme des ressources naturelles. Les réponses aux questions soulevées par les usages et la gestion de la biodiversité, nécessitent le plus généralement, une démarche associant les sciences de la nature aux sciences sociales.

Quelques thématiques répondent actuellement à ces préoccupations finalisées :

Valorisation économique de la biodiversité

Dans un contexte d'incertitude et de conflits d'intérêts, le langage économique est perçu comme un instrument de négociation pour guider la décision. Le souci de quantifier la biodiversité en termes monétaires, plus facilement accessibles aux décideurs que des considérations éthiques ou écologiques, se heurte à des problè-

mes méthodologiques importants. Les économistes ne sont pas tous d'accord, loin s'en faut, sur la démarche. Il y a donc un champ de recherches méthodologiques nouvelles pour l'économie de l'environnement avec la biodiversité comme objet d'étude. Pour montrer l'importance du problème, quelques économistes et écologistes ont tenté d'évaluer les services rendus gratuitement par la nature à l'échelle mondiale. Ces services ne sont pas comptabilisés dans les économies nationales mais il en coûterait chaque année près du double du PNB mondial pour les remplacer. Dans ces bilans, les zones humides avec près de 15 000 US\$ par ha et par an, ainsi que les lacs et rivières avec 8 500 US\$, arrivent largement en tête par unité de surface par rapport aux autres milieux naturels (CONSTANZA *et al.*, 1997).

Gestion durable des hydrosystèmes et biodiversité

Les connaissances acquises dans le domaine de l'écologie des systèmes aquatiques peuvent être utilisées pour proposer des principes de surveillance et de gestion, voire de restauration de ces milieux. Il s'agit de fournir aux gestionnaires les moyens d'apprécier l'état écologique des hydrosystèmes, et de suivre leur évolution dans le temps :

Intégrité biotique des écosystèmes

L'intégrité biotique des écosystèmes, ce que certains appellent la santé des écosystèmes, peut se définir comme la capacité d'un milieu à abriter et à maintenir une communauté équilibrée et adaptée d'organismes, ayant une composition spécifique, une diversité, et une organisation fonctionnelle comparables à celles d'habitats naturels de la région (ou du moins des habitats les moins perturbés). Un système vivant fait preuve d'intégrité si, lorsqu'il est soumis à une perturbation, il conserve la capacité de réagir lui-même et d'évoluer vers un stade final qui soit normal ou « bon » pour ce système.

Définir des critères, et choisir des indicateurs serait une tâche relativement facile si l'écologie pouvait nous fournir des modèles simples, mais rigoureux, pour décrire et prévoir l'état des écosystèmes. Ce n'est pas encore le cas, alors que la surveillance, la gestion, ou la législation exigent une définition plus précise et plus objective du concept d'intégrité biotique. Il faut donc définir la notion d'intégrité de manière opérationnelle, en sélectionnant pragmatiquement les variables qui semblent pertinentes, et en définissant une situation de référence qui constitue un objectif à atteindre pour la restauration/réhabilitation des milieux dégradés.

Indicateurs biologiques

Un programme de surveillance écologique doit répondre à divers objectifs : fournir une évaluation des conditions de l'environnement pour déterminer (i) si ces conditions vont se dégrader, et jusqu'à quel point, sous l'effet d'impacts programmés ; (ii) ou si l'on est sur la bonne voie par rapport à un programme de réhabilitation.

La prise en compte de variables biologiques pour caractériser la qualité des écosystèmes aquatiques permet une évaluation beaucoup plus précise du devenir du compartiment biologique que les seules variables physico-chimiques. C'est le cas, en particulier, pour la régulation du débit ou la destruction de certains biotopes, qui peuvent avoir pour conséquence d'éliminer certaines espèces, sans pour autant altérer la qualité physico-chimique des eaux.

