

Démarche de modélisation d'un écosystème lacustre : application au Lac de Pareloup

An approach to modeling of a lake ecosystem: application to Pareloup lake

Marie-José Salençon(*) et Jean-Marc Thébault(**)

(*) *Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches. Département Environnement. 6 Quai Watier, F-78401 Chatou Cedex, France.*

(**) *Laboratoire d'Hydrobiologie, Université Paul Sabatier. 118 Route de Narbonne, F-31062 Toulouse Cedex, France.*

Résumé. – L'effort de recherche mené durant cinq ans sur le lac de Pareloup, réservoir hydroélectrique d'Electricité de France, a permis une meilleure compréhension du fonctionnement de cet écosystème, tant sur le plan biologique que sur le plan hydrodynamique. L'approche pluridisciplinaire suivie pour cette étude a été le développement de modèles de simulation de l'écosystème, associés à un suivi expérimental intense, aussi bien *in situ* qu'en laboratoire. L'objectif de ce travail a été non seulement d'améliorer la connaissance de cet écosystème, mais aussi de fournir un outil de simulation de scénarios.

Nous présentons ici la démarche de cette étude pluridisciplinaire, qui associe étroitement expérimentation et modélisation, ainsi qu'un certain nombre d'enseignements quant aux limites de cette méthode de travail, et certaines recommandations importantes pour les équipes qui souhaiteraient suivre cette démarche.

Mots-clés. – modélisation thermique, modélisation biologique, suivi expérimental, Pareloup.

Abstract. – The five-year research project conducted at Pareloup lake, an Electricité de France hydroelectric reservoir, improved understanding of the dynamics of the ecosystem, in both biological and hydrodynamic terms. The multi-disciplinary approach taken for the study was to develop models to simulate the ecosystem and to carry out intensive experimental monitoring, both in the field and in the laboratory. The ultimate goal was not only to broaden our knowledge of this ecosystem, but also to provide a tool to aid in water resource management.

This paper presents the approach taken in the project, closely associating experimentation and modeling, and discusses a certain number of lessons to be learned with respect to the limits to this research method, as well as some important recommendations for teams wishing to pursue the same kind of research.

Key-words. – Thermal modeling, biological modeling, experimental monitoring, Pareloup.

I INTRODUCTION

La ressource en eau que constitue un lac naturel ou artificiel doit satisfaire de multiples usages, parfois contradictoires : production d'électricité, soutien d'étiage, écrêtement de crues, alimentation en eau potable, activités touristiques, pêche...

Gérer cette ressource nécessite de préserver l'équilibre de l'écosystème, ce qui demande une bonne connaissance de son fonctionnement. Pour cela des études pluridisciplinaires, associant expérimentation et modélisation, sont nécessaires.

Ces études pluridisciplinaires réunissent trois axes de recherche : campagnes de mesures *in situ*, travaux de laboratoire et modélisation. L'objectif final est d'améliorer la connaissance d'un écosystème de réservoir et de proposer un outil permettant d'intégrer des critères de qualité d'eau dans la gestion des réservoirs.

Nous nous limiterons à exposer ici la démarche suivie lors de l'étude du lac de Pareloup, les résultats obtenus étant présentés de façon plus complète par Salençon (1994) et Salençon et Thébault (1994). L'objectif de ce travail a été l'élaboration d'un modèle de simulation de la qualité physique, chimique et biologique de l'eau, permettant de représenter l'évolution de l'écosystème en fonction de la gestion hydraulique et des conditions météorologiques.

L'expérience acquise au cours de cette étude nous a permis de tirer un certain nombre d'enseignements

quant aux limites de cette méthode de travail, ainsi que de dégager certaines recommandations importantes pour les équipes qui souhaiteraient suivre cette démarche.

Une telle démarche a été, depuis, appliquée pour l'étude d'autres sites qui ont ainsi bénéficié de l'expérience acquise, même si chaque lac constitue un écosystème particulier.

