

**THESE**

présentée

devant l'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON I

pour l'obtention

du DIPLOME DE DOCTORAT

par

**Bernard CAZELLES**

DOCUMENT



n° 13378

**MODELISATION D'UN ECOSYSTEME LOTIQUE :  
DYNAMIQUE DU CARBONE ORGANIQUE DISSOUS  
ET DES MICROORGANISMES BENTHIQUES  
DANS UN COURS D'EAU POLLUE**

soutenue le 9 Juillet 1987

JURY : M. CAUSSADE  
M. EDELINÉ  
M. FONTVIEILLE  
M. PATTEE  
M. PAVE

Laboratoire d'Ecologie  
Université de Savoie  
73011 CHAMBERY

## SOMMAIRE

|   |    |
|---|----|
| <b>RESUME - SUMMARY</b>   | 19 |
| <b>NOTATIONS</b>  | 25 |
| <b>INTRODUCTION</b>   | 35 |
| <b>1<sup>ère</sup> PARTIE : LE SYSTEME ECOLOGIQUE ALBENCHE</b>                      | 41 |
| 1.1 Présentation du milieu étudié   | 45 |
| 1.2 Méthodes de mesure employées  | 49 |
| 1.2.1 Mesures des flux d'éléments carbonés dans la veine liquide                    | 49 |
| 1.2.1.1 Prélèvements effectués à l'aide de préleveurs automatiques                  | 49 |
| 1.2.1.2 La dérive   | 50 |
| 1.2.2 Mesures des fuites d'éléments carbonés  | 51 |
| 1.2.2.1 Mesures de production de CO <sub>2</sub>                                    | 51 |
| 1.2.2.2 Mesures des émergences  | 52 |
| 1.2.3 Mesures des concentrations d'éléments carbonés dans le compartiment benthique | 52 |
| 1.2.3.1 Teneurs globales des sédiments en carbone organique                         | 52 |

|                        |   |           |
|------------------------|---|-----------|
| 1.2.3.2                | Biomasse des macroinvertébrés   | 53        |
| 1.2.3.3                | Biomasse des microorganismes  | 53        |
| 1.2.4                  | Mesures complémentaires   | 54        |
| 1.3                    | Résultats expérimentaux   | 57        |
| <br>                   |   |           |
| <b>2<sup>ème</sup></b> | <b>PARTIE : MODELISATION D'UN ECOSYSTEME LOTIQUE</b>  | <b>63</b> |
| 2.1                    | Généralités à propos de la modélisation des écosystèmes aquatiques  | 65        |
| 2.2                    | Résultats de l'analyse du système "Albenche"  | 71        |
| 2.3                    | Modélisation des mécanismes hydrophysiques  | 75        |
| 2.3.1                  | Les équations de bilan des eaux de surface  | 77        |
| 2.3.1.1                | Equations locales instantanées  | 78        |
| 2.3.1.2                | Equations des eaux de surface   | 80        |
| 2.3.1.3                | Equations locales moyennées   | 81        |
| 2.3.1.4                | Equations des moyennes spatiales : modèles pratiques  | 83        |
| 2.3.2                  | Application des équations de bilan des eaux de surface à la modélisation des mécanismes de transport et de l'hydrodynamique dans l'Albenche | 87        |
| 2.3.2.1                | Etablissement d'un modèle de transport du matériel organique  | 87        |
| 2.3.2.2                | Modélisation de l'hydrodynamique  | 91        |
| 2.4                    | Modélisation de la dégradation de la matière organique par les microorganismes  | 93        |
| 2.4.1                  | Revue des principaux modèles de dégradation de la matière organique et de la croissance bactérienne   | 95        |
| 2.4.1.1                | Les principaux modèles conventionnels de croissance par épuisement de substrats organiques  | 97        |
| 2.4.1.2                | Modification des modèles conventionnels   | 101       |