Il existe à l'heure actuelle un certain nombre d'indicateurs biologiques répondant à des objectifs variés. La plupart des groupes aquatiques sont concernés : diatomées, macrophytes, invertébrés, poissons, etc. Les recherches se poursuivent dans le but de mieux préciser leurs limites d'utilisation ou d'adapter aux eaux européennes des méthodologies mises au point en Amérique du Nord (indice poisson par exemple). Un enjeu important des indicateurs biologiques et des indices qui en découlent, est l'application possible de normes de qualité à l'échelle nationale ou internationale. L'incidence économique est loin d'être négligeable pour les industries qui auraient à s'y adapter.

Gestion durable des ressources vivantes

On s'inquiète depuis peu des effets de la pêche sur les peuplements aquatiques qui peuvent se manifester à deux niveaux : (i) une modification de la structure des peuplements pouvant conduire localement à la disparition de certaines espèces si la pêche est trop intensive, et (ii) un impact différentiel sur les stocks et les génotypes avec les risques de disparition de certains d'entre eux. Le principe de précaution développé par la FAO pour les eaux marines et continentales met l'accent sur la nécessité d'une intégration de la politique des pêches dans un contexte plus large de gestion durable des milieux. Il s'agit en particulier de promouvoir des pratiques de pêche compatibles avec les caractéristiques des écosystèmes.

Mais des recherches de plus en plus nombreuses portent également sur les modes de gestion traditionnels des ressources vivantes. Ces derniers, après avoir été décriés voire méprisés au profit de modes de gestion centralisés, sont maintenant considérés par de nombreux auteurs comme des alternatives possibles après que les modes de gestion étatiques aient montré leur incapacité à répondre aux problèmes locaux dans de nombreux pays. La manière dont les communautés de pêcheurs contrôlent l'accès aux ressources serait dans ce domaine un élément essentiel d'une exploitation durable.

Bio-manipulations

La question des introductions d'espèces est devenue l'objet d'un débat de fond parmi les écologistes (Anonyme, 1997). De nombreuses espèces ont été introduites pour augmenter la production de la pêche ou développer la pêche sportive, ainsi que dans une perspective de lutte biologique pour éradiquer des plantes ou des insectes. Alors que ces introductions ont été encouragées pendant longtemps (c'était le rôle des Jardins d'Acclimatation), elles sont perçues depuis quelques décennies comme un exercice à hauts risques. On a constaté en effet que certaines introductions pouvaient avoir des conséquences graves sur la flore et la faune indigènes. On cite en particulier l'exemple du *Lates niloticus* dans le lac Victoria qui a éliminé plus d'une centaine de cichlidés endémiques (LÉVÊQUE, 1997b), celui de la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) qui a envahi de nombreux plans d'eau tropicaux, ou encore la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*) qui, partie d'Europe de l'Est, envahit maintenant les Grands lacs américains. Avec l'augmentation des échanges intercontinentaux, il est probable que des introductions accidentelles se poursuivront. Mais il est raisonnable de penser également que dans certains milieux les introductions sont justifiées pour des raisons économiques. Les scientifiques ont donc à mobiliser leurs connaissances pour établir des protocoles en vue d'évaluer les risques pour les espèces candidates aux introductions.

Les écologistes essaient également de restaurer et de réhabiliter les milieux aquatiques dégradés. Pour les milieux eutrophisés, présentant un développement phytoplanctonique important, les manipulations de chaînes trophiques (cascades trophiques) apparaissent comme un moyen d'éliminer les algues. Nous sommes loin cependant de maîtriser tous les paramètres impliqués et des recherches sont encore nécessaires pour améliorer les méthodes.

