MODELISATION D'ECOSYSTEMES RIVIERES : APPLICATION A UN BIEF DU LOT

par B. CAUSSADE¹, C. CHAUSSAVOINE¹, S. DALMAYRAC¹ et L. MASBERNAT¹

Les résultats des premiers essais de modélisation de l'écosystème Lot sont présentés. Cette rivière a un grand intérêt vis-à-vis des problèmes posés par la réponse d'un milieu aux fluctuations, naturelles ou provoquées, des paramètres abiotiques. En effet, le fonctionnement des barrages de l'amont entraîne l'existence d'étiages sévères et, par suite, de longs temps de séjour dans les biefs se succédant sur le cours du Lot moyen et inférieur. Dans ces biefs, l'ensoleillement peut en outre entraîner l'existence de stratifications thermiques.

Diverses questions d'intérêt général sont rappelées dans une première partie : 1) schéma classique d'un écosystème aquatique, 2) équations d'échange traduisant les interactions entre les paramètres dynamiques du système ; 3) techniques permettant de définir les moyennes temporelles ou spatio-temporelles, 4) hypothèses phénoménologiques permettant d'aborder le traitement des équations.

Dans une deuxième partie sont présentés les premiers résultats d'une tentative de modélisation de la croissance et de la biodégradation des algues dans l'écosystème Lot. Le système général d'équations d'échanges est simplifié en tenant compte 1) des régimes hydrodynamiques, 2) des cycles thermiques d'origine naturelle, 3) de l'influence des deux caractéristiques précédentes sur le fonctionnement de l'écosystème.

Deux situations ont été étudiées :

- la première correspond à des régimes hydrodynamiques et thermiques pour lesquels chaque section du Lot peut être considérée comme homogène : l'utilisation de moyennes spatiales par section est alors acceptable,
- la deuxième correspond à des régimes hydrodynamiques et thermiques qui conduisent à prendre en compte la stratification verticale.

Modelling river ecosystems : an application to a reach of the Lot.

The results of the first attempts to model the ecosystem of the River Lot are given. This river is of particular interest because of the problems posed by the environmental response to large, natural or unnatural, fluctuations of the abiotic parameters. Because of the operation of upstream barrages, there are very low water levels and therefore water may be retained in the middle and lower reaches of the Lot for a long time. In these reaches, solar radiation may produce thermal stratification.

In the first part of the paper, various general questions are considered : 1. the classic scheme for an aquatic ecosystem, 2. the exchange equations describing the interactions between the dynamic parameters of the system, 3. techniques that allow the definition of temporal or spatio-temporal mean values, 4. phenomenological hypotheses that facilitate the interpretation of the equations.

The second part of the paper presents the first results of an attempt to model the growth and biodegradation of algae in the ecosystem of the Lot. The general system of exchange equations is simplified bearing in mind 1. the hydrodynamic regimes, 2. the natural thermal cycles, 3. the influence of the two preceding features on the functioning of the ecosystem.

1. Institut de Mécanique des Fluides (Laboratoire associé au C.N.R.S.), 2, rue Charles-Camichel, 31071 Toulouse Cedex.

Two situations have been studied : in the first, the hydrodynamic and thermal regimes are such that each section of the Lot may be considered homogeneous, the use of spatial means for each section is acceptable. In the second situation, the hydrodynamic and thermal regimes are those which take vertical stratification into account.

1. — INTRODUCTION

Le Lot constitue un bon exemple pour illustrer les problèmes que pose la modélisation d'écosystèmes rivières conçue comme l'ensemble des moyens permettant de prévoir la réponse du milieu aux fluctuations des paramètres abiotiques, naturelles ou bien provoquées par les activités humaines.

Deux types de paramètres agissent ici ensemble pour déterminer l'état biochimique de la rivière.

En premier lieu les régimes hydrodynamiques et thermiques qui sont très dépendants de la gestion hydraulique de la rivière : longs temps de séjour dans les biefs du fait de la succession de barrages mobiles répartis tout le long, régimes d'étiage contrôlés par les grands barrages réservoirs en amont.

En second lieu divers rejets, industriels en certains points, urbains et agricoles tout le long concourent en un apport nutritif en éléments organiques et surtout minéraux.

Les longs temps de séjour, les matières minérales dissoutes sont déterminants dans le processus de Production Primaire qui constitue certainement la situation la plus préoccupante pour l'état biologique de la rivière. Cette situation peut s'aggraver dans le cas de très fort ensoleillement et de très faibles régimes d'étiage. En effet, comme l'ont montré des essais sur le bief de Luzech en juillet 1976, on constate une stratification thermique verticale qui réduit la capacité de mélange de la rivière et, corrélativement à la production d'algues et à leur dégradation, entraîne une stratification verticale en oxygène dissous.

Cette situation, qui constitue certainement un cas limite, illustre bien néanmoins l'interaction complète entre les paramètres dynamiques, physiques et biochimiques du système et laisse entrevoir la complexité du problème dans la perspective d'une modélisation.

Dans ce qui suit nous nous proposons de présenter les premiers résultats d'une tentative de modélisation de la croissance des algues et de leur dégradation dans deux situations différentes.

— La première correspond à des régimes hydrodynamiques et thermiques pour lesquels on peut estimer que toutes les sections du Lot sont quasi homogènes et que l'introduction de moyennes spatiales par section est acceptable.

— La deuxième correspond à des régimes hydrodynamiques et thermiques qui conduisent à prendre en compte la stratification verticale.

Dans tous les cas les modèles utilisés sont fondés sur les équations de bilan de quantité de mouvement, d'énergie et de masse que permet d'écrire la mécanique des fluides classique.

Avant de présenter les résultats des premiers essais sur le Lot, nous faisons un rappel de ces équations, des techniques de moyennes temporelles et des hypothèses phénoménologiques qui permettent de réduire le nombre de termes inconnus et de résoudre ces équations dans quelques cas simples.

2. — EQUATIONS D'ECHANGES DANS LES EAUX SUPERFICIELLES

2.1. Schéma d'un écosystème

Nous présentons sur la figure n° 1 un schéma d'écosystème relativement simplifié qui ne fait apparaître que quelques étapes des cycles du carbone, de l'azote et du phosphore. Ce schéma met en évidence les apports extérieurs (cases en doubles traits) ; en particulier, dans les échanges avec le bassin versant, deux grands types de pollution sont considérés : l'un sous forme de produits organiques (traits gras), l'autre sous forme de produits minéraux (traits fins).

Le cycle de l'azote apparaît, sur la figure, plus détaillé que les autres, cela tient au fait qu'il est beaucoup mieux connu. Le cycle du carbone est en général peu utilisé, celui du phosphore est très mal connu, ce qui explique qu'ils soient ici très schématisés. La partie prédation n'a pas été développée car elle n'est pas concernée au niveau des applications traitées par la suite ; le zooplancton est en effet absent dans la rivière étudiée.

2.2. Equations locales, instantanées

Les variables définissant en chaque point et à chaque instant l'état dynamique et thermodynamique du milieu en évolution sont les suivantes :

— masse volumique de l'eau	ρ
— vitesse de composantes	V_i
— pression	P
— température	T
— concentrations des composants à l'état de traces	C_a

C_a peut représenter la salinité S dans le cas d'océans, d'estuaires ou bien les concentrations caractéristiques du système biochimique (bio-

FIG. 1. — Représentation schématique d'un écosystème d'eaux superficielles.

masse algale, bactérienne, nitrates, orthophosphates, carbone organique, oxygène dissous, etc.).

Ces variables doivent être cherchées comme solution du système d'équations exprimant les bilans de masse, de quantité de mouvement, d'énergie dans lesquelles on introduit les lois de comportement des fluides classiques (loi de Newton, Fourier, Fick) pour exprimer les contraintes visqueuses, les flux diffusifs d'énergie et de masse. Dans l'expression de ces derniers nous négligeons les phénomènes diffusifs croisés de thermo-diffusion et diffusion barométrique.

D'autre part nous introduisons l'hypothèse de Boussinesq en ne considérant que le cas des eaux superficielles, mers et océans compris. Dans ce cas on peut considérer que le milieu évolue autour d'un état de référence caractérisé thermodynamiquement par une pression P_0 , une température T_0 , une salinité S_0 , auxquelles correspond une masse volumique ρ_0 de référence. En linéarisant l'équation autour de cet état de référence on obtient le système d'équations simplifié suivant (réf. 1).

Bilan de quantité de mouvement

$$(1) \quad \frac{\partial V_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} V_i V_j = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_i}{\partial x_i} + \frac{\mu_0 \partial^2 V_i}{\rho_0 \partial x_j \partial x_j} +$$

$$g \delta_{i3} \{ \beta_0 (S - S_0) + \alpha_0 (T - T_0 - \Gamma_0 x_3) \} - \varepsilon_{ijk} \Omega_j V_k$$

Ω_j est le vecteur rotation de la terre ($\Omega \sim 1,46 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)

Bilan thermique

$$(2) \quad \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (T - \Gamma_0 x_3 \delta_{j3}) V_j = \frac{k_0}{\rho_0 C_0} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{\rho_0 C_0} \phi_1 + r$$

$$\phi_1 = \mu_0 \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \text{ dissipation intrinsèque}$$

Γ_0 = gradient adiabatique

r = taux d'apport volumique par rayonnement solaire.

Bilan global de masse

$$(3) \quad \frac{\partial V_j}{\partial x_j} = 0$$

Bilan de salinité

$$(4) \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} S V_j = D_{os} \frac{\partial^2 S}{\partial x_j \partial x_j}$$

Bilan du système biochimique

$$(5\alpha) \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial C_\alpha V_j}{\partial x_j} = D_{\alpha\alpha} \frac{\partial^2 C_\alpha}{\partial x_j \partial x_j} + \tau_\alpha$$

τ_α est le taux de production de l'espèce α par l'ensemble des réactions biochimiques.

En écrivant ces équations on néglige l'influence de la température sur les propriétés physiques : viscosité μ , conductivité thermique k , diffusivités massiques D_s , D_α .

2.3. Introduction à la turbulence des eaux superficielles

Le système d'équations (1) à (5 α) présente de grandes difficultés de résolution du fait de la non linéarité des équations et de l'instabilité des solutions dans la quasi totalité des cas : c'est là l'origine des turbulences des différents champs de variables qui ont un caractère aléatoire dans le temps et dans l'espace. Les équations (1) à (5 α) ne sont pas alors utilisables directement dans leur formulation locale et instantanée. On est ainsi conduit à introduire un point de vue statistique en caractérisant chaque champ de variable aléatoire par ses champs de moments statistiques et en déduisant des équations locales et instantanées des équations de transport de ces moments.

2.3.1. Equations des variables moyennes

Chaque grandeur G instantanée est décomposée en valeur moyenne et instantanée :

$$(6) \quad G(x, t) = \bar{G}(x) + G'(x, t) \text{ où}$$

$$\bar{G}(x) = \lim_{T' \rightarrow \infty} \frac{1}{T'} \int_t^{t+T'} G(x, \tau) d\tau$$

(6) définit une grandeur permanente en moyenne. En fait il existe en général des causes d'instationnarité à grande échelle de temps T_0 par rapport à l'échelle de temps T_c caractéristique de la turbulence locale (exemple : marée, cycles d'ensoleillement, fluctuations lentes résultant de la gestion hydraulique). On élargit alors la définition de la grandeur moyenne en posant :

$$(7) \quad G = \bar{G}(x, t) + G'(x, t) \text{ où}$$

$$\bar{G}(x, t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} G(x, \tau) d\tau \text{ où } T_c \ll T \ll T_0 \text{ et}$$

$$\bar{G}'(x, t) = 0$$

Ainsi l'ensemble des variables introduites pour décrire les échanges dans les eaux superficielles s'écrira :

$$\begin{aligned} V_i &= \bar{V}_i + V'_i \\ P_i &= \bar{P}_i + P'_i \\ T &= \bar{T} + T' \\ S &= \bar{S} + S' \\ C\alpha &= \bar{C}_\alpha + C'_\alpha \end{aligned}$$

En moyennant suivant (7) les équations (1) à (5) on obtient le système des équations de Reynolds.

$$\begin{aligned} (8) \quad \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{V}_i \bar{V}_j) &= - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{P}_i}{\partial x_i} \\ &+ \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_0 \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_i} \right) - \rho_0 \bar{V}_i \bar{V}_j \right] \\ &+ g \delta_{i3} \{ \beta_0 (\bar{S} - S_0) + \alpha_0 (\bar{T} - T_0 - \Gamma_0 x_3) \} - \varepsilon_{ijk} \Omega_j V_k \end{aligned}$$

$$(9) \quad \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\begin{aligned} (10) \quad \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{T} - \Gamma_0 x_3 \delta_{j3}) \bar{V}_j \\ = - \frac{1}{\rho_0 C_0} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} + \rho_0 C_0 \overline{T' V'_j} \right) + \frac{1}{\rho_0 C_0} \bar{\phi}_1 + \bar{r} \\ \phi_1 = \mu \left\{ \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \bar{V}'_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{V}'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{V}'_j}{\partial x_i} \right) \right\} \end{aligned}$$

$$(11) \quad \frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{S} \bar{V}_j = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[- \rho_0 D_s \frac{\partial \bar{S}}{\partial x_j} + \rho_0 \overline{S' V'_j} \right]$$

$$(12) \quad \frac{\partial \bar{C}_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{C}_\alpha \bar{V}_j = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[- \rho_0 D_\alpha \frac{\partial \bar{C}_\alpha}{\partial x_j} + \rho_0 \overline{C'_\alpha V'_j} \right] + \bar{\tau}_\alpha$$

Les équations (8) --- (12) constituent les équations de transfert des grandeurs moyennes (moments du 1^{er} ordre) : elles font apparaître aussi des moments centrés d'ordre deux qui sont en surnombre par rapport au nombre d'équations. Il s'agit des termes de densités de flux turbulents $\rho_0 \overline{V'_i V'_j}$, $\rho_0 c_0 \overline{V'_i T'}$, $\rho_0 \overline{V'_i S'}$ et $\rho_0 \overline{V'_i C'_a}$ et du terme de dissipation lié aux fluctuations de vitesse

$$\varepsilon = \mu \frac{\partial V'_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial V'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V'_j}{\partial x_i} \right).$$

Il faut noter que ces termes sont en général beaucoup plus importants que les termes de diffusion moléculaire ou dissipation liés aux gradients des variables moyennes.

Les échanges de quantité de mouvement, d'énergie, de masse dans les écoulements turbulents sont le résultat d'une organisation « tourbillonnaire » du fluide qui fait jouer aux propriétés moléculaires des fluides un rôle très différent de celui qu'elles jouent dans les écoulements laminaires.

En fait en suivant le concept classique de transmission en cascade de l'énergie des structures tourbillonnaires de grande dimension vers des structures de plus en plus petites, les propriétés moléculaires du fluide ne jouent pleinement leur rôle qu'aux petites échelles. L'énergie

cinétique moyenne de turbulence $\bar{k} = \frac{\overline{u'_i u'_i}}{2}$ est extraite au mouve-

ment moyen par les contraintes de Reynolds, transportée par convection et diffusion et dissipée par effet de viscosité au niveau des petites structures. Quand on tient compte des forces d'Archimède liées aux gradients de température et de salinité, il apparaît des termes complémentaires de « production » ou de « destruction » de turbulence suivant le signe de ces gradients. Ces remarques sont mises en évidence par l'examen de l'équation de $\bar{k}$:

$$(13) \quad \underbrace{\frac{d\bar{k}}{dt} = \frac{\partial \bar{k}}{\partial t} + \overline{V_j} \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j}}_{\text{Transport convectif}} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \overline{V'_j k'} + \overline{V'_j p'} - \mu_0 \overline{V'_i} \left(\frac{\partial V'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V'_j}{\partial x_i} \right) \right\}}_{\text{Diffusion}} - \underbrace{\rho_0 \overline{V'_i V'_j} \frac{\partial \overline{V_i}}{\partial x_j}}_{\text{Production}} + \underbrace{\rho_0 g \delta_{13} (\alpha_{OT} \overline{T' V'_i} + \beta_{OS} \overline{S' V'_i})}_{\text{Production ou destruction par les gradients de température ou salinité}} - \underbrace{\varepsilon}_{\text{Dissipation par viscosité liée aux gradients des fluctuations}}$$

Pour mieux comprendre le rôle des différents termes on peut considérer une situation simple dans laquelle le mouvement moyen est parallèle de vitesse $(\bar{V}_1 = \bar{V}_1(x_3), \bar{V}_2 = 0, \bar{V}_3 = 0)$ dans une direction perpendiculaire à la verticale terrestre ox_3 .

L'équation de $\bar{k}$ s'écrit alors :

(14)

$$\frac{d\bar{k}}{dt} = \frac{\partial \bar{k}}{\partial t} + \bar{V}_1 \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_1} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{V}'_j \bar{k}' + \bar{V}'_j \bar{p}' - \mu_0 \bar{V}'_1 \left(\frac{\partial \bar{V}'_1}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{V}'_j}{\partial x_1} \right) \right\} \\ - \rho_0 \bar{V}'_1 \bar{V}'_3 \frac{d\bar{V}_1}{dx_3} + \rho_0 g (\alpha_{OT} \bar{T}' \bar{V}'_3 + \beta_{OS} \bar{S}' \bar{V}'_3) - \varepsilon$$

Les termes de production, destruction peuvent s'écrire :

$$P = - \rho_0 \bar{V}'_1 \bar{V}'_3 \frac{d\bar{V}_1}{dx_3} [1 + R_1(x_3)]$$

avec (15)

$$R_1 = - \frac{\rho_0 g (\alpha_{OT} \bar{T}' \bar{V}'_3 + \beta_{OS} \bar{S}' \bar{V}'_3)}{\rho_0 \bar{V}'_1 \bar{V}'_3 \frac{d\bar{V}_1}{dx_3}}$$

R_1 est le nombre de Richardson de flux qui caractérise localement l'effet d'augmentation ou de destruction de la turbulence par gradient thermique ou gradient de salinité.

D'un point de vue pratique il est nécessaire de formuler des hypothèses de fermeture sur les moments d'ordre 2 pour obtenir, d'un modèle fermé, des champs de variables moyennes.

2.3.2. Modèles des variables moyennes

Une hypothèse de fermeture pour les flux turbulents repose sur l'introduction de diffusivités turbulentes ν_t qui exprime les flux turbulents en fonction des gradients des variables moyennes

$$(16) \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho_0 \bar{V}'_1 \bar{V}'_j = \rho_0 \left\{ 2 \frac{\bar{k}}{3} \delta_{ij} + 2 \nu_t \left(\frac{\partial \bar{V}_1}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_1} \right) \right\} \\ \rho_0 C_0 \bar{T}' \bar{V}'_1 = \rho_0 C_0 \frac{\nu_t}{\sigma_T} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_1} \\ \bar{S}' \bar{V}'_1 = - \frac{\nu_t}{\sigma_S} \frac{\partial \bar{S}}{\partial x_1} \\ \bar{C}_a \bar{V}'_1 = - \frac{\nu_t}{\sigma_S} \frac{\partial \bar{C}_a}{\partial x_1} \end{array} \right.$$

$\sigma_T, \sigma_S, \sigma_a$ « nombres de Prandtl turbulents » liés à chacun des scalaires transportés. Cette diffusivité ν_t n'est pas une propriété du fluide mais une grandeur étroitement liée au mouvement d'agitation du fluide.

L'hypothèse classique de Prandtl Kolmogoroff relie la valeur de ν_t aux échelles locales caractéristiques des structures tourbillonnaires contenant la plus grande partie de l'énergie cinétique de turbulence (échelles externes).

Soit une échelle externe de fluctuation de vitesse liée aux structures de taille l , on pose :

$$(17) \quad \nu_t \sim u l$$

où

$$(18) \quad \left\{ \begin{array}{l} u \sim \sqrt{\bar{k}} \\ l \sim \frac{\bar{k}^{3/2}}{\varepsilon} \end{array} \right.$$

Soit :

$$(19) \quad \nu_t = \alpha \sqrt{\bar{k}} l = \alpha' \frac{\bar{k}^2}{\varepsilon}$$

Les hypothèses (16) permettent d'exprimer le Richardson de flux sous la forme classique du Richardson de gradient

$$(20) \quad R_i = g \frac{\left(\frac{\alpha_{oT}}{\sigma_T} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_3} + \frac{\beta_{oS}}{\sigma_S} \cdot \frac{\partial \bar{S}}{\partial x_3} \right)}{\left(\frac{\partial \bar{V}_1}{\partial x_3} \right)^2}$$

Dans des problèmes d'écoulement cisaillés en turbulence libre ou loin des parois on a en général :

$$(21) \quad \nu_t = \alpha'' u l f \left(\frac{x_3}{l}, R_i \right)$$

On peut donc fermer complètement le modèle des variables moyennes en se donnant une expression empirique de la fonction $f \left(\frac{x_3}{l}, R_i \right)$.

On peut tenter une prédétermination plus fine de l'écoulement en définissant ν_t par (19) et en résolvant les équations de k et ε , les hypothèses de fermeture du type gradient permettant d'exprimer les moments d'ordre 3 en fonction des gradients de k et ε .

Dans l'exemple traité par la suite nous utiliserons une loi du type (21) pour exprimer algébriquement la diffusivité turbulente.

3. — PREMIERS ESSAIS DE SIMULATION DU COMPORTEMENT DU LOT

3.1. Hypothèses spécifiques des applications traitées

Compte tenu de la gestion hydraulique des grands barrages réservoirs qui se trouvent en amont de la partie du cours du Lot que nous avons étudiée et des conditions de pluviométrie sur le bassin du Lot, les régimes d'étiage sévères se traduisent par de longs temps de séjour de la masse d'eau dans les différents biefs. La rivière, en fonction des régimes hydrodynamiques imposés apparaît donc comme un écosystème fonctionnant tantôt sur le mode réservoir, tantôt sur le mode rivière. Compte tenu des temps de renouvellement de la masse d'eau, le choix des paramètres biochimiques ou biologiques auxquels nous pouvons nous intéresser, nous est aussi imposé. En effet, dans ce cas particulier, la chaîne des prédateurs dont les cinétiques des cycles de développement sont supérieures aux temps de renouvellement de la masse d'eau, n'ont pas le temps de se développer. Si nous nous reportons au schéma général des interactions biologiques et biochimiques dans un écosystème, voir fig. n° 1, nous voyons que seules les populations phytoplanctoniques rentrent dans des cycles dont les cinétiques sont compatibles avec les régimes hydrodynamiques.

Le schéma d'un écosystème d'eaux superficielles, telle que le montre la figure n° 1, est donc applicable au cas du Lot à condition de ne pas tenir compte de la chaîne des prédateurs, c'est-à-dire de supprimer toute la partie entourée de traits pointillés.

Les paramètres hydrodynamiques sont restés relativement stables durant les courtes périodes de temps considérées, aussi nous ne simulerons pas l'hydrodynamique et nous nous contenterons de prendre pour ces paramètres des valeurs moyennes. Ce genre d'hypothèse simplificatrice est parfaitement justifiée au niveau d'études de simulation préliminaires où se situe le présent travail.

Les équations qui régissent l'hydrodynamique et le transport de constituant, rappelées au chapitre 2, sont écrites sous forme tensorielle : elles sont donc, bien sûr, tridimensionnelles (dans l'espace).

Lorsque l'on étudie une rivière, l'écoulement a des propriétés particulières dues à la morphologie propre du cours d'eau et au régime étudié. En règle général on le ramène à un écoulement monodimensionnel, dans le sens privilégié de l'écoulement, ce qui implique que l'on considère les sections transversales homogènes pour la grandeur

considérée. Cette hypothèse est parfaitement justifiée pour un débit suffisant et un lit de rivière assez régulier. Ce sera le cas pour la campagne où une masse d'eau a été étudiée au cours du temps. Il est évident que pour certains cas particuliers cette hypothèse simplificatrice ne se justifie plus. C'est le cas par exemple pour l'étude d'un estuaire où il faut introduire une dimension transversale pour tenir compte des effets de stratification. Ce sera également le cas pour la deuxième application sur le Lot où il a été nécessaire de réintroduire une dimension verticale pour prendre en compte les gradients verticaux de température et d'oxygène dissous mis en évidence par les relevés expérimentaux.

3.2. Etude du suivi d'une masse d'eau

3.2.1. Position du problème

Afin de suivre l'évolution dans le temps de la chlorophylle *a* de l'azote N/NO_3^- et du phosphore P/PO_4^{3-} dans le milieu naturel, une masse d'eau a été marquée dans la partie moyenne du Lot et étudiée dans son parcours vers l'aval.

L'expérience s'est déroulée entre Cajarc et Cahors, soit sur 52 km pendant la période allant du 21 au 28 août 1975.

Il a été précisé dans la première partie que l'évolution de la concentration d'une substance quelconque était le résultat de divers phénomènes physiques et biochimiques parmi lesquels les plus importants étaient le transport convectif et le transport dispersif, ainsi que différents apports et retraits de la substance considérée à expliciter dans chaque cas particulier. Ce qui se traduit par l'équation suivante (cf. ch. 2, équ. (5a)) :

$$(12) \quad \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{C} \bar{V}_j + \bar{\tau}_e$$

Le problème étant posé en termes de suivi d'une même masse d'eau, le terme de transport convectif n'entre pas en jeu. En ce qui concerne le phénomène de transport dispersif, nous le négligerons devant les phénomènes qui décrivent les réactions biochimiques.

3.2.2. Sources et puits

Il faut maintenant préciser les termes d'apports et de retraits. Ils peuvent être d'origine physique, c'est le cas d'un rejet direct ou de la dilution si un affluent vient rejoindre la rivière étudiée ; ils peuvent également être d'origine biochimique et, si on considère plus particulièrement l'évolution de la biomasse algale, on peut évoquer la croissance par métabolisme de matières minérales comme le carbone,

l'azote et le phosphore, la dégénérescence des algues par mort ou respiration ou bien la prédation par les prédateurs d'ordre supérieur dans la chaîne alimentaire. Ces différents phénomènes peuvent se résumer par l'équation symbolique

$$(22) \quad \frac{dc}{dt} = (G - R - H) \bar{c} + \bar{\tau}_c$$

c est une concentration représentative de la biomasse algale, par exemple de la chlorophylle a .

G est le taux de croissance de la biomasse algale qui fait intervenir divers paramètres physico-chimiques.

R est le taux de dégénérescence de la population algale par respiration que l'on supposera en général constant.

H est le taux de prédation que l'on négligera ici puisque, le zooplankton étant absent, les cycles de développement des prédateurs ne sont pas à l'échelle de temps de phénomènes étudiés ainsi qu'il a été dit ci-dessus.

τ_c représente les taux d'apports et de retraits par l'environnement.

3.2.3. *Bref rappel sur les cinétiques*

Le taux de croissance G introduit dans l'équation précédente sera fonction de la concentration en nutriments dans l'écosystème, de l'ensoleillement et de la température.

Si l'on pose pour le taux de croissance une relation de la forme suivante

$$(23) \quad G = K\mu \cdot f(N) \cdot g(P) \cdot h(C) \cdot k(I) \cdot (T)$$

qui exprime sa dépendance par rapport aux différents nutriments (N , P , C), à l'intensité lumineuse (I) et à la température (T), des observations faites en laboratoire ont montré qu'en général les courbes d'évolution du taux de croissance G en fonction de la concentration en nutriment pouvaient être lissées par des lois de type hyperbolique connues sous le nom d'équations de Monod ou de Michaelis-Menten.

Une courbe de ce type est représentée sur la figure n° 2. Cette courbe fait intervenir une concentration caractéristique γ_s dite concentration de demi-saturation pour laquelle le taux de croissance est la moitié de sa valeur maximale. Pour les concentrations inférieures à γ_s , le taux de croissance varie quasiment linéairement avec la concentration, alors que pour des concentrations supérieures à γ_s , le taux de croissance est quasiment constant.

Ces tendances physiques se traduisent mathématiquement par des lois hyperboliques de la forme :

FIG. 2. — Evolution des cinétiques de croissance en fonction de la concentration en nutriments.

Légende : γ = concentration en nutriment
 γ_s = concentration de demi-saturation
 G = cinétique de croissance
 $K\mu$ = cinétique maximale.

$$(24) \quad G = G_{\max} \frac{\gamma}{\gamma + \gamma_s}$$

On retrouve bien sur cette équation les formes asymptotiques annoncées précédemment. La littérature nous fournit la valeur des constantes de demi-saturation.

Il en est de même en ce qui concerne la dépendance locale de G avec l'intensité lumineuse. La loi de Lambert exprime l'intensité lumineuse en fonction de l'épaisseur d'eau traversée :

$$(25) \quad I(Z) = I_0(t) \cdot e^{-\alpha Z}$$

$I(Z)$ étant l'intensité lumineuse à la profondeur Z

I_0 la valeur de l'intensité lumineuse en surface en général fonction du temps

α le coefficient d'extinction.

Nous pouvons écrire localement :

$$(26) \quad h(I) = \frac{I(Z)}{I(Z) + I_K}$$

Après intégration sur une section pour prendre en compte un effet moyen, il vient :

$$(27) \quad k(I) = \frac{1}{H} \int_0^H h(I) dH = \frac{1}{\alpha H} \text{Log} \frac{I_K + I_0}{I_K + I_0 \exp(-\alpha H)}$$

Pour ce qui est de la dépendance de G avec la température on prend généralement des lois linéaires.

Le taux de dégradation de la population algale par respiration a été pris constant.

3.2.4. Résultats et conclusions

Sur la base du modèle précédemment défini, une simulation de l'évolution de la chlorophylle, de l'azote et du phosphore a été effectuée sur le tronçon et pendant la période déjà précisés. Les valeurs prises dans la littérature ne peuvent pas expliquer l'évolution des

FIG. 3. — Etude d'une masse d'eau suivie. Evolution de la concentration en chlorophylle « a » en fonction du temps (août 1975).

Légende: ● Points expérimentaux
— Courbe calculée.

FIG. 4. — Etude d'une masse d'eau suivie. Evolution des concentrations en nitrates et orthophosphates en fonction du temps (août 1975).

Légende : N/NO₃ ● Points expérimentaux
 — Courbe calculée
 P/PO₄ ○ Points expérimentaux
 — Courbe calculée.

paramètres en question, il a donc fallu envisager de caler des coefficients sur les points expérimentaux. Malgré tout il restait des imprécisions dans la concordance des résultats, ce qui permettait de soupçonner l'existence de phénomènes secondaires. Effectivement un petit affluent du Lot qui jusqu'à présent avait été négligé s'est avéré assez fortement chargé en nitrates (probablement à cause de l'importance d'apports agricoles dans la région). Il a donc été tenu compte de l'apport de cet affluent par une loi de mélange à son point de confluence avec le Lot. Les résultats s'en trouvent notablement améliorés.

Enfin, dans un dernier stade de la simulation, il a été tenu compte d'apports par ruissellement qui entraînent une diminution continue

de la teneur en chlorophylle et un apport continu en azote. La concordance entre courbe calculée et points expérimentaux devient acceptable (voir *fig. 3-4*), mettant ainsi en lumière un aspect de la simulation numérique qui permet de déceler des phénomènes qui avaient peut-être été négligés à tort en première approximation.

3.3. Etude du comportement en état de stratification

3.3.1. Position du problème

L'écriture de l'équation de transfert de l'énergie cinétique fait apparaître des termes de « production » et de « destruction » caractéristiques des forces d'Archimède liées aux gradients de température et de salinité.

On ne tient en général pas compte de ces termes dans les cas courants d'application aux rivières pour lesquelles les termes de transport convectif sont prépondérants. Cependant pour des cas particuliers ces termes jouent un rôle non négligeable et c'est le cas pour la rivière Lot dans des conditions d'étiage très difficiles. Sa morphologie particulière causée par la succession de barrages mobiles fait qu'aux faibles débits, son comportement est comparable à celui des lacs. La turbulence générée par l'écoulement sur le fond du bief se trouve amortie par les gradients de température causés par le réchauffement de la surface de l'eau dans la journée. Il peut donc apparaître dans le Lot, une stratification thermique analogue au phénomène bien connu dans les lacs. Et comme dans les lacs, l'existence d'une thermocline dans le Lot a d'importantes conséquences sur l'évolution de différents paramètres de l'écosystème.

Pendant la période allant du 21 au 26 juin 1976, le Lot a été soumis à un étiage particulièrement sévère puisque son débit était en moyenne de 12 m³/s ce qui implique des vitesses de l'ordre de 0,02 m/s. Des profils verticaux d'oxygène dissous et de température effectués dans la même section montrent une stratification assez marquée.

Sur la base de ces résultats, une simulation du comportement du Lot en stratification a été tentée.

3.3.2. Hypothèse sur la capacité de mélange

En considérant que l'écoulement est parallèle en moyenne et de structure turbulente homogène suivant la direction de l'écoulement et en négligeant les effets d'instationnarité du débit et du tirant d'eau, le bilan de quantité de mouvement donne :

$$(28) \quad \tau = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{h}\right)$$

Compte tenu de (16) et (21) on a :

$$(29) \quad \frac{v_t}{u^2} \frac{du}{dy} = \left(1 - \frac{y}{h}\right) \text{ où } \tau_0 = \rho u^2$$

avec :

$$(30) \quad \frac{v_t}{u \cdot h} = \frac{y}{h} \left(1 - \frac{y}{h}\right) f(R_i)$$

L'expression (30) est telle que lorsque $R_i = 0$ on a $f = 1$ et on retrouve la loi de diffusivité classique qui à partir de (28) génère le profil de vitesse logarithmique.

Dans le cas traité :

$$(31) \quad R_i = g \frac{\frac{\partial T}{\partial y}}{\sigma_t \left(\frac{du}{dy}\right)^2}$$

et on a pris $f(R_i) = \frac{1}{1 + 0,1 R_i}$

Compte tenu de (28), (30) et (31) v_t s'exprime analytiquement en fonction du gradient thermique en chaque point comme solution de l'équation du 3^e degré :

$$(32) \quad 0,1 R_i^* \frac{\partial T^*}{\partial \xi} v_t^{*3} + (1 - \xi)^2 v_t^{*2} - \kappa \xi (1 - \xi)^3 = 0$$

où $T^* = \frac{T}{(\Delta T)_0}$ et $(\Delta T)_0$ écart de température de référence

$$\xi = \frac{y}{h} \text{ et } h \text{ hauteur moyenne}$$

$$R_i^* = \frac{\alpha g}{\sigma_t} \frac{(\Delta T)_0 h}{u^2}$$

$$v_t^* = \frac{v_t}{u \cdot h}$$

$$\kappa = 0,4 \quad \text{constante de Von Karman}$$

3.3.3. Modèles de bilans thermique et d'oxygène dissous

En négligeant les effets du transport convectif d'énergie et d'oxygène dissous, le modèle s'écrit :

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \frac{1}{\sigma_t} \left(-v_t^* \frac{\partial T^*}{\partial \xi} \right) + \frac{\phi_o(t) h \eta}{\rho c_p (\Delta T)_o u^*} \exp [\eta h (\xi - 1)]$$

(33)

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \frac{1}{\sigma_t} \left(-v_t^* \frac{\partial C^*}{\partial \xi} \right) + \frac{S_o(t) h}{(\Delta C)_o u^*} \exp [\eta' h (\xi - 1)] - \frac{Rh}{(\Delta C)_o u^*}$$

v_t^* est défini par l'expression (32).

$C^* = \frac{C}{(\Delta C)_o}$ est la concentration en oxygène dissous par rapport à un écart de concentrations de référence.

η et η' sont les coefficients d'extinction de la lumière correspondants respectivement aux longueurs d'ondes porteuses d'énergie thermique pour η et propres à l'activité photosynthétique pour η' .

FIG. 5. — Evolution journalière de l'énergie solaire.

$\phi_o(t)$ représente l'activité thermique du soleil en surface qui, compte tenu des données expérimentales relevées au mois de juin 1976 est supposée suivre une loi sinusoïdale pendant le jour et ne pas s'exercer la nuit (voir fig. 5).

$S_o(t)$ représente également l'activité solaire pour sa partie utile pour la photosynthèse. Elle suit donc la même loi que précédemment mais d'amplitude différente.

Il a été tenu compte en ce qui concerne $S_o(t)$ et $\phi_o(t)$ de l'effet d'absorption du rayonnement avec la profondeur suivant une loi classique exponentielle. Les coefficients d'absorption η et η' qui figurent dans les termes correctifs ont été calés par les données expérimentales.

R représente la consommation d'oxygène dissous due à l'activité des diverses populations (respiration, métabolisme...). Dans l'application ce terme a été pris constant.

FIG. 6. — Simulation de l'évolution des profils de température et d'oxygène dis-

Légende : Température

● Points expérimentaux (juin 1976)

— Courbe simulée

----- Courbe simulée sans tenir compte de l'influence du gradient thermique sur la structure de la turbulence.

5 HEURES

7 HEURES

13 HEURES

15 HEURES

21 HEURES

23 HEURES

sous dans le Lot en situation de stratification thermique sur un cycle journalier.

Oxygène dissous ■ Points expérimentaux (juin 1976)
 — Courbe simulée
 - - - - - Courbe simulée sans tenir compte de l'influence du gradient thermique sur la structure de la turbulence.

Pour définir parfaitement le problème posé, il faut encore préciser les conditions limites.

CONDITIONS AUX LIMITES

a) *Température.*

Au vu de quelques résultats expérimentaux, la température sur le fond a été supposée constante et égale à 23 °C. A la surface, il n'a pas été imposé de conditions précises, la température résulte de l'échange entre l'atmosphère et le milieu fluide à l'interface par le rayonnement propre de la surface libre.

b) *Oxygène dissous.*

En ce qui concerne l'oxygène dissous, la saturation a été imposée à la surface à partir de la température de surface déduite du champ de température. Sur le fond, un flux constant d'oxygène a été imposé simulant ainsi une consommation de boues de fond.

3.3.4. *Résultats et conclusions*

Les équations étant posées avec leurs conditions aux limites, le système a été résolu par intégration numérique suivant une méthode itérative implicite.

La donnée d'un profil de température à un instant donné permet de calculer la viscosité correspondante affectée par le nombre de Richardson. La valeur calculée de la viscosité permet alors, grâce aux équations, de déterminer un nouveau profil de température et ainsi de suite jusqu'à convergence des équations vers un profil de température et d'oxygène qui sera considéré comme solution à l'instant considéré. Le calcul reprend alors après incrémentation sur le temps.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure n° 6 qui donne les profils d'oxygène dissous et de température à différentes heures de la journée. Les valeurs numériques des paramètres intervenant dans les équations ont été extraites de la thèse de M^{me} Casanova-Batut pour une part et calés sur les profils expérimentaux pour une autre part.

On peut constater que si la coïncidence entre profils calculés et profils expérimentaux n'est pas parfaite, la tendance générale des phénomènes est bien respectée. On peut en particulier bien voir l'évolution du profil thermique au cours de la journée en fonction de l'influence du rayonnement avec l'établissement de la thermocline qui s'oppose au mélange des couches de fluide. Ce phénomène est particulièrement visible sur les profils d'oxygène dissous qui sont bien sûr en corrélation avec les profils thermiques.

A titre de comparaison les profils de température et d'oxygène dissous ont été tracés sans tenir compte de l'influence du gradient thermique sur l'amortissement de la turbulence. Les profils sont alors uniquement guidés par les conditions aux limites. On peut ainsi juger de l'importance du phénomène de stratification.

Ce travail n'est qu'une première approche du phénomène de stratification. Il est évident qu'il reste beaucoup de choses à préciser, notamment sur la modélisation de la turbulence et de l'hydrodynamique ainsi que sur l'important problème des conditions aux limites.

Ceci implique une connaissance expérimentale plus approfondie du Lot, afin de pouvoir exploiter et caler les paramètres dans des modèles de transfert plus performants.

4. — CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

A l'issue de ce travail on peut se poser un certain nombre de questions et tirer des enseignements pour la suite de l'étude de la rivière Lot.

Après une présentation d'un système d'équations très complexes et assez générales on se rend compte qu'il n'a été résolu, au niveau des applications, que des équations relativement simples où l'étude hydrodynamique n'apparaît pas ou peu. Ceci est dû à plusieurs raisons :

- le modèle présenté au début de ce travail est très général et les cas traités correspondent à des situations particulières (débits importants suivant une direction privilégiée, ou bien faibles vitesses). Le modèle a donc été adapté et c'est un système dégénéré en fonction d'hypothèses simplificatrices qui a été résolu.
- cette étude constitue nos premiers essais de simulation du comportement de la rivière Lot, nous avons donc pris en compte, par priorité, les phénomènes qui nous paraissaient prépondérants afin de dégrossir le problème et de préparer les études plus complètes.
- en ce qui concerne l'hydrodynamique, la connaissance précise du comportement d'une rivière est le résultat d'une longue étude qui demande le traitement de nombreuses données numériques. Nous ne sommes pas encore à ce stade, l'étude est en cours, il a donc fallu simplifier afin d'obtenir de premiers résultats.

En ce qui concerne les applications, il a été étudié essentiellement des situations asymptotiques. La première, l'étude d'une masse d'eau suivie, permet de préciser des problèmes d'échelles de temps et d'espace en fonction des cinétiques propres des phénomènes biologiques en cause. La seconde, à faible débit, permet une étude dans une situation critique puisque la stratification produite par le régime hydrodynamique crée une zone où la vie biologique est difficile dans

le Lot. L'étude de telles situations doit donc permettre de fournir des données pour la gestion hydrodynamique.

En résumé, il est indispensable de mieux connaître le comportement hydrodynamique de la rivière car ce sont des paramètres comme le débit, les temps de séjour, les niveaux de turbulence... qui agiront directement sur les paramètres biotiques.

BIBLIOGRAPHIE

- CASANOVA-BATUT (Th.). 1977. — Etude préliminaire en vue de la modélisation de l'écosystème Lot. *Thèse 3^e cycle, Toulouse* : 109 p.
- COANTIC (M.). 1973. — Quelques commentaires sur les équations générales de la turbulence océanique. *J. Mécanique*, 12 (2) : 197-223.
- DAKE (J. M. K.) et HARLEMAN (D. R. F.). 1969. — Thermal stratification in lakes, analytical and laboratory studies. *Water Resources Research*, 5 (2) : 484-495.
- DAUTA (A.), DÉCAMPS (H.), DENAT (D.), GALHARAGUE (J.), GIOT (D.), MASSIO (J.-C.) et TROLET (J.-L.). 1975. — Etude de la turbidité et des matières en suspension dans les eaux du Lot et de leurs relations avec les écoulements. 3. Evolution des matières en suspension et de la turbidité dans une masse d'eau marquée. *Rapport B.R.G.M. : 75 SGN 388 MPY*, 31 p., 31 planches.
- DENMAN. 1973. — A time dependant model of the upper ocean. *J. Physical oceanography*, 3 : 173-184.
- DI TORO (D. M.), O'CONNOR (D. J.), THOMANN (R. V.) et MANCINI (J. C.). 1975. — Phytoplankton, zooplankton, nutrient interaction model for western lake Erié, in PATTEN : *Systems analysis and simulations in ecology*, vol. 3 : 423-474.
- FAVRE (A.), KOVASZNY (L. S. G.), DUMAS (R.), GAVIGLIO (J.) et COANTIC (M.). 1976. — La turbulence en mécanique des fluides. Gauthiers-Villars : 411 p.
- JORGENSEN (S. E.). 1976. — A eutrophication model for a lake. *Ecological modelling*, 2 : 147-165.
- NAJARIAN (T. O.) et HARLEMAN (D. R. F.). 1975. — A real model of the nitrogen-cycle dynamics in an estuarine system. *MIT Report n° 204* : 287 p.
- NAJARIAN (O.) et HARLEMAN (D. R. F.). 1977. — Real time simulation of nitrogen-cycle in an estuary. *J. environmental engineering division, EE4* : 523-538.
- ODD (V. M.) et RODGER (J. G.). 1978. — Vertical mixing in stratified tidal flows. *J. hydraulics division, HY3* : 337-351.
- RYAN (P. J.) et HARLEMAN (D. R. F.). 1973. — An analytical and experimental study of transient cooling pond behaviour. *MIT Report n° 161* : 439 p.
- SUNDARAM (T. R.) et REHM (R. G.). 1971. — Formation and maintenance of thermoclines in stratified lakes. *AIAA Journal*, 9 : 1322-1330.
- SUNDARAM (T. R.) et REHM (R. G.). 1973. — The seasonal thermal structure of deep temperate lakes. *Tellus* 25, 2 : 157-167.
- SPALDING (D. B.) et SVENSSON (U.). 1976. — Development and erosion of the thermocline. *Seminar Internat. Centre Heat Mass Transfert* : 1-16.
- THOMANN (R. V.), DI TORO (D. M.) et O'CONNOR (D. J.). 1974. — Preliminary model of Potomac estuary phytoplankton. *J. environmental engineering division* : 699-715.
- VOLLENWEIDER (R. A.). 1965. — Calculation models of photosynthesis. Depth curves and some implications regarding day rate estimates in primary production measurements. *Proc. IBP Symposium on primary productivity in aquatic environments*, Pallanza, Italy : 425-457.