|             |  |            |
|-------------|--|------------|
| 2.4.2       | Modélisation de la décomposition de la matière organique et de la croissance des micro-organismes : application aux écosystèmes aquatiques | 117        |
| 2.4.2.1     | Revue des rares modèles complexes proposés   | 121        |
| 2.4.2.2     | Application au compartiment benthique de l'Albenche  | 127        |
| 2.5         | Modélisation des macroinvertébrés benthiques   | 135        |
| 2.5.1       | Revue des principaux modèles écologiques d'écosystèmes aquatiques incorporant les macroinvertébrés   | 139        |
| 2.5.2       | Modélisation des macroinvertébrés benthiques dans un écosystème lotique  | 145        |
| 2.6         | Modélisation d'un écosystème lotique : synthèse des équations proposées  | 149        |
| <b>3***</b> | <b>PARTIE : SIMULATION DE LA DYNAMIQUE DU CARBONE ORGANIQUE DISSOUS ET DES MICROORGANISMES BENTHIQUES</b>                                  | <b>153</b> |
| 3.1         | Présentation du modèle   | 155        |
| 3.2         | Mise au point du modèle  | 159        |
| 3.2.1       | Mise au point du sous-modèle hydrodynamique  | 161        |
| 3.2.2       | Mise au point du sous-modèle de transport : simulation des campagnes de traçage  | 173        |
| 3.2.3       | Application des sous-modèles hydrophysiques à la simulation du transport du carbone organique dissous                                      | 183        |
| 3.2.3.1     | Reconstitution des flux de carbone organique dissous à l'entrée du tronçon étudié  | 183        |
| 3.2.3.2     | Application des sous-modèles hydrophysiques à la simulation du transport du carbone organique dissous                                      | 186        |
| 3.2.4       | Mise au point du modèle : prise en compte du sous-modèle écologique  | 191        |

|   |     |
|---|-----|
| 3.3 Analyse de sensibilité, validation et stochastisation du modèle | 205 |
| 3.3.1 Analyse de sensibilité du modèle                              | 205 |
| 3.3.1.1 Calcul des fonctions de sensibilité                         | 205 |
| 3.3.1.2 Analyse de sensibilité "généralisée"                        | 209 |
| 3.3.1.3 Analyse de sensibilité par mesures de distance              | 217 |
| 3.3.1.4 Conclusion sur les analyses de sensibilité du modèle        | 223 |
| 3.3.2 Identifiabilité et validation du modèle                       | 225 |
| 3.3.3 Stochastisation du modèle                                     | 237 |
| 3.4 Conclusions et applications du modèle                           | 247 |
| <br>  |     |
| <b>CONCLUSION</b>   | 263 |
| <br>  |     |
| <b>BIBLIOGRAPHIE</b>  | 271 |
| <br>  |     |
| <b>ANNEXES</b>  | 307 |

## RESUME

Le large développement des techniques de modélisation dans les domaines de l'Ecologie terrestre et limnique, et leur intérêt considérable en tant qu'outil d'aide à la compréhension de la dynamique des écosystèmes nous ont amené à construire et à mettre au point un modèle mathématique destiné à appréhender le fonctionnement des mécanismes d'auto-épuration dans les petits cours d'eau.

En s'appuyant sur une synthèse des données et des connaissances acquises depuis 1981 sur l'Albenche, petit cours d'eau pollué par une forte charge organique, cet outil dynamique doit permettre d'évaluer et d'interpréter le rôle des principaux mécanismes participant à l'auto-épuration, en simulant le fonctionnement du système. Il permet également de démontrer, à travers l'étude de ce cas concret, l'importance de l'apport de la modélisation dans l'étude des écosystèmes aquatiques.

Après avoir développé un modèle global du fonctionnement du système "Albenche" basé sur les transferts de carbone organique (dissous et particulaire), le modèle est appliqué pour simuler la dynamique du carbone organique dissous et des microorganismes benthiques.

Un écosystème lotique est caractérisé, essentiellement, par son écoulement longitudinal. L'écriture du modèle a donc débuté par la description de l'écoulement du cours d'eau et des mécanismes de transports associés.

Deux sous-modèles, permettant de décrire l'évolution spatio-temporelle des concentrations en carbone organique dissous dans la veine liquide, ont été élaborés :

- un sous-modèle hydrodynamique constitué par l'équation de conservation de masse du modèle de SAINT-VENANT, l'équation dynamique étant remplacée par une équation empirique ;
- un sous-modèle de transport, constitué par l'équation classique de convection-diffusion appliquée à un écoulement monodimensionnel (unidirectionnel), non uniforme et non stationnaire.

Pour modéliser la biodégradation de la matière organique dissoute par les populations microbiennes, dans notre système, nous nous sommes inspiré des progrès réalisés dans la compréhension des mécanismes d'utilisation des substrats organiques par les microorganismes et des modèles de biofilm mis au point dans le domaine du traitement des eaux. De part sa structure, ce type de modèle présente l'avantage d'englober tous les mécanismes physiques, chimiques et biologiques qui entrent dans les phénomènes de disparition et de dégradation de la matière organique dissoute :

- transfert des substrats à travers l'interface eau-film ;

- diffusion des substrats dans le biofilm ;
- métabolisation des substrats et croissance des microorganismes du biofilm.