CONCLUSIONS

Conformément aux objectifs de la Convention sur la biodiversité signée à Rio de Janeiro en 1992, c'est dans une perspective de développement durable qu'il faut envisager la conservation de la biodiversité, dans le contexte d'une gestion intégrée des bassins versants. Les systèmes aquatiques continentaux, malgré leurs faibles superficies, abritent un patrimoine biologique inestimable. Si le développement reste un objectif prioritaire dans la plupart des pays, il faut rechercher des compromis permettant de préserver à long terme ce patrimoine. Les limnologues, dans ce contexte, ont le devoir de fournir les informations nécessaires aux prises de décision. La biodiversité est ainsi un concept fédérateur, un médiateur des systèmes écologiques et sociaux, pour aborder la mise en valeur et la gestion des milieux et des ressources. Il faut tout à la fois développer nos connaissances sur les origines et la dynamique de la diversité du vivant, tout en recherchant les conditions d'une compatibilité entre la conservation de la biodiversité et les exigences du développement économique et social (LÉVÊQUE, 1997a).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anonyme. 1997. Les introductions d'espèces dans les milieux aquatiques continentaux en métropole. Séminaire ministère de l'Environnement-GIP Hydrosystèmes, Paris. 13-15 février 1996. *Bulletin français de la pêche et de la protection des milieux aquatiques*, n° 344-345. 513 pp.
- CONSTANZA R., D'ARGE R., DE GROOTS R., FARBER S., GRASSO M., HANNON B., LIMBURG K., NAEEM S., O'NEILL R., PARUELO J., RASKIN R.G., SUTTON P., VAN DEN BELT M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 15 May 1997, 253-260.
- LÉVÊQUE C., 1995. Role and consequences of fish diversity in the functioning of African freshwater ecosystems: a review. *Aquatic Living Resources*, 8, 59-78.
- LÉVÊQUE C., 1997a. *La biodiversité. Que sais-je?* n° 3166. Presses Universitaires de France, Paris.
- LÉVÊQUE C., 1997b. *Biodiversity dynamics and conservation: the freshwater fish of tropical Africa*. Cambridge University Press, Cambridge.
- MARTENS K., GODDEERIS B., COULTER G. (Sci. ed.), 1994. Speciation in ancient lakes. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, 44.
- PARIZEAU M.H. (éd. sci.), 1997. *La biodiversité. Tout conserver ou tout exploiter?* DeBoeck Université, Bruxelles.

REVUE DES SCIENCES DE L'EAU

Journal of Water Science

Publiée conjointement par le

**GROUPEMENT D'INTERET SCIENTIFIQUE
DES SCIENCES DE L'EAU** - France

**INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE - EAU** - Québec

TABLE DES MATIÈRES Vol. 11, n° spécial, 1998

Les sciences de l'eau : bilan et perspectives

- Introduction : F. ERB, J.P. VILLENEUVE p. 3
- Utilisation des outils numériques d'aide à la décision pour la gestion de l'eau.
J. DUPONT, J. SMITZ, A.N. ROUSSEAU, A. MAILHOT, G. GANGBAZO p. 5
- La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau.
J.P. VILLENEUVE, P. HUBERT, A. MAILHOT, A.N. ROUSSEAU p. 19
- Utilisation de l'information historique en analyse hydrologique fréquentielle.
T.B.M.J. OUARDA, P.F. RASMUSSEN, B. BOBEE, J. BERNIER p. 41
- L'hydrologie urbaine : nouvelles problématiques, nouvelles approches de solutions.
J.F. CYR, C. MARCOUX, J.C. DEUTSCH, P. LAVALLEE p. 51
- Évolution des recherches hydrologiques en partenariat en Afrique sub-saharienne :
l'exemple des pays francophones.
J.C. OLIVRY, J. SIRCOULON p. 61
- Le traitement des eaux usées.
D. BALLAY, J.F. BLAIS p. 77
- Le traitement des eaux de consommation : la nécessité d'une recherche en chimie de l'eau.
B. LEGUBE, R. DESJARDINS, M. DORE p. 87

(Suite p. 3 de couverture)

CONTENTS Vol. 11, n° special issue, 1998

Water Science: state of the art and perspectives

- Introduction: F. ERB, J.P. VILLENEUVE p. 3
- Use of digital decision support system tools for water management.
J. DUPONT, J. SMITZ, A.N. ROUSSEAU, A. MAILHOT, G. GANGBAZO p. 5
- Hydrological modelling and water management.
J.P. VILLENEUVE, P. HUBERT, A. MAILHOT, A.N. ROUSSEAU p. 19
- Use of historical information in hydrologic frequency analysis.
T.B.M.J. OUARDA, P.F. RASMUSSEN, B. BOBEE, J. BERNIER p. 41
- Urban hydrology: adapting solution strategies to evolutive problems.
J.F. CYR, C. MARCOUX, J.C. DEUTSCH, P. LAVALLEE p. 51
- Developing hydrology research in partnership in Sub-Saharan Africa: the example of the
French-speaking countries.
J.C. OLIVRY, J. SIRCOULON p. 61
- Wastewater treatment.
D. BALLAY, J.F. BLAIS p. 77
- Needs for research in water chemistry for drinking water treatment.
B. LEGUBE, R. DESJARDINS, M. DORE p. 87