II OBJECTIFS ET MÉTHODE

Les phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui se produisent au sein des écosystèmes lacustres sont complexes. Une simple analyse des données de terrain disponibles, si elle permet d'appréhender le fonctionnement global du système dans son environnement naturel, ne permet pas de prévoir l'évolution de cet écosystème sous diverses contraintes, ni d'optimiser la gestion d'un aménagement tout en veillant à respecter des critères de qualité d'eau ou de proposer des moyens pour lutter contre des nuisances, en particulier l'eutrophisation.

Une méthode d'investigation différente consiste à aborder ces problèmes d'écologie aquatique par le biais de la théorie des systèmes : un écosystème est considéré comme un ensemble fini d'éléments et d'interactions plus ou moins fortes et complexes ; un certain nombre de variables (dites d'état) permettant de décrire l'évolution du système dans le temps et dans l'espace est sélection-

né en fonction des objectifs de l'étude et de la finesse de description souhaitée.

Un système mathématique (ou modèle) simulant plus ou moins schématiquement le système réel est alors construit : il est formé d'un ensemble d'équations représentant chacune l'évolution et la conservation d'une variable d'état. Selon le degré de complexité du système mathématique mis au point, chaque équation contient un nombre plus ou moins important de coefficients. Lorsque l'on dispose d'un ensemble de mesures suffisamment cohérent, la valeur de ces différents paramètres est réglée (calage du modèle) par comparaison des résultats du modèle aux données de terrain. Le modèle obtenu reconstitue alors plus ou moins finement l'évolution des différentes variables d'état dans les conditions d'une période réelle.

Il apparaît particulièrement important d'associer l'élaboration d'un tel modèle à un programme expérimental qui permette, d'une part, d'acquérir des chronologies de mesures adaptées aux besoins de la modélisation (calage), d'autre part, de comprendre un certain nombre de mécanismes fondamentaux. En effet, le modèle permet de tester le rôle de ces mécanismes sur la réponse de l'écosystème en confrontant calculs et mesures, et ainsi d'en apprécier leur caractère fondamental.

Dans cette phase de compréhension, où l'on essaye d'extraire la structure du système, une des difficultés réside dans le fait que l'écosystème

est soumis à des contraintes extérieures naturellement variables comme les conditions météorologiques et hydrologiques. Il est alors souhaitable de disposer, sur l'ensemble des variables simulées, de chronologies de mesures s'étendant sur plusieurs cycles annuels.

Lorsque la réponse du modèle n'est pas satisfaisante, il faut identifier les processus insuffisamment décrits, ce qui entraîne généralement la réalisation d'expériences de terrain ou de laboratoire afin d'en améliorer la connaissance.

Modélisation et expérimentation amènent à deux représentations différentes d'une même réalité et sont donc, par essence, complémentaires. C'est en associant ces deux approches que l'écosystème est le mieux appréhendé.

Un modèle ainsi mis au point peut, par la suite, prendre en compte une perturbation et montrer les conséquences de celle-ci par rapport à l'écosystème de « référence ». Cette perturbation peut être :

- une modification des apports du bassin versant (rejets thermiques, pollution organique ou minérale accrue, installation de station d'épuration, détournement d'effluents...),

- une modification des ouvrages (équipement de turbines, stations de pompage...),

- une modification de la gestion de la ressource en eau (différents types de gestion hydraulique, remplissage d'un réservoir, soutien d'étiage, écrêtement de crues...).

Le modèle permet alors :

— de prévoir l'évolution de l'écosystème en réponse à ces modifications,

— d'aider au dimensionnement des ouvrages (niveaux des prises d'eau, tour de prise...),

— d'optimiser la gestion de l'aménagement en fonction de la règle adoptée.

C'est donc un outil approprié à l'estimation prévisionnelle des conséquences d'une gestion donnée ou d'un futur aménagement, qui peut être utilisé comme outil d'aide à la gestion de l'eau.

En résumé, une telle démarche comporte 3 étapes :

— suivi expérimental : recueil de données, expérimentations,

— construction d'un modèle thermique et biologique,

— simulations de scénarios.