La relative complexité du modèle élaboré pose quelques problèmes, notamment, lors de l'identification des nombreux paramètres. Ces problèmes nous ont amené à insister sur l'aspect méthodologique de la modélisation, et en particulier, à utiliser une analyse de sensibilité qui permette une critique précise du modèle en quantifiant l'influence, sur les sorties du modèle, de chaque paramètre, de chaque fonction de forçage et de chaque entrée. Cette analyse de sensibilité est basée sur les méthodes de Monte-Carlo et sur le test statistique de Komolgorov-Smirnov.

Compte tenu de l'état actuel de nos connaissances, on peut considérer les écosystèmes aquatiques comme des systèmes encore "mal définis". La complexité des mécanismes mis en jeu, la difficulté d'en mesurer les effets et la variabilité des caractéristiques de ces systèmes, sont autant de sources d'incertitudes introduites, à différents niveaux, dans les modèles mathématiques. Ces incertitudes entachent les valeurs des sorties du modèle et peuvent remettre en cause la validité de leurs prédictions.

Pour pallier ces inconvénients, nous avons jugé nécessaire d'introduire dans notre modèle une certaine stochastisation qui permette de tenir compte des incertitudes et de la variabilité du système. Cette stochastisation est introduite par l'utilisation de méthodes de Monte-Carlo. Elles permettent d'obtenir des résultats moyens auxquels sont associés un intervalle de confiance.

Malgré les problèmes mentionnés ci-dessus, il nous est apparu intéressant d'utiliser le modèle sous sa forme actuelle en tant qu'outil cognitif. Nous l'avons donc appliqué pour :

- quantifier l'influence du film benthique dans l'élimination de la charge organique ;
- calculer des bilans de carbone organique ;
- tester l'influence de différents facteurs environnementaux (débit, arrêt des rejets polluants).

## MOTS - CLES

Modèle déterministe, Modèle stochastique, Simulation numérique, Analyse de sensibilité, Méthodes de Monte-Carlo, Cours d'eau, Auto-épuration, Biodégradations, Biofilm, Microorganismes, Carbone organique, Hydrodynamique, Convection-Diffusion, Dispersion longitudinale.

En raison de l'accroissement des nuisances d'origines industrielles, agricoles et domestiques, il semble aujourd'hui souhaitable et nécessaire d'avoir une connaissance globale des écosystèmes aquatiques, afin de préserver la qualité des eaux et les ressources qu'ils produisent.

Les études de ces écosystèmes aquatiques sont donc importantes pour comprendre les interactions qui lient le biotope et les biocoenoses au sein de ces systèmes. Ces études sont aussi fondamentales pour évaluer l'impact des activités humaines sur l'équilibre de ces écosystèmes, pour une appréhension correcte de la qualité des eaux et pour définir une meilleure gestion du milieu aquatique et plus généralement de notre environnement.

Les phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui se produisent au sein d'un écosystème aquatique sont d'une grande complexité. L'accumulation passive de données collectées in situ et les méthodes d'analyse de données classiques sont aujourd'hui insuffisantes. Insuffisantes non seulement pour appréhender clairement le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, mais aussi pour tester l'effet de diverses politiques d'aménagement de façon à assurer une meilleure gestion de ces systèmes.

Aussi, depuis une vingtaine d'années, l'écologie aquatique est abordée dans l'optique de l'analyse de systèmes où l'écosystème est considéré comme un ensemble d'éléments en interactions plus ou moins fortes et complexes.

L'analyse de systèmes apporte deux éléments utiles à l'étude des écosystèmes (MEYER, 1980 ; AGUILAR-MARTIN, 1982) :

- sa systématique ; elle repose sur la notion de système et sur l'analyse des phénomènes, non pas vis-à-vis de leur essence, mais de leurs échanges d'information ; elle



s'intéresse aux influences réciproques, aux interconnexions dans la mesure où elles modifient le fonctionnement du système ;

- une méthodologie, des outils d'analyse, de mesure et d'évaluation ; la philosophie systémique assemble ces outils méthodologiques tout en poursuivant l'étude des relations qui constituent le système et aboutit à des modèles de simulation.