(Continued on p. 3 of cover)

LAVOISIER ABONNEMENTS

111, rue Lavoisier, 75384 Paris cedex 08, France

INRS-EAU - Documentation

2800, rue Einstein, C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada G1V 4G7

Publiée conjointement par le

**GROUPEMENT D'INTÉRÊT SCIENTIFIQUE
DES SCIENCES DE L'EAU - France**

**L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE - EAU - Québec**

**REVUE DES
SCIENCES
DE L'EAU**
Journal of Water Science

TABLE DES MATIÈRES Vol. 11, n° spécial, 1998

(Suite de la p. 4 de couverture)

- Identification de composés génotoxiques dans les eaux de boisson.
F. LE CURIEUX, F. ERB, D. MARZIN p. 103
- Les progrès dans la mise en évidence d'éléments traces dans les eaux :
avenir des techniques.
A. MONTIEL, B. WELTE p. 119
- Effets des précipitations acides sur les écosystèmes aquatiques au Canada :
situation actuelle et perspectives (en anglais).
D.S. JEFFRIES, S.E. DOKA, M.L. MALLORY, F. NOROUZIAN, A. STOREY,
I. WONG p. 129
- Écologie microbienne en milieu aquatique : des virus aux protozoaires.
C. AMBLARD, J.C. BOISSON, G. BOURDIER, D. FONTVIEILLE, X. GAYTE,
T. SIME-NGANDO p. 145
- Les réseaux trophiques lacustres : structure, fonctionnement, interactions et variations
spatio-temporelles.
B. PINEL ALLOUL, A. MAZUMDER, G. LACROIX, X. LAZZARO p. 163
- Les contaminants de l'eau et leurs effets sur la santé.
P. PAYMENT, P. HARTEMANN p. 199
- Biodiversité et gestion des systèmes aquatiques continentaux.
C. LEVEQUE p. 211
- Les sciences de l'eau : présent et futur.
J.L. SASSEVILLE, G. de MARSILY p. 223

CONTENTS Vol. 11, n° special issue, 1998

(Continued)

- Identification of genotoxic compounds in drinking waters.
F. LE CURIEUX, F. ERB, D. MARZIN p. 103
- Detection of inorganic micropollutants in waters - Future development of analytical
techniques.
A. MONTIEL, B. WELTE p. 119
- Aquatic effects of acidic deposition in Canada: present and predicted future situation
(in English).
D.S. JEFFRIES, S.E. DOKA, M.L. MALLORY, F. NOROUZIAN, A. STOREY, I. WONG p. 129
- Microbial ecology in aquatic systems: a review from viruses to protozoa.
C. AMBLARD, J.C. BOISSON, G. BOURDIER, D. FONTVIEILLE, X. GAYTE,
T. SIME-NGANDO p. 145
- Lake trophic food webs: structure, function, interactions and spatio-temporal variations.
B. PINEL ALLOUL, A. MAZUMDER, G. LACROIX, X. LAZZARO p. 163
- Health effects associated with drinking water.
P. PAYMENT, P. HARTEMANN p. 199
- Biodiversity and management of inland aquatic ecosystems.
C. LEVEQUE p. 211
- The water sciences: present and future.
J.L. SASSEVILLE, G. de MARSILY p. 223