III LA DÉMARCHE DE MODÉLISATION

III.1 Suivi expérimental

Le suivi expérimental est destiné au recueil des données chronologiques nécessaires à la modélisation (forçage et validation). Il est important d'acquérir un jeu cohérent de données en suivant, pendant au minimum un cycle annuel, l'évolution des principales variables. Le suivi a lieu :

— sur une ou plusieurs verticales selon que l'on souhaite étudier l'hété-

rogénéité spatiale, et en plusieurs profondeurs différentes (au minimum 3 dans l'épilimnion, 3 dans l'hypolimnion).

— sur les affluents importants qui alimentent la retenue.

Les variables à mesurer lors du suivi sont :

- transparence (disque de Secchi et/ou coefficient d'extinction)
- température
- oxygène dissous
- NH_4
- NO_3
- PO_4
- P_{total}
- SiO_2
- MES (matières en suspension)
- Chlorophylle a.

Ce suivi a lieu à une fréquence **hebdomadaire** de février à novembre inclus. La **transparence de l'eau** devra être mesurée **tout au long de l'année**.

Il faut y rajouter des comptages et déterminations des espèces phytoplanctoniques et zooplanctoniques. Ces déterminations permettent généralement de définir quelles sont les relations de prédation ou de compétition entre les différents groupes.

Les prélèvements phytoplanctoniques seront effectués aux profondeurs définies pour la physico-chimie. Le zooplancton, sera quant à lui, prélevé sur un échantillon moyen résultant de plusieurs traits verticaux.

Si la retenue n'est pas à proximité d'une station météorologique du réseau national, une station météorolo-

gique implantée sur le site fournit la température de l'air, le rayonnement solaire et la vitesse du vent (de préférence à 10 m) en valeurs trihoraires et, si possible, horaires, ainsi que la pluviométrie en moyenne journalière.

De plus, il est nécessaire de disposer en continu (toutes les 3 heures) de mesures thermiques sur les affluents en amont de la retenue, ainsi que d'un profil thermique dans la retenue sur une dizaine de profondeurs, réparties de façon à cerner la stratification thermique.

Les mesures météorologiques et thermiques doivent être acquises de janvier à décembre inclus.

III.2 Le choix du type de modèle

La nécessité de gérer la qualité de l'eau et parfois l'écosystème des lacs et réservoirs a conduit, il y a 20 à 30 ans, au développement de modèles numériques dont l'objectif est de bien représenter l'évolution annuelle de la stratification thermique et des principales composantes de l'écosystème.

C'est le choix d'une représentation plus ou moins complexe du mouvement des masses d'eau qui déterminera le choix du type de modèle. Cependant, d'une façon générale, on peut dire que les modèles utilisés pour représenter la circulation des masses d'eau à grande échelle dans un milieu naturel traitent de façon différente l'aspect horizontal et l'aspect vertical. D'un point de vue mathématique les équations dynamiques tridimensionnelles seront traitées d'une

façon quasi-horizontale, ce qui permet de séparer le modèle global en deux sous-modèles, l'un horizontal, l'autre vertical. Ceci est le résultat d'une approximation hydrostatique qui est elle-même justifiée par la distorsion d'échelle dans les milieux naturels entre la profondeur (de l'ordre de 10 à 100 mètres) et la dimension horizontale (de l'ordre de 1 000 à 10 000 mètres) (Simons, 1980). Nous citons ici brièvement les trois types de modèles actuellement utilisés pour l'étude des écosystèmes de lac.

III.2.1 Modèle 0D

C'est un modèle bicouche représentant la stratification thermique verticale où l'évolution des 2 couches n'est pas calculée mais « forcée » dans le modèle à partir de mesures thermiques ou des résultats d'un modèle thermique unidimensionnel. Son objectif est de déterminer les processus biologiques prédominants. (Thébaud et Salençon, 1993)

Ce type d'outil nécessite une importante base de données.

III.2.2 Modèle 1D

C'est un modèle qui s'attache plus particulièrement à une discrétisation fine de la verticale. Son objectif est de coupler finement l'hydrodynamique verticale (stratification de la masse d'eau) et les variables biologiques, afin d'obtenir un outil de gestion et un outil prédictif. La partie biologique de ce modèle peut être simple ou très détaillée, selon l'étude, mais il est important que les échelles de temps des

phénomènes décrits par les deux sous-modèles physique et biologique soient du même ordre afin d'assurer la cohérence de l'ensemble. (Salençon et Thébault, 1995)

Dans le cas d'une partie biologique complexe, le développement d'un tel modèle passe par l'étape préalable d'un modèle bicouche.