Les écosystèmes aquatiques présentent un certain nombre de caractéristiques qui rendent leur étude quantitative, mais aussi qualitative difficile par de simples modèles discursifs. L'étude des écosystèmes aquatiques dans l'optique de l'analyse de systèmes, le besoin d'outils d'aide à la compréhension permettant une synthèse fonctionnelle des multiples connaissances ponctuelles acquises dans divers domaines de l'écologie, de même que la nécessité de disposer, pour des études d'impacts d'aménagement, d'un outil au moins grossièrement prévisionnel des effets écologiques à attendre sont autant de raisons qui ont conduit à la réalisation et à l'utilisation de plus en plus fréquentes de modèles mathématiques. Le grand nombre des ouvrages publiés sur ce sujet est là pour en témoigner : RUSSEL (1975), PATTEN (1975), CANALE (1976), HALL et DAY (1977), INNIS et O'NEIL (1979), JORGENSEN (1979), MATIS et al. (1979), RINALDI et al. (1979), SCAVIA et ROBERTSON (1979), BIWAS (1981), DUBOIS (1981), MITSCH et al. (1981), BECK et Van STRATEN (1983), CHAPRA et RECKHOW (1983), JORGENSEN (1983), JORGENSEN et MITSCH (1983), LAUENROTH et al. (1983), ORLOB (1983), WHITTONGTON et GUARISO (1983), HENDERSON-SELLERS (1984), BECK (1985), STRASKRABA et GNAUCK (1985), JORGENSEN (1986).

On peut définir ces modèles comme des quasi analogues mathématiques du comportement des systèmes réels. En synthétisant et en intégrant, à l'aide de différentes relations mathématiques, les connaissances acquises sur un écosystème, leur construction permet de structurer les concepts sous une forme non ambiguë, une forme mathématique (OVERTON, 1977 ; SHOEMAKER, 1977 ; MEYER et al., 1979 ; GENTIL, 1982 ; BECK, 1983 a).

La simulation numérique de ces modèles, c'est à dire la réalisation pratique de ces modèles sous forme informatique, donne la possibilité de calculer

l'évolution spatiale et/ou temporelle d'un certain nombre de variables caractéristiques de l'écosystème étudié. Ces simulations apportent une vision analytique et mécaniste de ce système. Elles permettent notamment d'obtenir des images dynamiques, de tester différentes hypothèses sur sa structure et son fonctionnement, ainsi que sur la cohérence du savoir acquis, par l'introduction simultanée de différentes hypothèses dans le modèle (O'NEIL et al., 1979 b ; Mac INTIRE, 1983). Ces modèles mathématiques peuvent également permettre d'obtenir des informations sur des variables difficilement accessibles par la mesure (flux d'énergie ou de matière, par exemple).

L'utilisation de modèles déterministes ou stochastiques est probablement le meilleur moyen de déterminer la sensibilité des écosystèmes aquatiques aux composés et processus qui les constituent, et à d'éventuelles perturbations. Ainsi, ils peuvent suggérer des propriétés sous-jacentes du système qu'il était théoriquement impossible de déterminer directement par des observations et des analyses plus classiques, sauf à des coûts disproportionnés par rapport aux résultats.

Les études entreprises depuis 1982 sur l'Albenche, pour appréhender le fonctionnement des mécanismes d'auto-épuration, nous ont semblé fournir une bonne opportunité pour mettre en oeuvre des techniques de l'analyse de systèmes. Nous avons donc utilisé la base de données construite lors des campagnes de mesures sur l'Albenche pour élaborer et mettre en oeuvre un modèle mathématique du système écologique "Albenche". Ce modèle doit permettre l'étude qualitative et quantitative d'un certain nombre de processus participant à l'auto-épuration. Il nous servira également pour essayer de montrer le rôle et l'importance d'un tel outil pour l'étude de la dynamique des écosystèmes aquatiques.

Le mémoire présenté ici comprend trois grandes parties. Dans la première, nous présentons rapidement le système écologique étudié, l'Albenche, les techniques de mesures employées et certains résultats obtenus depuis 1981.

La seconde partie, après certaines remarques effectuées à propos de la modélisation d'un écosystème aquatique, est consacrée à l'analyse du système

"Albenche", puis à la construction d'un modèle global de son fonctionnement.

Il est curieux de constater qu'actuellement, dans la plupart des modèles écologiques d'écosystèmes aquatiques, le compartiment microbien et les processus de décomposition de la matière organique ne sont que très rarement pris en compte, malgré leur importance dans le fonctionnement de ces systèmes. Dans la revue bibliographique de CHAHUNEAU et al. (1980), où les principaux modèles de simulation d'écosystèmes lacustres sont étudiés, il apparaît que seuls deux modèles prennent en compte les microorganismes et les processus détritiques.