REVUE DES SCIENCES DE L'EAU

1998

n° spécial 10^e anniversaire

Journal of Water Science

TRIMESTRIEL/QUARTERLY

REVUE RECONNUE PAR LE CNRS

LES SCIENCES DE L'EAU :
BILAN ET PERSPECTIVES

DIRECTION SCIENTIFIQUE



GIS
des Sciences
de l'Eau

Université
du Québec
INRS-EAU



CO-ÉDITION

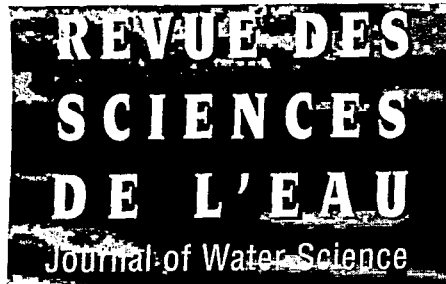


PARIS

Service de
Documentation
INRS-EAU



QUÉBEC



Publiée conjointement par le

GROUPEMENT D'INTÉRÊT SCIENTIFIQUE
DES SCIENCES DE L'EAU ■ France

l'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE - EAU ■ Québec

— REVUE RECONNUE PAR LE CNRS —

(Centre National de la Recherche Scientifique - France)

Les articles publiés dans la REVUE DES SCIENCES DE L'EAU sont indexés par :

Aqualine, ASFA, Biosis, Chemical Abstr., EauDoc, Ei Compendex, Embase, dialog SourceOne Engineering, Geobase, Pascal-CNRS Data, Pollution Abstr., Toxline, Water Resources Abstr., Waterlit.

La Revue des Sciences de l'Eau est aussi sur Internet ; l'adresse de son site Web est :

<http://www.rse.quebec.ca>

Les sommaires des volumes publiés et celui du prochain fascicule, les résumés des articles, les mots clés, les recommandations aux auteurs... s'y trouvent.

La Revue des Sciences de l'Eau bénéficie de l'aide financière de différents organismes :

- Fonds pour la Formation de Chercheurs et l'Aide à la Recherche (FCAR, subvention),
- le Ministère des Affaires Internationales du Québec,
- les Ministères français de l'Environnement (DGAD) et des Affaires Étrangères (DCST).

INTRODUCTION

F. ERB, J.P. VILLENEUVE

Créée en 1987, la Revue des Sciences de l'Eau résulte de la fusion de deux périodiques scientifiques : la *Revue Française des Sciences de l'Eau* et la *Revue Internationale des Sciences de l'Eau* publiée au Québec.

Depuis dix ans, elle s'attache à diffuser des articles scientifiques couvrant le vaste domaine des Sciences de l'Eau, aussi bien sur le plan qualitatif que sur le plan quantitatif, pour une meilleure maîtrise de la gestion des ressources en eau. Ce faisant, elle a pour but de favoriser l'approche cohérente de disciplines aussi variées que l'hydrogéologie, l'hydrobiologie, la microbiologie, l'écotoxicologie, la physicochimie, le traitement des eaux... sans omettre la dimension santé publique.

Cette revue de niveau international majoritairement francophone coéditée par la France et le Québec est la seule revue scientifique externe au CNRS à être officiellement reconnue par cet organisme depuis 1996, dans le monde de l'édition scientifique où défendre et promouvoir le fait français constitue un défi permanent.

Elle publie essentiellement des articles originaux, quelques tribunes libres... Le bilan de ses dix années d'existence est remarquable : 44 numéros ont été diffusés, ce qui représente 293 articles publiés par 938 auteurs. Avec un taux moyen d'acceptation de 45 %, cela correspond à quelques 650 papiers reçus et révisés grâce à l'intervention de près de 2 000 correcteurs. Il convient de remercier tous ceux qui ont ainsi contribué à la promotion du niveau de qualité, au développement et à la diffusion internationale de la Revue des Sciences de l'Eau.

Dans ce numéro spécial élaboré à l'occasion du dixième anniversaire de la Revue, l'équipe de Direction s'est attachée à vous proposer des articles d'un style tout différent : réflexions sur l'évolution des connaissances, états de l'art, synthèses traduisant les résultats des recherches fondamentales et appliquées et perspectives à l'horizon du troisième millénaire.

Ces textes ont été écrits par des spécialistes de réputation internationale qui