C'est ce type de modèle qui est le plus couramment utilisé car il constitue actuellement un outil éprouvé, suffisamment fin pour bien reproduire les phénomènes prépondérants mais également suffisamment simple pour permettre de simuler l'évolution de l'écosystème pendant plusieurs cycles annuels (jusqu'à une dizaine) avec une échelle de temps journalière pour les processus biologiques. Son autre avantage est de pouvoir être utilisé comme outil d'aide à la gestion de l'eau sans atteindre des coûts d'exploitation prohibitifs. De plus, il reste compatible avec un suivi expérimental raisonnable.

III.2.3 Modèle 2D

Ce modèle est destiné à représenter des hétérogénéités spatiales importantes (en $x-z$ ou en $x-y$). La partie hydrodynamique et thermique est assez complexe car il s'agit d'un modèle de circulation. Les échelles de temps des phénomènes représentés sont plus fines et les méthodes numériques complexes, entraînant des coûts de calcul importants. Ce type de modèle donne d'excellents résultats pour la structure thermique.

Le couplage avec un modèle biologique fin, dont le nombre de variables d'état est important, pose des problèmes de mise en œuvre. Tout d'abord, la connaissance des mécanismes biologiques fondamentaux n'est pas toujours suffisante, aux échelles de temps et d'espace des phénomènes physiques représentés. Certains processus biologiques rapides sont bien connus à l'échelle horaire (et même inférieure), comme les échanges chimiques, les phénomènes d'assimilation des algues ou la photosynthèse. Cependant, on ne sait pas bien représenter tous les processus biologiques à une échelle aussi fine, ce qui est le cas, par exemple, de la dynamique de certaines algues ou du zooplancton. Un couplage avec un modèle 2-D, dans l'état actuel des connaissances, pourrait aboutir à des résultats erronés s'il n'était pas réalisé avec certaines précautions. En effet, les processus biologiques les moins bien connus sont représentés dans les modèles d'écosystème avec une échelle de temps au mieux journalière et leur formulation « contient » implicitement les phénomènes rapides et locaux qu'il serait nécessaire d'exhiber pour réaliser un couplage correct. De plus, aux coûts de calculs élevés pour des durées de simulation saisonnières s'ajoute la difficulté de disposer des champs hétérogènes des variables de forçage (champs de vent, par exemple) ainsi que celle de caler et valider les résultats sur un réseau de mesures adéquat.

De telles difficultés sont évidemment accrues dans le cas d'un mo-

dèle tridimensionnel que l'on n'envisage pas d'utiliser, à moyen terme, pour la simulation des écosystèmes lacustres. Pour l'instant, les modèles 2-D ou 3-D sont utiles pour fournir des informations sur les structures des circulations internes au sein d'une masse d'eau. S'il est prématuré d'envisager leur application dans le cadre d'un modèle de simulation d'écosystème, au même titre que ce qui est réalisé avec le modèle 1-D, on peut cependant examiner la possibilité que le modèle 2-D puisse être couplé à un modèle biologique dans des cas bien particuliers à examiner avec soin avec des biologistes.

III.3 La conception du modèle

La conception du modèle est basée sur l'observation et l'analyse du système réel. Il convient de déterminer les constituants importants de l'écosystème et leurs interactions. Il est également important que les échelles de description des variables et des processus ainsi que les échelles de temps des phénomènes modélisés soient cohérentes entre elles.

III.3.1 Le choix des variables

Etant donné le souci de simplification de la modélisation, il est souvent nécessaire de regrouper des entités aux caractéristiques proches en une seule variable; par exemple les diverses espèces phytoplanctoniques recensées peuvent être regroupées en une seule variable (on peut choisir la chlorophylle *a* pour exprimer cet ensemble),

en unités fonctionnelles ou systématiques (diatomées, cyanophycées...), ou bien par classes de taille.

Ce choix fondamental demande la plus grande réflexion.

III.3.2 Le choix des fonctions

Les mécanismes reliant les différentes variables entre elles sont représentés par une ou plusieurs fonctions empiriques, déterminées à partir de résultats expérimentaux. Il s'agit en quelque sorte de «boîtes noires» qui représentent un mécanisme que l'on ne souhaite pas détailler davantage, aux échelles de temps et d'espace choisies.

Le critère de choix de ces fonctions sera un compromis entre :

- la meilleure adéquation possible avec le processus observé,
- des coefficients pouvant être mesurés expérimentalement, ce qui permet de borner l'intervalle à l'intérieur duquel la valeur du coefficient sera choisie,
- le moindre nombre de coefficients.

La valeur des coefficients des fonctions représentant les processus mal connus (absence de bibliographie et/ou difficultés pour expérimenter), devra être estimée numériquement lors du calage du modèle.

III.3.3 Le calage

Le calage consiste à trouver, pour l'ensemble des coefficients, une combinaison de valeurs qui permette

pour chaque variable, une simulation fidèle aux observations.

Nous rappelons qu'en matière de modélisation biologique, il ne faut pas espérer une exacte superposition des calculs et des mesures, comme c'est le cas en modélisation des processus physiques. En effet, les mesures donnent une image instantanée de l'écosystème, sujette à de très fortes fluctuations spatio-temporelles alors que le modèle simule l'évolution de variables moyennes. Il est donc normal, étant donné la complexité du système biologique, de constater certains décalages. C'est à la représentation du comportement du système et des ordres de grandeur des événements importants qu'il faut s'attacher plutôt que de minimiser absolument l'écart entre valeurs simulées et mesurées, d'autant qu'on ne connaît généralement pas, pour les données recueillies *in situ*, la variabilité de chaque mesure.

III.3.3.1 Les coefficients

Les coefficients introduits dans le modèle peuvent avoir trois types d'estimation :

— Les coefficients dont la mesure a été effectuée pour le modèle, soit sur le site, soit lors d'une expérimentation spécifique. Il s'agit là, bien entendu, du cas idéal. Dans le cas de regroupement d'espèces au sein d'une même variable, la valeur choisie sera une moyenne pondérée des valeurs propres à chaque espèce.

— Les coefficients qui sont estimés à partir de données provenant de sources différentes de celles du sys-

tème de référence (littérature, mesures sur d'autres sites, espèces systématiquement ou écologiquement proches). L'ordre de grandeur de ces valeurs est généralement satisfaisant.

— Les coefficients qui ne sont pas mesurables ou n'ont pas de signification bien connues et qui traduisent notre méconnaissance actuelle de certains mécanismes (exposant des fonctions exponentielles, facteurs de courbure, etc...). Ces coefficients devront être ajustés. Bien que parfois inévitable, leur emploi devra être réduit par un choix judicieux des fonctions qui composent le modèle.

III.3.3.2 Les méthodes d'ajustement

Durant l'élaboration du modèle, deux phases dans l'ajustement des coefficients vont se présenter :

— d'une part, le calage des fonctions représentant les processus élémentaires qui devront être identifiées une à une sur des données expérimentales : par exemple, la croissance des algues en fonction de la lumière, l'ingestion de particules par le zooplancton en fonction de la température, etc.

— d'autre part, l'ajustement de l'ensemble des paramètres du modèle permettant une simulation satisfaisante de chaque variable d'état.

Dans le premier cas, si le nombre de données expérimentales est suffisant, ces fonctions comportant deux ou trois coefficients, peuvent être ajustées par des méthodes de calibration mathématique selon le critère des moindres carrés, par exemple. Lors-

que les méthodes statistiques telles que la régression linéaire ne sont pas utilisables (fonction non linéarisable), les méthodes de gradient sont bien appropriées (Box *et al.*, 1964). Par rapport aux méthodes géométriques (méthodes d'exploration directe) telles que le simplex, elles offrent l'avantage de fournir une estimation de l'erreur sur la valeur des coefficients ainsi que la matrice de corrélation de ceux-ci. En effet, il est important de vérifier que les coefficients sont indépendants. Si deux d'entre eux sont corrélés, il faut soit en fixer un à une valeur constante et renouveler l'ajustement sur l'ensemble des autres coefficients, soit changer de fonction. L'erreur sur l'estimation de chaque coefficient et l'erreur totale (somme des carrés des écarts, par exemple) dépendent de l'adéquation du modèle aux mesures et de la variabilité attachée à celles-ci.

Dans le cas du calage de l'ensemble des coefficients du modèle (une trentaine, voire plus), les méthodes d'ajustement automatiques ne sont pas adaptées. Le nombre élevé de variables et la complexité du réseau de relations entre celles-ci, ne permettent pas de trouver une solution convenable à la fonction critère. L'expérience et le jugement du modélisateur restent la meilleure méthode. Il est plus important, en effet, de bien simuler un comportement (démarrage d'une poussée d'algues, succession d'espèces, cycles) et de respecter les ordres de grandeur, que de minimiser absolument l'écart entre valeurs simulées et mesurées, d'autant qu'on ne

connaît généralement pas, pour les données recueillies *in situ*, la variabilité de chaque mesure.

Si le modèle est bien conçu, le calage sera aisé. Dans le cas contraire, il faut, en étudiant le comportement du modèle grâce aux simulations, déterminer quels sont les éléments manquants ou à modifier.

Cela peut entraîner une révision du choix des variables, de nouvelles hypothèses de fonctionnement ou l'ajout de plusieurs processus dont on avait sous-estimé l'importance lors de la première mise en œuvre. Ces bouleversements nécessitent des informations complémentaires : recherches bibliographiques, mesures *in situ*, expérimentation au laboratoire, calage de nouvelles fonctions.

III.3.4 La validation

La validation du modèle consiste à confronter le modèle à de nouvelles séries de mesures :

- soit sur le même site, mais lors de cycles annuels différents de ceux qui ont servi au calage,
- soit sur un site différent mais dont le système a un fonctionnement comparable.

La validation permet de tester si le comportement du modèle est représentatif du comportement réel et par conséquent de juger de la valeur prédictive du modèle. Il faut cependant garder à l'esprit que les modèles actuels d'écosystèmes aquatiques ne peuvent pas prendre en compte d'éventuels bouleversements de structure modifiant les relations entre

les variables du système. En effet, la structure retenue dans le modèle correspond aux phénomènes dominants identifiés lors du suivi expérimental. A la suite d'une perturbation majeure (vidange d'un réservoir, aménagement de nouveaux ouvrages), certains phénomènes, initialement pas représentés parce que participant peu (ou pas du tout) à la dynamique du système, peuvent devenir dominants. Par exemple, comme le remarque R.A. Vollenweider (OCDE, 1982), une modification de charge nutritive des eaux influe généralement sur la composition spécifique du phytoplancton (et donc d'une grande partie de la chaîne trophique) modifiant radicalement le fonctionnement de l'écosystème : « l'intensité de la réponse trophique peut alors différer du comportement prévu, selon les espèces d'algues en présence et en particulier à court terme, jusqu'à ce que la masse d'eau atteigne un nouvel état d'équilibre ». **Cette situation n'est actuellement prévisible par aucun modèle.**

Le coût élevé et la difficulté de mise en œuvre de bases de données homogènes et complètes pendant plusieurs années font de cette phase de validation une étape trop souvent négligée en écologie.

III.4 Les données à fournir

Les données à fournir pour l'étude sont les suivantes :

— données telles que définies dans le suivi expérimental,

— topographie de la retenue : courbes de capacité, courbes isobathes,

— données météorologiques de la station du réseau de la Météorologie Nationale la plus proche, pour les paramètres trihoraires (si possible, horaires) suivants :

- pression atmosphérique,
- température de l'air
- humidité relative,
- vitesse du vent à 10 m,
- nébulosité en octa,
- pluviométrie (moyenne journalière).

— débits des affluents, ainsi que tous les débits à travers l'aménagement de la retenue, en moyenne journalière.

III.5 Les simulations

Une fois le modèle calé et validé, il est alors possible de l'utiliser comme outil de simulation de scénarios.

Cette exploitation peut, par exemple, servir à tester différents scénarios de gestion hydraulique ou de réduction des apports, ou à positionner le niveau d'une prise d'eau pour optimiser la qualité de l'eau dans la retenue, et/ou à l'aval.

Il faut cependant veiller à ce que ces différents scénarios ne modifient que les conditions aux limites du modèle, sans entraîner une modification de sa structure.

Nous rappelons ici que le modèle ne peut prévoir que l'évolution des composants de la chaîne trophique initialement intégrés dans sa struc-

ture. Toute modification de cette structure trophique n'est actuellement prévisible par aucun modèle.

Il faut donc interpréter avec prudence les résultats des simulations et s'en tenir aux grandes tendances indiquées par le modèle.

IV Un exemple d'application : l'étude du lac de Pareloup

Les différentes phases de travail que nous venons d'évoquer sont celles qui nous ont permis la mise en œuvre du modèle de la retenue de Pareloup. La figure 1 résume la démarche que nous avons suivie : débiter la simulation avec un modèle de base le plus simple possible, puis le sophistication au fur et à mesure afin d'améliorer la concordance entre résultats calculés et observés. Ainsi sont identifiés les mécanismes prépondérants dans cet écosystème particulier, qui sont ensuite introduits dans le modèle, après parfois une phase bibliographique ou expérimentale. Pour cette raison, des processus apparaissant importants dans d'autres systèmes, ne seront pas représentés dans ce modèle, car ils participent peu à sa dynamique ou sont masqués par des mécanismes jouant un plus grand rôle.

La construction d'un tel modèle a nécessité de nombreuses étapes de réflexion, en particulier une interaction permanente entre les travaux de modélisation et les travaux expérimentaux. Finalement, deux modèles ont été réalisés simultanément :

— le modèle ASTER simulant la dynamique des principales variables

biologiques et chimiques ; il comporte une structure physique simple (modèle bicouche simulant la stratification thermique saisonnière) et a pour objectif une meilleure compréhension des processus dominants impliqués dans le fonctionnement de l'écosystème (Thébault et Salençon, 1993),

— le modèle hydrodynamique et thermique EOLE (modèle unidimensionnel vertical) ; ce modèle prend en compte la bathymétrie de la retenue, les échanges thermiques à l'interface air-eau ainsi que les entrées et sorties d'eau (rivières, pompages, turbinages, débits réservés etc.) (Salençon, 1994). Il permet de représenter plus finement la dynamique verticale et de tester les différents modes de gestion de la retenue. Ce modèle a ensuite été couplé au modèle biologique afin d'être exploité comme outil de gestion.

La mise en œuvre d'un modèle biologique (choix des variables, détermination des processus dominants, tests d'hypothèses) nécessite un grand nombre de simulations. La démarche que nous avons adoptée, consistant à séparer, dans un premier temps, modèle biologique et modèle physique fin, permet un gain de temps considérable et facilite grandement l'analyse des résultats de simulation. Le couplage des modèles ASTER et EOLE a été réalisé ultérieurement, en insérant les variables et équations biologiques dans le modèle unidimensionnel vertical. Il a abouti au modèle complet de l'écosystème de la retenue, MELODIA (Salençon et Thébault, 1995).

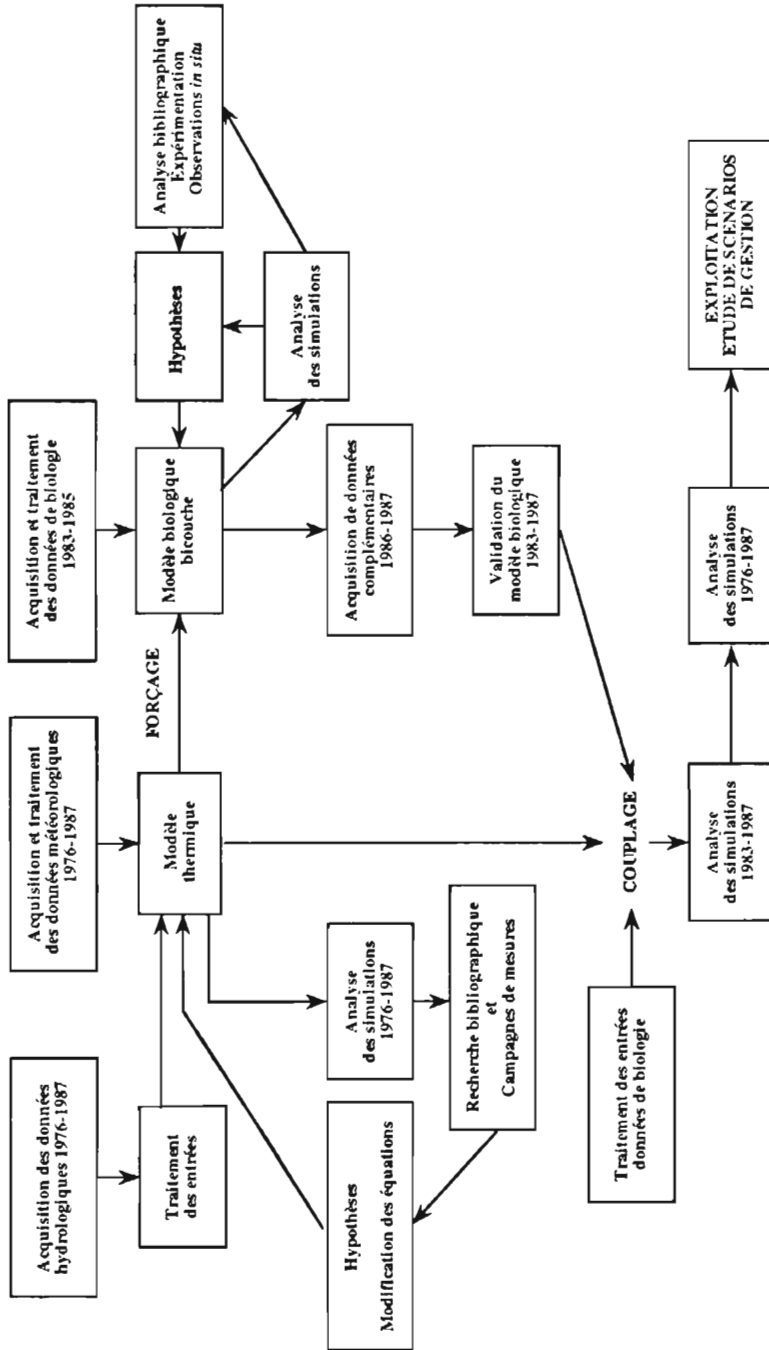


Fig. 1. - Démarche dans l'élaboration du modèle de Pareloup.
 Fig. 1. - The approach taken for building Pareloup model.

RÉFÉRENCES

- Box M.J., Davies D. and Swann W.H., 1964. Mathematical and statistical techniques for industry. Non linear optimization techniques. Monograph n° 5, Oliver and Boyd, Edinburgh, 68 pp.
- OCDE, 1982. Eutrophisation des eaux. Méthodes de surveillance, d'évaluation et de lutte. OCDE, Paris, 164 pp.
- Salençon M.J., 1994. Etude du régime thermique du Lac de Pareloup avec le modèle EOLE. *Hydroécol. Appl.* 6(1/2) : 329-368.
- Salençon M.J. et Thébault J.M., 1994. Modélisation de l'écosystème du Lac de Pareloup avec les modèles ASTER et MELODIA. *Hydroécol. Appl.* 6(1/2) : 369-426.
- Salençon M.J. and Thébault J.M., 1995. Simulation model of a mesotrophic reservoir (Lac de Pareloup) : MELODIA, an ecosystem management reservoir model. *Ecol. Modelling*, (sous presse)
- Simons T.J., 1980. Circulation models of lakes and inland seas. *Can. Bull. Fish. Aquat. Sci.* 230 : 146 pp.
- Thébault J.M. and Salençon M.J., 1993. Simulation model of a mesotrophic reservoir (Lac de Pareloup) : biological model. *Ecol. Modelling*, 65 : 1-30.