Dans cette deuxième partie, nous insistons donc particulièrement sur la modélisation des processus de dégradation de la matière organique par les microorganismes, en nous référant aux travaux effectués par les chercheurs travaillant sur le traitement biologique des eaux usées.

Dans la troisième partie, nous appliquons le modèle pour simuler la dynamique du carbone organique dissous et des microorganismes benthiques dans l'Albenche, en insistant sur l'aspect méthodologique de l'élaboration, de la vérification et de la validation du modèle. Nous terminons cette troisième partie en essayant de montrer les apports de la modélisation dans une telle étude, ses potentialités, mais aussi en rappelant les limites des modèles et les dangers de leur emploi inconsidéré.

## CONCLUSION

On assiste à une utilisation de plus en plus importante de modèles mathématiques pour appréhender le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. La simulation numérique de ces modèles permet d'obtenir des images dynamiques du système à partir d'hypothèses de fonctionnement, ce que jusque là aucune stratégie d'analyse de données ne rendait possible. Il semble aujourd'hui, tout à fait primordial, de faire appel à ces techniques si l'on veut pouvoir aborder l'aspect dynamique de l'Ecologie.

En nous appuyant sur une synthèse des données et des connaissances acquises depuis 1981 sur l'Albenche, petit cours d'eau pollué par une forte charge organique, nous avons construit un modèle mathématique de ce système écologique. Le but de ce modèle est d'élaborer un outil cognitif qui intègre toute l'information disponible, dans l'état actuel de nos connaissances, sur le fonctionnement du système "Albenche", afin de déterminer et d'interpréter le rôle des principaux mécanismes participant à l'auto-épuration dans les cours d'eau.

Compte tenu des problèmes posés par les données expérimentales dont nous disposons, nous avons restreint l'application du modèle global élaboré et simulé uniquement la dynamique du carbone organique dissous et des microorganismes benthiques. Ces simulations ont permis de vérifier la cohérence des hypothèses introduites dans le modèle et de mettre en évidence les mécanismes prépondérants de la dynamique du système :

- mécanismes hydrophysiques et donc débit;
- température ;
- apports diffus, concentrations des matières organiques et quantité des microorganismes présents à l'entrée du système ;
- rôle prépondérant du compartiment benthique

dans l'élimination de la charge organique dissoute.

Ce modèle nous a également permis d'établir des bilans des différents flux carbonés dans l'Albenche. De ces bilans, il ressort que l'épuration de la charge organique dissoute, dans ce type de cours d'eau, procéderait plutôt par formation et entretien de biomasse que par élimination réelle de la charge polluante, par la respiration.

De nombreuses lacunes et de nombreux problèmes restent en suspens. Mais les informations ainsi obtenues devraient permettre des rétroactions sur l'établissement de plans de recherche pour continuer à progresser dans la compréhension du fonctionnement du système "Albenche", et plus généralement dans la compréhension des mécanismes régissant les phénomènes d'auto-épuration dans les cours d'eau.

Nous avons essayé de montrer tout au long de ce travail l'apport de la modélisation dans l'étude des écosystèmes aquatiques au travers de l'étude d'un cas concret. Dans les cas les plus favorables, le modèle peut avoir l'ambition de restituer les états d'équilibre du système, de suggérer des propriétés sous-jacentes du système et de prévoir son évolution dans le domaine des situations connues mais aussi hors de ce domaine. Lorsque les connaissances acquises et/ou les mesures disponibles ne sont pas très satisfaisantes, comme dans notre cas, les simulations du modèle permettent de mettre en évidence les processus dont la méconnaissance affecte le plus la sensibilité du système. Lorsque l'état des connaissances est insuffisant, une tentative de modélisation peut permettre de réaliser une synthèse de ces connaissances, souvent pluridisciplinaires, et de tester ainsi des idées, notamment en ce qui concerne les processus fondamentaux mis en jeu.

Nous avons également essayé de montrer le triple aspect des problèmes liés à la modélisation d'un écosystème aquatique :

- la mise en équation des phénomènes rencontrés ; l'importance de la compréhension des processus fondamentaux tant du point de vue biologique que biochimique que physique ;

- les problèmes méthodologiques liés à l'élaboration, la vérification, l'identification et la validation du modèle ;
- les difficultés de l'acquisition des données sur le terrain, indispensable à toute modélisation.

Compte tenu de l'état actuel de nos connaissances, on peut encore souvent considérer que les écosystèmes aquatiques sont des systèmes "mal définis". La complexité des mécanismes en jeu, la difficulté de mesure des effets de ces mécanismes et la grande variabilité des caractéristiques de ces systèmes sont autant de sources d'incertitudes introduites dans les modèles mathématiques :

- au niveau des entrées (conditions initiales et aux limites) ;
- au niveau des fonctions de forçage ;
- au niveau des paramètres ;
- et même, dans une certaine mesure, au niveau de la structure du modèle.

Ces incertitudes entachent les valeurs des sorties des modèles et peuvent remettre en question la validité de leurs prédictions. Pour pallier ces inconvénients, il semble aujourd'hui nécessaire d'introduire dans ces modèles une certaine stochastisation (FEDRA, 1983 ; GARDNER et O'NEIL, 1983 ; HALFON, 1983 ; YOUNG, 1983), qui donne la possibilité de tenir compte des incertitudes liées aux systèmes, soit par l'intermédiaire d'équations stochastiques, soit lors des simulations du modèle.

Nous avons vu que cette stochastisation peut être introduite de façon satisfaisante par les méthodes de Monte-Carlo. Cette stochastisation permet d'obtenir, non plus un résultat unique, comme dans le cas des simulations déterministes, mais des résultats moyens auxquels peut être associé un intervalle de confiance.

Dans les modèles mathématiques d'écosystèmes aquatiques, il faut déterminer le degré de complexité à prendre en compte en fonction des objectifs du modèle, de la précision avec laquelle les principaux mécanismes de fonctionnement du système sont connus, et des

mesures disponibles et/ou accessibles.

La complexité de ces modèles dépend en effet de l'importance des connaissances acquises sur le système. Si ces connaissances sont faibles, il n'est pas raisonnable de formuler un modèle complexe. Inversement, si le degré de compréhension du système est élevé, un modèle conceptuellement trop simplifié ne permet pas de considérer le savoir acquis, et est insuffisant pour tester de nouvelles hypothèses réalistes.

Ce dernier cas s'applique à la modélisation du rôle de la matière organique et des processus détritiques. Alors que leur rôle est prépondérant dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, ils sont modélisés, le plus souvent, à l'aide de relations simplistes et d'hypothèses inadéquates par rapport à la compréhension actuelle de ces phénomènes. Même si ces modèles permettent parfois de décrire de façon acceptable les systèmes étudiés, ils ne peuvent être utilisés pour tester différentes hypothèses réalistes sur l'influence réelle de la matière organique et des populations microbiennes dans le métabolisme global de ces écosystèmes. Les modèles mathématiques ne sont, en effet, des images de la réalité que dans le cadre étroit des concepts et des hypothèses qui ont permis de les construire. Hors de ce cadre étroit, il est illusoire de vouloir les utiliser.

Pour que les modèles mathématiques d'écosystèmes aquatiques qui sont encore, pour la plupart, essentiellement descriptifs, puissent permettre d'aborder les aspects d'aide à la connaissance et les aspects prévisionnels, il faut que ces modèles incorporent dans leur formulation le degré de compréhension acquis sur le système étudié. Le réalisme écologique de la formulation mathématique de ces modèles ne peut cependant pas être développé sans contrainte, sachant qu'au-delà d'un certain nombre de degrés de liberté un modèle devient incontrôlable et difficilement identifiable. Le choix entre un modèle simpliste, donc irréaliste, et un modèle complexe, plus vraisemblable, mais pas, ou très difficilement identifiable et validable, constitue le principal dilemme auquel est confronté tout modélisateur.

Compte tenu de la complexité des phénomènes et du caractère encore très incomplet de notre connaissance des écosystèmes aquatiques, leur modélisation doit être entreprise avec beaucoup de modestie. Rien n'empêche, en effet, de bâtir un modèle sophistiqué, fondé sur un ensemble de choix



arbitraires, qui permette d'obtenir une bonne concordance entre les résultats des simulations et les observations, par exemple, par un choix approprié des valeurs de certains paramètres. Le réalisme abusif de tels modèles peut venir masquer l'étendue des incertitudes et détourner l'effort des recherches aux dépens de l'observation directe des phénomènes. Toute modélisation doit donc être accompagnée d'un effort important dans la collecte de données.

Dans le cas de modèles complexes, alors que l'acquisition de données est actuellement l'une des étapes limitantes, il faut absolument qu'il y ait des interactions permanentes entre la modélisation et l'expérimentation. C'est seulement ainsi que l'outil-modèle pourra faire progresser les connaissances sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques.