Prévision et reconstitution par modélisation numérique des concentrations de matières en suspension et d'oxygène dissous dans le Blavet à la fin de la vidange décennale du lac de Guerlédan (septembre 1985)

Ph. Gosse

*Electricité de France. Département
Environnement aquatique et atmosphérique
6, quai Watier – 78400 Chatou – France*

Résumé. — On présente la schématisation, les phases de calibration et les principaux résultats d'un modèle numérique de matières en suspension (MES) et d'oxygène dissous développé sur le Blavet pour répondre aux deux objectifs suivants :

- donner avant l'opération de vidange une estimation majorante du maximum des concentrations de MES en fin de vidange du lac de Guerlédan, un peu plus de un kilomètre en aval du barrage, à la sortie des deux bassins de compensation ;
- mettre au point après l'opération de vidange un outil utilisant les mesures ponctuelles réalisées, et visualisant en continu l'évolution spatio-temporelle des MES et de l'oxygène dissous en fin de vidange sur le tronçon de vingt-deux kilomètres compris entre le barrage de Guerlédan et la ville de Pontivy.

Utilisant les mesures collectées lors des vidanges des réservoirs de la Bourboule et de Confolent (1983), la première application du modèle — ou application prévisionnelle — s'est avérée efficace dans la mesure où le majorant annoncé — 1 g/l — de MES à la sortie du deuxième bassin de compensation n'a pas été dépassé dans la réalité. Elle a d'autre part permis d'examiner les possibilités d'amélioration temporaire de la qualité de l'eau du Blavet par transit du débit vidangé via le canal de Nantes à Brest. Outre ses capacités d'extension de la vision géographiquement limitée donnée par les mesures de MES et d'oxygène dissous réalisées en fin de vidange du lac de Guerlédan, la deuxième application du modèle — ou application descriptive — met en relief plusieurs échelles de vitesse de sédimentation des MES. Elle nous permet d'autre part d'estimer à 1 cm/s l'ordre de grandeur de la vitesse de dépôt de la majeure partie des MES sortant du barrage de Guerlédan au moment des plus fortes concentrations, et d'évaluer à moins de 0,02 mg/l/minute et moins de 0,004 mg/l/minute les consommations chimiques et biologiques d'oxygène dissous dans la colonne d'eau, respectivement 0,65 et 1,3 km en aval du barrage.

Abstract. – The schematization, calibration phases and principal results are presented of a numerical model of suspended solids and dissolved oxygen developed on the Blavet with a twofold objective :

— prior to draining, to provide an estimate of the upper limit of the concentrations of suspended solids to be found at the end of draining of Guerlédan lake, a little over one kilometre below the dam, at the outlet of the two regulating reservoirs ;

— once draining is completed, to perfect a computer tool capable of using the local measurements taken and visualizing continuously the space-time evolution of suspended solids and dissolved oxygen at the end of draining, on the twenty-two kilometre stretch between Guerlédan dam and Pontivy.

Using measurement data collected during draining of the La Bourboule and Confolent reservoirs (1983), the first application – or predictive application – of the model proved effective, given that the upper-limit value predicted – 1 g/l of suspended solids at the outlet of the second regulating reservoir – was not exceeded in actual fact. It was also possible to examine possibilities for temporary improvement of the water quality in the Blavet, by conveying the drained flow via the Nantes-Brest canal.

In addition to its capacity for extending the geographically limited vision given by suspended solids and dissolved oxygen measurements, the second application of the model – or descriptive application – points up several ranges in suspended solids sinking rate. It further permits us to estimate at roughly 1 cm/s the settling rate for most suspended solids released at Guerlédan dam at the time of greatest concentrations, and to evaluate chemical and biological consumption of dissolved oxygen in the water column at less than 0.02 mg/l/minute and less than 0.004 mg/l/minute at respective distances of 0.65 and 1.3 kilometres below the dam.

1. – INTRODUCTION

Dans le cadre d'une convention tripartite EDF – Ministère de l'Industrie – Ministère de l'Environnement signée le 1^{er} juillet 1982, la Direction des Etudes et Recherches d'EDF a lancé un programme d'études pour mieux connaître l'impact des vidanges des réservoirs de barrage sur les écosystèmes aquatiques. Il s'est conclu par la proposition de recommandations pour limiter cet impact (Cardinal, 1988).

Le suivi de la vidange décennale du lac de Guerlédan en septembre 1985 a constitué une action de ce programme et a été réalisé en concertation avec le Groupe Mixte d'Exploitation de Bretagne.

Au début de l'année 1985, il a été décidé :

1. de concevoir un dispositif permettant de récupérer les poissons à la sortie du barrage de Guerlédan au cours de la vidange, appareillage qui s'est révélé efficace et a permis d'extraire 18 tonnes de poissons, 7 tonnes – soit 40% – ayant été remis à l'eau à l'amont du lac (notamment 1,2 tonne de sandres et brochets)

2. d'étudier les caractéristiques physico-chimiques des sédiments du lac, et de définir un programme de mesures de la qualité des eaux de la rivière Blavet à la sortie du barrage au cours de la vidange, en portant l'effort principal sur la période de fin de vidange, moment critique mis en

évidence par les suivis de vidange précédents.

3. de donner avant l'opération de vidange (étape prévisionnelle), une estimation majorante du maximum de concentrations de matières en suspension susceptible d'être observé en fin de vidange 1,3 kilomètre en aval du barrage, là où commence l'écoulement rivière proprement dit (figs. 1 et 2)

4. une fois la vidange terminée (étape descriptive), de mettre au point un outil exploitant les mesures ponctuelles de qualité d'eau réalisées et capable de visualiser l'évolution des concentrations de matières en suspension et d'oxygène dissous dans le Blavet en fin de vidange, sur tout le tronçon de 22 kilomètres compris entre le barrage de Guerlédan et l'entrée de la ville de Pontivy, lieu d'implantation d'une prise d'eau de station de production d'eau potable.

Pour traiter les points 3 et 4 nous avons mis au point un modèle numérique déterministe de qualité d'eau, dont les caractéristiques et les principaux résultats sont présentés dans cet article. Par commodité, les applications du modèle aux questions 3 et 4 seront appelées respectivement application prévisionnelle et application descriptive.

2. - IMPACT TYPE D'UNE VIDANGE

Vidanger complètement un lac artificiel (dit aussi réservoir de barrage), c'est en retirer toute l'eau stockée par ouverture des vannes de fond du barrage.

Cette opération remet en suspension dans l'eau une petite partie des couches superficielles des sédiments déposés dans le lac depuis sa mise en eau. Les concentrations de matières en suspension (MES) augmentent alors temporairement dans la rivière aval, en y provoquant des déficits d'oxygène dissous et en y apportant des éléments indésirables en excès (ammoniaque, fer, manganèse, parfois métaux lourds et pesticides). Cet ensemble de facteurs est de nature à gêner certains usages de l'eau comme par exemple la fabrication d'eau potable ou à entraîner des mortalités piscicoles. En particulier, les poissons sont sensibles aux valeurs prises par les concentrations de MES et d'oxygène dissous (Garric *et al.*, 1986, Rofes *et al.*, 1991).

Deux types de vidange complète doivent être distingués :

- les vidanges qui concernent les grands barrages, soumis selon les réglementations françaises (circulaire n° 70/15 du 14 août 1970) à des obligations de visites décennales. L'opération de Guerlédan qui fait l'objet de notre article entre dans cette catégorie.

- les vidanges réalisées à une fréquence inférieure à la décennie dans des bassins versants à fort taux d'érosion (barrages de l'Isère et du Rhône par exemple). L'objectif essentiel est de limiter l'envasement des réservoirs. A l'inverse des vidanges du type précédent, une période à hydraulicité élevée est recherchée en sorte que les débits entrant dans le lac vide ou presque vide puissent entraîner

une partie des vases déposées depuis la vidange précédente.

Les nombreuses campagnes de mesures effectuées par EDF dans le cadre de la convention tripartite ont permis d'identifier trois phases possibles de fortes concentrations de matières en suspension dans une rivière, à l'aval d'un lac vidangé (Rambaud *et al.*, 1988; Bouchard et Cardinal, 1986) :

- la première de courte durée apparaît parfois au moment de l'ouverture des vannes de fond (élimination du cône d'envasement proche des vannes).

- la deuxième – généralement de plusieurs heures – survient en fin de vidange proprement dite, lors de l'évacuation des toutes dernières réserves d'eau du lac.

- la troisième concerne toute la période qui suit, pendant laquelle le lac est à sec. La circulation de l'eau dans ce dernier – débit entrant s'encaissant dans les vases déposées dans l'ancien lit et pluies lessivant les sédiments mis à nu – est capable dans certains cas de provoquer épisodiquement des pics de matières en suspension dans l'eau de sortie.

Un moyen de limiter l'importance de cette troisième phase lors d'une vidange décennale, est de se placer en période de faible hydraulité, comme cela a été le cas pour l'opération de

Guerlédan. Les débits à l'entrée du lac ($1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne au mois d'octobre, valeur à comparer au débit moyen interannuel voisin de $10 \text{ m}^3/\text{s}$) et les précipitations (35 mm en octobre) sont restés faibles entre la mise à sec (27 septembre 1985) et la remise en eau (15 novembre 1985) du lac.

La figure 3 montre que dans le cas de Guerlédan la troisième phase a eu un impact limité comparativement à la deuxième phase, ce qui justifie a posteriori l'effort de mesures de qualité d'eau et de modélisation concentré sur la fin de vidange. On note que l'ouverture des vannes de fond le 2 septembre n'a pas induit de concentrations élevées de MES.

3. – PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SITE MODÉLISÉ

Situé au centre de la Bretagne ($48^\circ 12'$ Nord, $3^\circ 1'$ Ouest) à la limite des départements du Morbihan et des Côtes d'Armor, le barrage de Guerlédan a été édifié en 1930 sur la rivière Blavet. Le lac de Guerlédan créé à l'amont a une capacité estimée de 51 hm^3 pour une cote maximale du plan d'eau de 123,97 m NGF.

Fig. 1. – Le Blavet en aval du barrage du lac de Guerlédan : le domaine de modélisation est le tronçon de 22 kilomètres compris entre le barrage de Guerlédan et l'entrée de la ville de Pontivy.
Fig. 1. – The Blavet downstream of the Guerlédan lake dam : the scope of the area modeled is the 22-kilometre stretch between Guerlédan dam and the outskirts of the city of Pontivy.

Fig. 3. – Moyennes journalières des concentrations de matières en suspension (MES) dans l'eau à la sortie du barrage de Guerlédan entre le 26 août 1985, début de l'abaissement du plan d'eau du lac (par turbinage puis ouverture des vannes de fond) et le 15 novembre 1985, date de la remise en eau du lac. Valeurs obtenues à partir de prélèvements effectués à une fréquence de 8 heures à l'aide d'un appareil automatique ISCO. On positionne sur la figure les trois phases possibles de fortes valeurs de MES au cours d'une vidange. Dans le cas de Guerlédan, la phase 2 ou fin de vidange apparaît nettement plus critique que les autres phases, ce qui justifie a posteriori l'effort de mesures et de modélisation concentré sur cette période. A l'entrée du lac, un autre appareil ISCO réglé sur la même fréquence n'a révélé aucune concentration de MES supérieure à 13 mg/l entre le 26 août et le 1^{er} novembre, pour un débit compris entre 1,3 et 2,5 m³/s au cours de cette période.

Fig. 3. – Daily averages for suspended solids concentrations in water released at Guerlédan dam between August 26, 1985, at the beginning of lowering of the water level (by turbinage and later opening of the bottom gates), and November 15, 1985, at the start of refilling of the lake. Values were obtained on the basis of sampling performed every 8 hours using an automatic ISCO device. The figure indicates the three possible phases of high suspended solids values during draining. In the case of Guerlédan lake, phase 2, or the end of draining, appears to be far more critical than the other phases, which justifies a posteriori the effort at measurement and modeling during that period. Another ISCO device placed at the lake inlet and regulated at the same frequency revealed no suspended solids concentrations in excess of 13 mg/l between August 26 and November 1, for a flow rate of between 1.3 and 2.5 m³/s during the same period.

Equipé de 4 turbines Francis doubles à axe horizontal, l'usine située au pied du barrage a une puissance maximale en exploitation de 15 MW, pour une hauteur de chute brute maximale de 42,45 mètres et un débit turbiné maximal de 49 m³/s.

Le secteur modélisé est le tronçon du Blavet de 22 kilomètres compris entre le barrage de Guerlédan et l'entrée de la ville de Pontivy, au barrage des Récollets.

Au début de l'exploitation de l'usine (1931-1932) un seul bassin de compensation régularisait le débit à l'aval du barrage. Aménagé sur un tronçon du Blavet de près de 650 mètres, sa capacité utilisable était proche de 60000 m³ entre les cotes extrêmes 79,60 et 81,57 m NGF.

Pour étendre les possibilités de régularisation, un deuxième bassin de compensation a par la suite été aménagé en aval du premier, sur un tronçon du Blavet long de 640 mètres. A la cote maximale de retenue de 81,0 m NGF, il offre une capacité de 280000 m³.

La partie haute du barrage du premier bassin ayant été retirée, le volume maximal utilisable dans le premier bassin a diminué. Cependant, la capacité totale des deux bassins réunis dépasse 320000 m³ pour la cote maximale de retenue de 81,0 m NGF.

Cette réserve d'eau permet de répondre à la contrainte d'un débit mi-

nimal de 2,5 m³/s à l'aval du deuxième bassin de compensation.

La présence d'un seuil de cote 79,6 m à la frontière des deux bassins permet d'assurer le maintien de la cote nominale de 79,5 m NGF dans le canal voisin – dit de Nantes à Brest – entre les écluses de Guerlédan et de Quenécen. Pour une cote de surface supérieure à 79,6 m, la communication des eaux entre les deux bassins de compensation s'effectue par l'intermédiaire de deux vannes. Toutefois, il n'y a pas de régulation du niveau de l'eau à cet endroit, la vanne en rive droite étant toujours ouverte en grand. Cette dernière offre une largeur d'échange de près de 5 mètres.

Placé dans le canal à un kilomètre en aval de l'écluse de Guerlédan, un déversoir – constitué de poutrelles mobiles – permet de vider dans le Blavet le trop plein du canal (notamment l'apport du ruisseau de Kériel).

8 barrages jalonnent le cours du Blavet entre la sortie du deuxième bassin de compensation et la limite aval du secteur modélisé distantes de 20,5 km. Mis à part le barrage amont de Poulhibet, ces barrages sont flanqués d'une écluse et permettent de maintenir une hauteur d'eau suffisante dans le canal de Nantes à Brest. Ce dernier rejoint le Blavet 4 kilomètres en aval du deuxième bassin de compensation et emprunte son cours jusqu'à Pontivy.

* Cette contrainte ne s'applique pas lorsque le niveau d'eau dans le lac de Guerlédan est trop bas-cas des vidanges et des sécheresses).

Sur la figure 1, on indique les cotes normales de retenue d'eau de ces barrages, informations fournies par la DDE de Pontivy.

4. - PARTITION DU DOMAINE DE MODÉLISATION ET DONNÉES GÉOMÉTRIQUES

Compte tenu des caractéristiques morphologiques du site et des questions prévisionnelle et descriptive posées, le secteur de modélisation a été décomposé en 4 sous-secteurs : le premier bassin de compensation ; le deuxième bassin de compensation ; le Blavet à l'aval du deuxième bassin, que, par commodité nous appellerons Blavet aval ; et le tronçon de 1 km du canal de Nantes à Brest compris entre l'écluse de Guerlédan et le déversoir où se vide - en direction du Blavet - le trop plein du canal. Ce quatrième sous-secteur est appelé tronçon canal par commodité.

Cette partition du domaine rend possible l'examen de l'effet bénéfique éventuel sur la qualité de l'eau du Blavet aval, d'un court-circuitage temporaire du deuxième bassin de compensation, par détournement de l'écoulement amont via le canal. Ce court-circuitage n'est examiné que dans l'application prévisionnelle du modèle, puisqu'il n'a pas eu lieu dans l'opération réelle de vidange.

Autrement dit, suivant les cas, faire fonctionner le modèle de qualité d'eau sur l'ensemble du domaine d'étude consiste à faire tourner en cascade

trois ou quatre sous-modèles (sous-modèle dits couplés).

Du fait de la faible profondeur de l'écoulement (partout inférieure à 5 mètres) on a considéré le milieu homogène verticalement.

Le type de maillage de calcul retenu pour les bassins de compensation et le Blavet aval est présenté aux chapitres 5 et 6. Le tronçon canal - schématisé comme un milieu de volume V de 19000 m³ et de profondeur de 1,2 mètre - n'est pas maillé. Dans le modèle, sa fonction est de faire transiter une masse d'eau en un temps $t = V/Q$, avec Q débit passant dans le canal.

La consultation des plans disponibles à l'usine de Guerlédan nous a permis d'avoir une idée assez précise de la géométrie des deux bassins de compensation. Pour l'anecdote, on retiendra que ces plans fournissent une altitude cotée en référence à l'échelle de Bourdalou, qui fournit des valeurs supérieures de 1,08 m à l'échelle NGF. Par commodité, cette référence - encore utilisée aujourd'hui à l'usine pour les cotes de plan d'eau - est conservée dans les sous-modèles des deux bassins.

Dans le sous-modèle du Blavet aval, une forme trapézoïdale a été retenue pour la section en travers, les largeurs au plafond et les pentes des berges ayant été localement déterminées sur la base des profils en travers mesurés en mai 1985 (tableau 1). A partir des cotes normales de retenues d'eau aux barrages fournies par la DDE de Pontivy et des sondages effectués en mai

Tableau 1. — Résultats des mesures de profondeur d'eau effectuées sur plusieurs transversales du Blavet entre St Aignan et Pontivy. Données collectées le 21 mai 1985 pour un débit de 8 m³/s à l'aval du 2^e bassin de compensation. L'emplacement des sections de mesures est repéré par rapport au barrage de Guerlédan (pk = point kilométrique).

Table 1. — Results of readings of water depth on several cross-sections of the Blavet between St. Aignan and Pontivy. Data collected on May 21, 1985, for a flow rate of 8m³/s downstream of the second regulating reservoir. Location of the cross-sections is given in relation to Guerlédan dam (pk = kilometric point).

Emplacement de la section de mesures	Distance à partir de la rive gauche en mètres	Profondeur de l'eau en mètres	Emplacement de la section de mesures	Distance à partir de la rive gauche en mètres	Profondeur de l'eau en mètres
pk 4,1	1,5	1,05	pk 15,4	0,5	0,55
	3,0	1,2		4,5	2,15
	8,0	1,75		9,5	2,2
(180 mètres en amont du barrage de Poulhibet-Le Pont Brun)	13,0	2,75	(280 mètres en aval du barrage du Porzo)	14,5	1,9
	18,0	2,3		19,5	1,25
	21,0	1,55		23,5	1,35
	22,0	0,75		28,5	1,4
	23,0	0 (R.D)		30,5	1,15
				32,5	0 (R.D)
pk 6,5	1,6	1,4	pk 17,9	1,0	0,7
	2,6	1,7		2,5	1,6
	7,6	1,8		7,5	3,25
	12,6	2,4		12,5	3,6
(300 mètres en amont du barrage de Boloré)	17,6	2,45		17,5	3,55
	22,6	2,5	(60 mètres en amont du barrage de Guernal)	22,5	3,5
	27,6	2,1		27,5	3,3
	32,6	0,9		32,5	3,3
	33,6	0 (R.D)		37,5	2,4
				39,5	1,7
				40,5	1,3
				41,5	1,15
				43,5	0 (R.D)
pk 8,1	1,0	0,9	pk 19,8	1,0	0,5
	2,0	1,75		2,0	0,8
	7,0	2,05		3,5	1,2
	12,0	2,05		8,5	2,05
	17,0	2,0		13,5	2,65
(370 mètres en amont du barrage de Stumo)	22,0	1,85		18,5	2,95
	27,0	0,7		23,5	3,05
	28,0	0 (R.D)	(340 mètres en amont du barrage de La Cascade)	28,5	3,2
				33,5	3,2
				38,5	2,6
				43,5	0,4
				44,0	0 (R.D)
pk 14,8	0,5	0,7			
	2,5	1,9			
	5,5	2,75			
	10,5	3,05			
	15,5	2,85			
(275 mètres en amont du barrage du Porzo)	20,5	2,6			
	25,5	1,85			
	28,5	1,5			
	29,5	1,45			
	30,5	0 (R.D)			

R.D = rive droite

1985 aux différents barrages, le profil en long du fond de la rivière a été reconstitué, la pente étant supposée constante entre deux barrages.

5. – STRUCTURE GÉNÉRALE DES SOUS-MODELES DES BASSINS DE COMPENSATION

Ce sont les résultats de la campagne de traçage du 23 mai 1985 et le souci de disposer d'un outil relativement maniable et prêt avant le début de la vidange qui ont conduit au choix de la méthode de calcul et du type de maillage dans les deux bassins de compensation.

5.1. Enseignement de la campagne de traçage

Le 23 mai 1985, on a lâché instantanément un volume de 18 ml d'une solution de Rhodamine WT très près de la sortie de circuits de turbinage de l'usine de Guerlédan, alors que le débit était de $11 \text{ m}^3/\text{s}$ et le niveau du plan d'eau du deuxième bassin de compensation de 80,0 m NGF. Le déplacement du colorant en sub-surface dans le sens longitudinal et latéral a été suivi à l'aide de sept appareils préleveurs automatiques ISCO installés en aval – dont cinq sur des plates formes flottantes – et d'un fluoromètre TURNER utilisé pour analyser les échantillons. (fig. 2).

Dans le deuxième bassin de compensation, les résultats ont clairement mis en évidence l'écoulement privilégié en rive gauche, à l'emplacement du lit originel de la rivière. Ces observations nous ont conduit à adopter pour le modèle le principe d'un découpage du deuxième bassin en deux secteurs : un secteur rive gauche dans lequel s'effectue l'advection des masses d'eau et un secteur rive droite n'ayant que des échanges dispersifs avec le reste du bassin.

5.2. Méthode de calcul retenue

Nous avons utilisé la méthode de Lepetit (1979) qui consiste, en fonction des caractéristiques globales de l'écoulement et la cinétique de dégradation ou de transformation d'un ou plusieurs constituants de l'eau, à décomposer le domaine étudié en un certain nombre de cellules supposées homogènes, à formuler les échanges par advection et dispersion entre les cellules et à calculer la variation au cours du temps de la concentration moyenne de ces constituants dans chaque cellule.

Pour une variable de qualité d'eau C, le principe du calcul sous forme discrétisée est d'aborder dans chaque cellule et pour chaque pas de temps Δt une étape de détermination du volume et de la profondeur d'eau (en fonction des débits) et les deux étapes couplées suivantes :

a) calcul de la transformation de C au cœur de la cellule ; pour une variable ayant une cinétique de dégra-

dation du premier ordre, l'équation peut s'écrire :

$$C_i(t + \Delta t) = C_i(t) - K \cdot C_i(t) \cdot \Delta t$$

avec i indice de la cellule

t temps

K vitesse de dégradation (s^{-1}) du constituant

c'est une forme discrétisée de l'équa-

tion classique $\frac{\partial C}{\partial t} = -K \cdot C$. Pour une

variable de qualité d'eau quelconque, l'équation s'écrit

$$\frac{\partial C}{\partial t} = F \quad (\text{équation 1})$$

avec F (s^{-1}) fonction écologique de production ou de disparition de C pendant l'unité de temps au sein d'une masse d'eau

b) calcul de l'évolution de C sous l'effet des échanges par advection et dispersion.

Cette évolution s'écrit :

$$C_i(t + \Delta t) = C_i(t) + \frac{\Delta T}{V_i} \left[\sum_{j=1}^n QD_{ij} \cdot (C_j(t) - C_i(t)) + \sum_{j=1}^n \alpha \cdot QA_{ij} \cdot C_j(t) + \sum_{j=1}^n \beta \cdot QA_{ij} \cdot C_i(t) \right]$$

avec n nombre de cellules

V_i volume (m^3) de la cellule au temps t

QA_{ij} débit (m^3/s) échangé par advection au cours du pas de temps entre les cellules i et j et compté positif s'il va de la cellule j vers la cellule i . Non nul dans le premier bassin et en rive gauche du deuxième, QA_{ij} est déterminé à partir des débits lâchés au bar-

rage et de la variation de la cote de surface du deuxième bassin

QD_{ij} débit (m^3/s) échangé par dispersion au cours du pas de temps entre les cellules i et j ; pris égal au produit d'un coefficient de dispersion $K_d(m^2/s)$ indépendant du temps par la moyenne des profondeurs des deux cellules au temps t

$\alpha = 1$ et $\beta = 0$ si $QA_{ij} > 0$

$\alpha = 0$ et $\beta = 1$ si $QA_{ij} < 0$

$QA_{ij} = QD_{ij} = 0$ si les cellules i et j ne sont pas communicantes ou si $i = j$

La géométrie des bassins de compensation étant connue, il y a trois paramètres de calibration dans l'étape b : le nombre de cellules n , le pas de temps Δt qui doit être suffisamment petit, et le coefficient de dispersion K_d .

5.3. Calibration à l'aide des résultats du traçage

En adoptant l'hypothèse – réaliste à l'échelle de temps considérée – d'une absence de transformation de la Rhodamine dans l'eau, la campagne de traçage de mai 1985 rend possible l'ajustement des paramètres de calibration de l'étape b du calcul (voir § 5.2).

Nous avons donc fait tourner le modèle en simulant le lâcher de Rhodamine dans les conditions de débit

et de niveau d'eau du jour de traçage (voir § 5.1).

Après un premier essai peu concluant d'un découpage en 6 cellules du deuxième bassin de compensation (notées A à F sur la figure 5 et le tableau 2), le choix d'un système à 34 cellules pour les deux bassins (figs. 4 et 5) et d'un pas de temps de calcul de 1 minute s'est révélé nécessaire pour obtenir un écart acceptable entre les résultats du calcul et les mesures à la sortie des deux bassins de compensation (fig. 6).

L'ajustement du coefficient de dispersion conduit au choix $K_d = 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$.

6. – STRUCTURE GÉNÉRALE DU SOUS-MODÈLE BLAVET AVAL

Ne présentant pas de zones larges comme le deuxième bassin de compensation, une hypothèse d'homogénéité transversale a été retenue pour le sous-modèle Blavet aval.

6.1. Modélisation préalable des caractéristiques vitesse-profondeur

Les débits de la rivière constituent des fonctions de forçage du modèle.

Tableau 2. – Schématisation de la géométrie des 6 domaines A à F (voir figure 5) du 2^{ème} bassin de compensation de Guerlédan, en fonction de la cote A du plan d'eau exprimée en unité BOURDALOU (supérieure de 1.08 m à la cote NGF). Valable pour A compris entre 80.4 et 82.1 m c'est à dire entre 79.32 et 81.02 m NGF).

Table 2. – Geometric schematization of the 6 areas from A to F (see Fig. 5) in the second Guerlédan regulating reservoir, as a function of the A water-level reading of the reservoir expressed in Bourdalou units (1.08 m. higher than the NGF reading). Valid for A between 80.4 and 82.1 m., or 79.32 and 81.02 m. NGF.

Domaine	Volume (m ³)	Profondeur moyenne (m)
(A)	$11614 + (26100 \cdot (A - 80.4))$	A - 79.67
(B)	$\begin{array}{l} \text{si } A \geq 80.8 \\ 11650 + (26100 \cdot (A - 80.8)) \\ \hline \text{si } A < 80.8 \\ 14708 \cdot (0.09 + (A - 80))^2 \end{array}$	A - 80.00
(C)	$13900 + (18050 \cdot (A - 80))$	A - 79.20
(D)	$6680 + (18050 \cdot (A - 80))$	A - 79.60
(E)	$17850 + (14000 \cdot (A - 80))$	A - 78.72
(F)	$12250 + (14000 \cdot (A - 80))$	A - 79.12

Fig. 4. — Maillage retenu dans le modèle pour le premier bassin de compensation (quatre cellules homogènes). Il y a échange par advection et dispersion entre les cellules.

Fig. 4. — Mesh retained for the model of the first regulating reservoir (4 homogeneous cells). Exchange is by advection and dispersion between cells.

Fig. 5. — Maillage retenu dans le modèle pour le deuxième bassin de compensation (6 grands domaines et 30 cellules homogènes). Il y a échange par advection (flèches) et par dispersion entre les 15 cellules en rive gauche. Les cellules en rive droite n'échangent que par dispersion avec le reste du bassin.

Fig. 5. — Mesh retained for the model for the second regulating reservoir (6 large areas and 30 homogeneous cells). There is exchange by advection (arrows) and dispersion between the 15 left-bank cells. The right-bank cells exchange with the rest of the reservoir by dispersion only.

Un modèle annexe a été développé pour calculer pour tout débit, la vitesse et la profondeur moyennes de la rivière dans des mailles de 100 mètres de long.

L'équation résolue par ce modèle est la suivante :

$$\frac{\partial h}{\partial x} = i - \frac{Q^2}{C^2 \cdot S^2 \cdot R_h} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{2g \cdot S^2} \right)$$

avec x : abscisse sur l'axe longitudinal de la rivière,

h : hauteur d'eau maximale dans la section,

i : pente du fond,

Q : débit du cours d'eau dans la section considérée S ,

R_h : rayon hydraulique,

C : coefficient de Chézy déterminé par la formule de Bazin,

g : accélération de la pesanteur.

Cette équation est appliquée successivement dans chacun des intervalles compris entre deux barrages, la valeur de h à l'amont immédiat du barrage aval étant une condition limite connue. Le mode de détermination de i et de R_h est abordé dans le chapitre 4.

Le paramètre de calibration de ce modèle est le coefficient de rugosité γ apparaissant dans la formule de Bazin. Ce paramètre a été ajusté grâce aux mesures effectuées au cours de l'opération de traçage à la Rhodamine effectuée le 20 mai 1985 (voir § 6.3).

6.2. Modélisation d'une variable de qualité d'eau

Dans la mesure où les échanges par dispersion sont pris en compte, l'équation d'évolution décrite par le sous-modèle pour une variable de qualité d'eau C s'écrit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(A \cdot K_d \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + F \quad (\text{équation 2})$$

avec u (m/s) vitesse de l'écoulement
 K_d (m²/s) coefficient de diffusion longitudinale

F (s⁻¹) fonction écologique de production ou de disparition de C pendant l'unité de temps au sein d'une masse d'eau

A (m²) section en travers de l'écoulement

Reprenant la méthode de calcul aux différences finies du modèle développé aux Etats Unis par le NCASI, cette équation est résolue à chaque pas de temps dans les 205 mailles de 100 mètres de long qui définissent le secteur d'étude. Le pas de temps de calcul choisi est de 30 secondes, ce qui assure une bonne stabilité numérique dans la gamme des débits considérée.

La résolution est de type implicite. Discrétisée, l'équation s'écrit :

$$a_i C_i^{n+1} + b_i C_i^n + c_i C_{i+1}^n = Z_i$$

avec, pour un tronçon i standard (c'est à dire n'ayant pas un barrage comme limite) :

$$\begin{cases} a_i = - \left[(A \cdot K_d)_{i-1} \frac{\Delta t}{A_i \Delta x^2} + u_{i-1} \frac{\Delta t}{\Delta x} \right] \\ b_i = 1 + \left[(A \cdot K_d)_i + (A \cdot K_d)_{i-1} \frac{\Delta t}{A_i \Delta x^2} \right] \\ c_i = - (A \cdot K_d)_i \frac{\Delta t}{A_i \Delta x^2} \\ Z_i = C_i^n \end{cases}$$

(avec n indice de pas de temps)

Fig. 6. — Calibration de la partie transport du modèle de qualité d'eau dans les deux bassins de compensation : simulation du lâcher instantané de 18 ml d'une solution de Rhodamine WT effectué le 23 mai 1985 au barrage de Guerlédan à la sortie des circuits de turbinage (débit de $11 \text{ m}^3/\text{s}$ et niveau de 80,0 m NGF pour la surface du deuxième bassin). Comparaison calcul-mesures du facteur de dilution de la solution mère à la sortie immédiate des deux bassins. Le facteur de dilution est le rapport : volume de solution mère se trouvant dans l'échantillon prélevé à la sortie du bassin/volume total de l'échantillon. L'origine des temps est le moment du lâcher de la solution de Rhodamine.

Fig. 6. — Calibration of the transport part of the water-quality model in the two regulating reservoirs : simulation of the instantaneous release of 18 ml of a Rhodamine WT solution on May 23, 1985, at the outlet of the Guerlédan dam turbinage circuits (flow rate of $11 \text{ m}^3/\text{s}$ and water level at 80 metres NGF [standard level in France] at the surface of the second reservoir). Comparison of calculations and actual readings for the dilution factor of the initial solution at the outlet of the two reservoirs. The dilution factor is the ratio between volume of the initial solution in the sample taken at the outlet of the reservoir, and the total volume of the sample. The time axis origin is the instant of release of the Rhodamine solution.

Ce système d'équations peut s'écrire sous forme matricielle :

$$[T] \cdot [E] = [B]$$

où T est une matrice carrée tridimensionnelle d'ordre 205
E un vecteur de dimension 205

dont les composantes sont les valeurs de la variable C au temps $t + \Delta t$

B un vecteur de dimension 205 dont les composantes sont les valeurs de la variable C au temps t.

Ce système matriciel est résolu par inversion de la matrice T par un processus d'élimination gaussien.

Le coefficient de diffusion longitudinale K_d est calculé par l'équation suivante proposée par le modèle NCASI :

$$K_d = \frac{0.011 \cdot Q^2}{h^3 \cdot \sqrt{g \cdot h \cdot i}}$$

avec Q débit (m^3/s) ; g accélération de la pesanteur ($m \cdot s^{-2}$) ;

h hauteur de la colonne d'eau (m) et i pente du fond.

6.3. Calibration à l'aide des résultats du traçage

Un volume de 250 ml d'une solution de Rhodamine WT a été injecté instantanément dans le Blavet le 20 mai 1985 à la sortie du deuxième bassin de compensation. Un fluoromètre enregistreur TURNER muni d'un système de pompage en continu a été placé successivement aux barrages de Boloré et de Guernal pour suivre le passage du colorant.

Ces données ont permis d'une part d'ajuster le coefficient de rugosité γ apparaissant dans le modèle hydraulique et d'autre part de s'assurer que le modèle de qualité d'eau était capable de bien reproduire le déplacement et la dispersion d'un constituant de l'eau (fig. 7).

7. – APPLICATION PRÉVISIONNELLE DU MODÈLE DE QUALITÉ D'EAU

Réalisée au début de l'été 1985, cette application prévisionnelle du modèle avait donc pour but de fournir une évaluation du niveau maximal des teneurs en MES susceptible d'être observé à la fin de la vidange du lac de Guerlédan, c'est à dire lors de la deuxième phase potentiellement critique (voir définition au chapitre 2).

Les résultats obtenus et présentés dans ce chapitre ont été exposés dans une note écrite remise au GME Bretagne au mois d'août 1985 (note EDF/EPEE/85 n° 25).

7.1. Hypothèse sur les concentrations de MES à la sortie du barrage

Le principal obstacle à la prévision de l'évolution des concentrations des matières en suspension dans une rivière à l'aval d'un barrage vidangé est l'inconnue sur leur niveau possible à la sortie du barrage.

Prévoir ce dernier niveau suppose en effet la mise à disposition d'un modèle d'érosion du lac vidangé, tâche difficilement réalisable actuellement, vu la complexité de certains processus à décrire : entraînement des vases et éboulement des bancs de dépôt mis hors d'eau lors de la vidange (Bouchard et Cardinal, 1986).

Comparativement, la modélisation des principaux mécanismes en jeu

Fig. 7. — Calibration de la partie transport du modèle de qualité d'eau dans le Blavet à l'aval du deuxième bassin de compensation : simulation du lâcher instantané de 250 ml d'une solution de Rhodamine WT effectué le 20 mai à l'aval immédiat du deuxième bassin, pour un débit de 8 m³/s pendant les 16 premières heures suivant l'injection, de 9 m³/s pendant les huit heures suivantes et de 10 m³/s ensuite. Comparaison calcul-mesures du facteur de dilution de la solution mère à proximité des barrages de Boloré et de Guernal, respectivement 5,5 et 16,6 kilomètres en aval du point d'injection. Le facteur de dilution est le rapport : volume de la solution mère se trouvant dans l'échantillon d'eau de la rivière / volume total de l'échantillon. L'origine des temps est le moment du lâcher de la solution de Rhodamine.

Fig. 7. — Calibration of the transport part of the water-quality model in the Blavet downstream of the second regulating reservoir : simulation of the instantaneous release of 250 ml of a Rhodamine WT solution on May 20, just downstream of the second reservoir, with flow rate at 8 m³/s for the first sixteen hours following release, 9 m³/s for the next eight hours and 10 m³/s thereafter. Comparison of calculations and actual readings of the dilution factor of the initial solution near Boloré and Guernal dams, respectively 5.5 and 16.6 kilometres downstream from the point of release. The dilution factor is the ratio between volume of the initial solution in the sample taken in the river, and the total volume of the sample. The time axis origin is the instant of release of the Rhodamine solution.

dans la rivière aval – transport en suspension et dépôt – pose moins de difficultés.

Pour définir les concentrations de MES à la sortie du barrage – ou conditions limites amont du modèle – l'approche retenue a consisté à se placer dans des conditions réelles constatées au cours de vidanges précédentes.

Au moment de l'examen de la question, des résultats de mesures de MES en fin de vidange de réservoirs EDF n'étaient dépouillés que pour deux sites suivis en 1983 : La Bourboule et Confolent.

Les deux courbes mesurées – teneurs en MES en fonction du temps – à la sortie des deux barrages ont été testées successivement comme conditions limites amont du modèle. Si la courbe de Confolent a été utilisée sans modification, une correction a été apportée à celle de La Bourboule afin d'éliminer la phase critique n° 3 de la vidange (voir définition au chapitre 2), sortant du cadre de l'étude* (figs. 8 et 9).

Nous signalions alors que vu l'envasement modéré du lac de Guerlédan mis en évidence par les sondages de début 1985, la phase 2 de la courbe « La Bourboule » était a priori plus représentative que celle concernant la retenue de Confolent, beaucoup plus envasée.

7.2. Autres hypothèses

Le débit a été pris égal à 5 m³/s, ordre de grandeur attendu pour les conditions hydrologiques de fin septembre, période programmée très tôt pour la réalisation de la fin de vidange du lac de Guerlédan.

Le deuxième bassin de compensation a été supposé plein (cote de 81,0 m NGF) pour toutes les simulations à l'exception d'une, dans laquelle une cote de retenue de 80,0 m NGF a été choisie.

On a par ailleurs considéré que le dépôt était le seul processus de production-disparition des MES au sein de la masse d'eau. Ainsi, on retient pour l'équation 1 (voir chapitre 5) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{SED}{H} \cdot C$$

avec C concentration des MES dans l'eau (mg/l)
H profondeur de l'eau (m)
SED vitesse caractérisant la sédimentation des MES dans l'eau (m.s⁻¹).

Afin de ne pas surestimer le dépôt (et donc ne pas sous estimer les concentrations de MES à la sortie du deuxième bassin de compensation), on a pris une valeur standard de SED de 15 m/jour, soit dix fois moins que le niveau de vitesse de chute observé pour quelques échantillons de sédiments prélevés au fond du lac de

* A titre indicatif les résultats d'une simulation complète des phases 2 et 3 sont cependant fournis, en fin de chapitre pour les conditions de La Bourboule, dont la phase 3 était plus accusée que la phase 2.

Fig. 8. — Application prévisionnelle du modèle pour les conditions de Confolent : représentation des conditions limites amont pour la variable matières en suspension (g/l), reconstituées à partir des mesures effectuées à la sortie immédiate du barrage de Confolent, en fin de vidange (ou phase critique n° 2 définie au chapitre 2) du réservoir amont (24-27 juillet 1983). L'origine des abscisses (temps $t = 0$) est l'instant de démarrage du modèle.

Fig. 8. — Predictive application of the model for conditions at Confolent : representation of the upstream boundary conditions for the suspended solids variable (g/l), reconstituted on the basis of measurements taken at the outlet from Confolent dam at the end of draining (or critical phase n° 2 as defined in Chapter 2) of the upstream reservoir (July 24-27, 1983). The origin of the abscissa (time $t = 0$) is the instant of start-up of the model.

Guerlédan en février 1985 et mis en suspension dans une eau au repos. Dans une des simulations effectuée, une valeur de 50 m/jour a été testée.

Enfin, on note que pour les conditions limites type « La Bourboule », un détournement temporaire du débit via le tronçon canal a été considéré dans une des simulations effectuées.

Fig. 9. – Application prévisionnelle du modèle pour les conditions de La Bourboule : représentation des conditions limites amont pour la variable matières en suspension (g/l), reconstituées à partir des mesures effectuées à la sortie immédiate du barrage de La Bourboule lors de la vidange du réservoir amont (28-29 septembre 1983). La courbe complète (trait continu) caractérise à la fois la phase critique (dite n° 2 dans le chapitre 2) de fin de vidange (heures 6h à 8h30) et la phase critique (dite n° 3) lorsque le réservoir est à sec (heures 8h30 à 30h). Pour la simulation unique de la phase 2, on modifie la courbe à partir de 8h30 en choisissant l'évolution linéaire indiquée en pointillé. Le temps $t = 0$ est l'instant de démarrage du modèle.

Fig. 9. – Predictive application of the model for conditions at La Bourboule : representation of the upstream boundary conditions for the suspended solids variable (g/l), reconstituted on the basis of measurements taken at the outlet from La Bourboule dam during draining of the upstream reservoir (28-29 September, 1983). The complete curve (unbroken line) represents both the critical phase (called n° 2 in Chapter 2) at the end of draining (from hour 6 to hour 8.5) and the critical phase (called n° 3) when the reservoir is dry (from hour 8.5 to hour 30). For the simulation of phase 2 only, the curve is modified beginning at hour 8.5, following the linear evolution indicated by the dotted line. Time $t = 0$ is the instant of start-up of the model.

7.3. Résultats

7.3.1. Conditions limites amont « Confolent »

Les résultats du calcul mettent en évidence une baisse importante des teneurs en MES entre le barrage de Guerlédan et la sortie du deuxième bassin de compensation, ce qui illustre le rôle décanteur des deux bassins : on n'observe pas de

concentrations supérieures à 1 g/l à la sortie du deuxième bassin pour une cote de retenue de 81 m NGF, même si le niveau 400 mg/l est dépassé pendant près de 50 heures (fig. 10).

On note que l'eau sortant du deuxième bassin de compensation est moins chargée que celle du premier bassin – au niveau du départ du canal – pendant plus de 4 jours. Pendant cette période, le détournement

Fig. 10. – Application prévisionnelle du modèle en utilisant les conditions limites amont de Confolent (figure 8) : concentrations calculées des matières en suspension (g/l) à la sortie immédiate du premier bassin de compensation (trait pointillé) et du deuxième bassin de compensation (trait continu), pour un débit de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, une cote de surface de 81 m NGF dans le deuxième bassin et une valeur de SED de 15 m/jour. Le temps $t = 0$ est l'instant de démarrage du modèle.

Fig. 10. – Predictive application of the model using upstream boundary conditions of Confolent (Fig. 8) : concentrations calculated for suspended solids (g/l) at the outlet of the first regulating reservoir (dotted line) and of the second regulating reservoir (unbroken line), for a flow rate of $5 \text{ m}^3/\text{s}$, a surface level of 81 m. NGF in the second reservoir, and a value of SED at 15 m/day. Time $t = 0$ is the instant of start-up of the model.

du débit via le canal ne peut donc en aucun cas conduire à une diminution des teneurs en MES dans le Blavet aval.

7.3.2. Conditions limites amont

« La Bourboule »

On observe aussi une diminution importante des teneurs en MES entre le barrage de Guerlédan et la sortie du deuxième bassin de compensation, où le seuil de 0.1 g/l n'est pas dépassé pendant la phase 2 de vidange, pour une cote de retenue de 81.0 m NGF dans le deuxième bassin (fig. 11).

On remarque des niveaux de concentration à peine plus élevés pour une cote de retenue de 80.0 m NGF, la réduction associée du temps de résidence hydraulique étant en partie compensée par la diminution de la profondeur d'eau et donc de la hauteur de décantation (fig. 11).

A l'inverse du cas exploitant les conditions de la vidange de Confolent, il est possible d'envisager très peu de temps après le passage du pic de MES, un abaissement des concentrations de MES dans le Blavet aval, par détournement du débit via le canal. C'est ce qu'illustre la figure 12.

Fig. 11. — Application prévisionnelle du modèle en utilisant les conditions limites amont (*phase 2 uniquement*) de La Bourboule (figure 9) : concentrations calculées des matières en suspension (g/l) à la sortie du deuxième bassin de compensation pour un débit de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, une valeur de SED de 15 m/jour et deux cotes de surface du deuxième bassin : 80 m NGF (courbe en pointillé) et 81 m NGF (courbe en continu). L'origine des abscisses (temps $t = 0$) est l'instant de démarrage du modèle.

Fig. 11. — Predictive application of the model using upstream boundary conditions (*phase 2 only*) of La Bourboule (Fig. 9) : concentrations calculated for suspended solids (g/l) at the outlet of the second regulating reservoir for a flow rate of $5 \text{ m}^3/\text{s}$, a SED value of 15 m/day and two surface levels in the second reservoir : 80 m. NGF (dotted curve) and 81 m. NGF (unbroken curve). The origin of the abscissa (time $t = 0$) is the instant of start-up of the model.

Fig. 12. — Application prévisionnelle du modèle en utilisant les conditions limites amont (*phase 2 uniquement*) de La Bourboule (figure 9) : concentrations calculées des matières en suspension (g/l) à la sortie du deuxième bassin de compensation (au niveau de l'apport du canal) sans (trait pointillé) ou avec (trait continu) utilisation du tronçon de 1 km du canal de Nantes à Brest pour détourner le débit vidangé. Hypothèses d'un débit de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, d'une valeur de SED de 15 m/jour et d'une cote de surface dans le deuxième bassin de compensation de 81 m NGF. L'origine des abscisses (temps $t = 0$) est l'instant de démarrage du modèle. Les valeurs très faibles observées entre les heures 20 et 21 sont explicables par l'hypothèse retenue d'absence de fuites naturelles dans le canal, et donc par la bonne qualité de l'eau de celui-ci avant l'ouverture des vannes des portes d'écluse.

Fig. 12. — Predictive application of the model using upstream boundary conditions (*phase 2 only*) of La Bourboule (Fig. 9) : concentrations calculated for suspended solids (g/l) at the outlet of the second regulating reservoir (at the junction with the canal) without (dotted line) or with (unbroken line) use of the 1-km. stretch of the canal from Nantes to Brest to divert the drained flow. Hypotheses of a flow rate of $5 \text{ m}^3/\text{s}$, a SED value of 15 m/day and a surface level in the second regulating reservoir of 81 m. NGF. The origin of the abscissa (time $t = 0$) is the instant of start-up of the model. The very low values observed between hours 20 and 21 can be explained by the hypothesis retained of an absence of natural leaks in the canal and therefore of good water quality in the canal before opening of the lock-gate paddles at hour 20.

Toutefois, avec l'hypothèse d'une vitesse SED trois fois supérieure — 50 m/jour au lieu de 15 m/jour — l'utilisation du canal apparaît inutile puisque les teneurs en MES à la sortie du deuxième bassin de compensation restent dans ce cas toujours inférieures à celles observées dans le premier bassin.

7.4. Conclusions tirées

A l'issue de ces résultats, deux informations essentielles ont été dégagées à l'intention du GME Bretagne :

— du fait du rôle de décanteur joué par les bassins de compensation, on ne devrait pas observer de teneurs en MES supérieures à 1 g/l à la sortie du deuxième bassin en fin de vidange, c'est à dire au moment

de la phase critique n° 2. On note que ce niveau n'est pas dépassé pour les conditions de La Bourboule si l'on considère aussi la phase critique n° 3 (fig. 13).

— dans certaines conditions (niveau et durée limités du pic de MES à la sortie du barrage de Guerlédan, faible vitesse de dépôt des MES), utiliser le canal de Nantes à Brest pour détourner le débit sur 1 km est un moyen possible d'amélioration temporaire de la qualité de l'eau du Blavet à l'aval du deuxième bassin de compensation.

Remarques

Plusieurs facteurs expliquent pourquoi le détournement du débit via le canal n'a pas été envisagé lors de l'opération réelle de vidange :

— la vétusté des ouvrages hydrauliques* dans le canal (en particulier portes des écluses), faisant redouter un passage de débit important.

— les besoins en personnel pour gérer une telle opération de détournement du débit (déplacement sur place pour ouvrir les portes d'écluses

Fig. 13. — Application prévisionnelle du modèle en utilisant les conditions limites amont complètes (phases 2 et 3) de La Bourboule (figure 9) : concentrations calculées des matières en suspension (g/l) à la sortie immédiate du deuxième bassin de compensation, pour un débit de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, une valeur de SED de 15 m/jour et une cote de surface de 81 m NGF dans le deuxième bassin de compensation.

Fig. 13. — Predictive application of the model using complete (phases 2 and 3) upstream boundary conditions of La Bourboule (Figure 9) : concentrations calculated for suspended solids (g/l) at the outlet of the second regulating reservoir for a flow rate of $5 \text{ m}^3/\text{s}$, a SED value of 15 m/day and a surface level of 81 m. NGF in the second regulating reservoir.

* Cette partie du canal n'est plus utilisée pour la navigation.

et régler les niveaux du déversoir du canal et de la retenue du deuxième bassin; contrôle en quasi-temps réel de la qualité de l'eau afin de débiter ou arrêter au bon moment le détournement).

8. – APPLICATION DESCRIPTIVE DU MODÈLE DE QUALITÉ D'EAU

Rappelons qu'il s'agissait, une fois la vidange achevée, d'exploiter les mesures ponctuelles de qualité d'eau effectuées et de mettre au point un outil capable de visualiser de façon continue l'évolution spatio-temporelle des MES et de l'oxygène dissous en fin de vidange, depuis le barrage de Guerlédan jusqu'à Pontivy.

8.1. Déroulement de la vidange

Le plan d'eau du lac a été abaissé progressivement par turbinage à partir du 26 août 1985 jusqu'au 2 septembre, date d'ouverture des vannes de fond. C'est par ce moyen que la baisse du plan d'eau s'est poursuivie d'abord en accéléré jusqu'au 9 septembre – date d'installation du mur en béton de la pêcherie (photo 1) – puis ensuite au ralenti, pour se placer le 22 septembre dans les conditions souhaitées par les Fédérations Départementales de Pêche des Côtes d'Armor et du Morbihan chargées de la récupération des poissons. Les vannes de fond ont ainsi été fermées le 22 septembre au soir.

Les vannes de fond ont été à nouveau ouvertes le 23 septembre à partir de 7 heures (temps local, soit 5h TU), alors que le volume d'eau restant dans la retenue était voisin de 1 hm^3 . A partir de ce moment que nous avons pris comme temps initial de fonctionnement du modèle, les vannes ont ensuite été réglées selon les instructions du responsable des Fédérations de Pêche jusqu'à la mise à sec du lac réalisé le 25 septembre au soir. Compte tenu du temps de propagation des masses d'eau entre le barrage de Guerlédan et Pontivy, la période de simulation dépasse quatre jours.

La figure 14 présente une reconstitution graphique de l'évolution temporelle du débit à la sortie du barrage en fin de vidange, avec un débit entrant dans le lac estimé à $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette courbe constitue une fonction de forçage du modèle. On note plusieurs séquences ouverture/fermeture de vannes, avec des fermetures nocturnes expliquées par la décision d'éviter le plus possible de travailler de nuit à la récupération des poissons.

La reconstitution de ce débit amont et la mesure régulière de la cote de surface du deuxième bassin de compensation permettent de déterminer le débit du Blavet aval, autre fonction de forçage du modèle en débit (fig. 15).

8.2. Données de qualité d'eau exploitées

Les mesures de qualité d'eau – et principalement de température, MES et oxygène dissous – effectuées en

Photos 1 et 2. – Le Blavet à l'aval immédiat du barrage de Guerlédan en fin de vidange du lac (septembre 1985). Aperçu du dispositif de récupération des poissons.

Photos 1 and 2. – The Blavet immediately downstream of Guerlédan dam at the end of draining of the lake (September 1985). View of the installation for capturing fish.

Fig. 14. – Reconstitution des débits d'eau sortant de la retenue de Guerlédan en fin de vidange, à partir de la connaissance de la manœuvre des vannes de fond et du niveau initial du plan d'eau amont (V = réserve d'eau dans le lac).

Fig. 14. – Reconstitution of water discharge released at Guerlédan dam at the end of draining, on the basis of information regarding the manipulation of bottom gates and initial water level upstream from the dam (V = liquid reserve in the lake).

quelques points au cours de la vidange ont été utilisées pour établir et calibrer la partie qualité d'eau du modèle. Plus précisément, elles ont trois fonctions premières : simplifier préalablement le plus possible le schéma de l'écosystème centré sur les variables MES et oxygène dissous ; définir les conditions limites amont des variables modélisées ; enfin, disposer en plusieurs points aval, de chroniques mesurées de MES et d'oxygène dis-

sous permettant de contrôler le modèle, par génération d'écarts calcul-mesure.

8.2.1. Méthodes de mesures

Les teneurs en matières en suspension ont été mesurées suivant la norme AFNOR T90-105 : filtration sur filtre millipore AP-20 puis dosage par pesée après séchage à 105 °C.

Fig. 15. – Cote mesurée en unités Bourdalou (retrancher 1.08 m pour obtenir la cote NGF) de la surface du plan d'eau du deuxième bassin de compensation et débits reconstitués (avec un pas de temps de une heure sur la figure) à la sortie du deuxième bassin (m^3/s), en fin de vidange du lac de Guerlédan. L'origine des abscisses (temps $t = 0$) est l'instant de démarrage du modèle, soit le 23 septembre 1985 à 5 heures TU.

Fig. 15. – Reading of the water level in the second regulating reservoir, measured in Bourdalou units (subtract 1.08 m. to obtain NGF reading), and flow rates reconstituted (with a time step of one hour on the figure) at the outlet of the second reservoir (m^3/s), at the end of draining of Guerlédan lake. The origin of the abscissa (time $t = 0$) is the instant of start-up of the model, September 23, 1985, at 5 a.m. UT.

Les concentrations d'oxygène dissous ont été mesurées par une méthode électrochimique (norme AFNOR T90-106) en utilisant deux types d'appareils : des oxythermomètres

enregistreurs PONSELLE fournissant des données en continu par impression d'une marque sur un ruban de papier gradué ; deux oxythermomètres « de poche » PONSELLE

Photo 3. – Le lac de Guerlédan à proximité du barrage au cours de la vidange.
Photo 3. – Guerlédan lake near the dam, during draining.

Photo 4. – Camion-laboratoire mis en place près de l'usine de Guerlédan et utilisé pour effectuer les mesures chimiques et de matières en suspension.
Photo 4. – Field lab truck near the Guerlédan plant, used to perform chemical and suspended solids analyses.

Photos 5 et 6. – Eau sortant des vannes de fond du barrage de Guerlédan en fin de vidange.
Photos 5 and 6. – Outlet of the bottom gates at Guerlédan dam at the end of draining.

Photo 7. – Le Blavet en fin de vidange, 2.4 km en aval du barrage de Guerlédan (près du pont de la route départementale D35).

Photo 7. – The Blavet at the end of draining, 2.4 km downstream of Guerlédan dam (near the bridge on the D35 departmental road).

contrôlés deux fois par jour à l'aide de solutions étalon. Utilisés conjointement, ces deux derniers appareils ont permis de corriger les dérives apparaissant sur les oxythermomètres enregistreurs.

La température a été mesurée en utilisant des thermomètres digitaux ou les oxythermomètres PONSELLE.

8.2.2. Simplification du schéma de l'écosystème

Du fait de la forte coloration marron de l'eau du Blavet en fin de vidange, les processus de photosynthèse ne peuvent pas intervenir significativement dans le bilan d'oxygène dissous : les mesures d'oxygène dissous aux différentes stations ne mettent pas en évidence de cycle nyctéméral. On a donc négligé le terme de photosynthèse dans le modèle.

La température de l'eau entre le barrage et Pontivy est restée comprise entre 17 et 20 °C pendant toute la période d'étude. C'est pourquoi, la concentration d'oxygène dissous à saturation C_s — ou valeur d'équilibre entre l'eau et l'atmosphère — a été prise constante dans le modèle et égale à 9,2 mg/l. Ce dernier choix est convenable, compte tenu de l'incertitude des mesures d'oxygène dissous chargées de vérifier le modèle.

D'autre part, sur la base de mesures d'oxygène dissous en amont et aval immédiats de quelques barrages, la formule WPRL (1973) a été adaptée pour représenter l'oxygénation de

l'eau dans les chutes d'eau des barrages du Blavet aval. L'équation retenue s'écrit :

$$C_d = C_s + \frac{C_u - C_s}{2.5}$$

avec C_u et C_d concentrations d'oxygène dissous dans l'eau (mg/l) respectivement en amont et en aval de la chute d'eau.

8.2.3. Définition des conditions limites amont de MES et d'oxygène dissous

Entre le 23 et le 27 septembre, environ 120 mesures de matières en suspension ont été effectuées à la sortie du barrage, dont un tiers le 25 septembre, journée aux eaux les plus chargées. On peut ainsi reconstituer assez précisément les conditions limites amont pour la variable matières en suspension. La figure 16 représente graphiquement ces conditions, qui montrent que le maximum de MES a atteint 6,5 g/l, soit un peu moins que le pic de Confolent et un peu plus que celui de La Bourboule en fin de vidange (voir figs. 8 et 9). La figure 17 donne les conditions limites amont de MES en flux.

Pour définir les conditions limites amont pour la variable oxygène dissous, on a exploité de la façon suivante les données de l'oxythermomètre en continu installé à la sortie du barrage : à chaque demi-heure, on a retranscrit en concentration d'oxygène dissous les valeurs inscrites en continu par le marqueur sur le ruban de papier gradué, en tenant compte de la dérive éventuelle mise en évi-

Fig. 16. — Application descriptive du modèle : conditions limites amont pour la variable matières en suspension (mg/l), reconstituées à partir des mesures réalisées à la sortie immédiate du barrage de Guerlédan en fin de vidange. L'origine des abscisses (temps $t = 0$) est l'instant de démarrage du modèle, soit le 23 septembre 1985 à 5 heures TU.

Fig. 16. — Descriptive application of the model : upstream boundary conditions for the suspended solids variable (mg/l), reconstituted on the basis of the measurements taken at the outlet of Guerlédan dam at the end of draining. The origin of the abscissa (time $t = 0$) is the instant of start-up of the model, September 23, 1985, at 5 a.m. UT.

dence par les oxymètres portatifs. On obtient ainsi une courbe assez précise représentée sur la figure 18, mettant en relief des concentrations d'oxygène dissous très faibles — inférieures à 0,5 mg/l — au moment du passage du pic de MES.

8.2.4. Données de contrôle des résultats du modèle

Pour contrôler les résultats du modèle, on dispose de chroniques MES-oxygène dissous relativement denses en deux stations : le point frontière

Fig. 17. — Application descriptive du modèle : conditions limites amont pour la variable matières en suspension, en flux (kg/s).

Fig. 17. — Descriptive application of the model : upstream boundary conditions for the suspended solids variable expressed in flux (kg/s).

entre les premier et deuxième bassin de compensation (soit 0,65 km en aval du barrage de Guerlédan en suivant le talweg de la rivière) et l'aval immédiat du deuxième bassin de compensation (soit 1,3 km en aval du barrage de Guerlédan en suivant le talweg de la rivière). Ces chroniques de mesures apparaissent sur les figures 19 et 20.

Nous disposons par ailleurs de quelques mesures de MES et d'oxygène dissous effectuées à l'amont immédiat (dans la lame d'eau sur le point de franchir le barrage) des barrages de Boloré (6,8 km en aval du barrage de Guerlédan) et de Guernal (17,9 km en aval du barrage de Guerlédan), données apparaissant sur la figure 21.

Fig. 18. — Application descriptive du modèle : conditions limites amont pour la variable oxygène dissous (mg/l) reconstituées à partir de l'enregistrement en continu (avec correction de la dérive) réalisé à la sortie immédiate du barrage de Guerlédan en fin de vidange. L'origine des abscisses (temps $t = 0$) est l'instant de démarrage du modèle, soit le 23 septembre 1985 à 5 heures TU.

Fig. 18. — Descriptive application of the model : upstream boundary conditions for the dissolved oxygen variable (mg/l), reconstituted on the basis of continuous recordings (with correction for drift) taken at the outlet of Guerlédan dam at the end of draining. The origin of the abscissa (time $t = 0$) is the instant of start-up of the model, September 23, 1985, at 5 a.m. UT.

Ces mesures mettent en évidence le rôle important de décanteur joué par les deux bassins de compensation pour les matières en suspension, et l'impact modéré de la vidange sur l'oxygène dissous au niveau de la sortie du deuxième bassin de compensation. A cet endroit les concentrations de MES sont infé-

rieures à 100 mg/l et les teneurs en oxygène dissous restent supérieures à 5 mg/l.

8.3. Calibration du modèle pour les matières en suspension

Une première tentative a consisté à reprendre le schéma utilisé dans l'ap-

Fig. 19. - Application descriptive du modèle : **résultats** du calcul (trait continu) des matières en suspension, de l'oxygène dissous et de la charge oxydable (L), à la frontière des deux bassins de compensation (0.65 km en aval du barrage de Guerledan) et comparaison avec les mesures (indiquées par des ronds). Notons que MEST (ou matières en suspension totales) = MES1 + MES2 + MES3. L'origine des abscisses (temps $t = 0$) est l'instant de démarrage du modèle, soit le 23 septembre 1985 à 5 heures TU.

Fig. 19. - Descriptive application of the model: **results** (unbroken line) of calculation of suspended solids (MES), dissolved oxygen and oxidizable load (L) at the boundary between the two regulating reservoirs (0.65 km downstream of Guerledan dam), and comparison with actual measurements (presented in circles). Total suspended solids (MEST) = MES1 + MES2 + MES3. The origin of the abscissa (time $t = 0$) is the instant of start-up of the model, September 23, 1985, at 5 a.m. UT.

Fig. 20. — Application descriptive du modèle : résultats du calcul (trait continu) des matières en suspension, de l'oxygène dissous et de la charge oxydable (L), à la sortie immédiate du deuxième bassin de compensation (1.3 km en aval du barrage de Guerlédan) et comparaison avec les mesures (indiquées par des ronds). Notons que MEST (ou matières en suspension totales) = MES1 + MES2 + MES3. L'origine des abscisses (temps $t = 0$) est l'instant de démarrage du modèle, soit le 23 septembre 1985 à 5 heures TU.

Fig. 20. — Descriptive application of the model : results (unbroken line) of calculation of suspended solids, dissolved oxygen and oxidizable load (L) at the outlet from the second regulating reservoir (1.3 km downstream of Guerlédan dam) and comparison with actual measurements (presented in circles). Total suspended solids (MEST) = MES1 + MES2 + MES3. The origin of the abscissa (time $t = 0$) is the instant of start-up of the model, September 23, 1985, at 5 a.m. UT.

Fig. 21. — Application descriptive du modèle : résultats du calcul (trait continu) des matières en suspension totales (MES), de la charge oxydable (L) et de l'oxygène dissous en deux points du Blavet aval, à l'amont immédiat des barrages de Boloré et de Guernal, soit 6.8 et 17.9 km en aval du barrage de Guerlédan. L'origine des abscisses (temps $t = 0$) est l'instant de démarrage du modèle, soit le 23 septembre 1985 à 5 heures TU.

Fig. 21. — Descriptive application of the model : results (unbroken line) of calculation of total suspended solids (MES), oxidizable load (L) and dissolved oxygen at two points on the Blavet downstream, just above Boloré and Guernal dams. 6.8 and 17.9 km downstream of Guerlédan dam. The origin of the abscissa (time $t = 0$) is the instant of start-up of the model, September 23, 1985, at 5 a.m. UT.

plication prévisionnelle, c'est à dire une variable unique – totalisant l'ensemble des matières en suspension – soumise au transport et à une vitesse unique de dépôt représentée par SED (voir § 7.2).

Or il s'est avéré impossible de trouver une vitesse SED permettant de représenter en même temps les courbes mesurées de MES à la sortie de chacun des deux bassins de compensation : une vitesse plus élevée était souhaitable pour la sortie du premier bassin comparativement à la sortie du deuxième. D'où le choix de décomposer les MES en au moins deux compartiments à vitesse de sédimentation différente.

Le choix final s'est finalement porté sur la distinction de trois variables à vitesse de sédimentation différente : en effet, avec deux compartiments, la nécessité de prendre des vitesses SED élevées pour représenter le dépôt des apports de fin de vidange dans les bassins de compensation conduit à une disparition complète des matières en suspension dans le Blavet aval. Or elles ne sont pas nulles dans ce dernier secteur et caractérisent une situation de charge relativement normale, caractéristique d'un écoulement peu perturbé.

Pour satisfaire les exigences de la calibration, nous sommes donc amenés à décomposer les MES de la façon suivante aux conditions limites amont :

— un compartiment MES1 représente l'essentiel des apports de MES

de fin de vidange caractérisé par une vitesse SED1 élevée; il sédimente presque totalement dans les deux bassins de compensation.

— un compartiment MES2 représente une partie des apports de MES de fin de vidange; sa vitesse de sédimentation SED2 est moins élevée que SED1.

— un compartiment MES3 représente des MES de granulométrie fine, du type de celles observées avant la fin de vidange. A l'inverse de MES1 et MES2, il est donc non nul durant toute la simulation. La vitesse SED3 est très faible.

Mise à part la définition – posant peu de difficultés – des conditions initiales (temps $t = 0$) sur tout le tronçon, la calibration du modèle pour les MES consiste donc à répartir l'évolution temporelle des compartiments MES1, MES2 et MES3 à la sortie immédiate du barrage de Guerlédan – sachant que leur somme est une donnée de l'étude – et à ajuster les vitesses SED1, SED2, SED3.

Une réduction acceptable des écarts calcul-mesures aux différents points de la rivière nous amène au choix défini dans le tableau 3. Les résultats du calcul et des mesures sont comparés sur les figures 19 à 21.

8.4. Calibration du modèle pour l'oxygène dissous

Pour la fonction F apparaissant dans les équations 1 et 2 de bilan de masse (voir chapitre 5 et 6), on a dé-

Tableau 3. – Valeur des paramètres de calibration du modèle décrivant les matières en suspension et l'oxygène dissous à l'aval du barrage de Guerlédan, en fin de vidange. A la sortie du barrage, la somme MES1 + MES2 + MES3 ou matières en suspension totales (MEST) est la courbe présentée sur la figure 16. « n » est le temps (en minutes) écoulé depuis l'instant de démarrage de modèle.

Table 3. – Values of calibration parameters for the model describing suspended solids and dissolved oxygen downstream of Guerlédan dam at the end of draining. At the dam outlet, the sum of MES1 + MES2 + MES3, or total suspended solids (MEST), is the curve presented in Figure 16. « n » is the time (in minutes) passed since the instant of start-up of the model.

	Conditions limites amont (sortie du barrage de Guerlédan)	Sur le domaine d'étude
Modélisation des matières en suspension	MES3 (mg/l) = $10 + 0.007 \cdot n$ MES2 (mg/l) = $0.04 \cdot (MEST - MES3)$ MES1 (mg/l) = $0.96 \cdot (MEST - MES3)$ avec MEST (mg/l) = MES1 + MES2 + MES3	SED3 = 0.1 m/jour (soit $1,16 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$) SED2 = 1 m/jour (soit $1,16 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$) SED1 = 1000 m/jour (soit $11,6 \text{ mm/s}$)
Modélisation de l'oxygène dissous	$L \text{ (mg/l)} = 3 + 0.007 \cdot MEST$	<ul style="list-style-type: none"> • $K1 = 0.3 \text{ jour}^{-1}$ (soit $3.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) dans les bassins de compensation • $K1 = 0.25 \text{ jour}^{-1}$ sur le Blavet aval • BEN = $4 \text{ g O}_2/\text{m}^2/\text{jour}$ (soit $4.6 \times 10^{-5} \text{ g O}_2/\text{m}^2/\text{s}$) dans les bassins de compensation à l'exception de $15 \text{ g O}_2/\text{m}^2/\text{jour}$ dans la partie aval du premier bassin (cellule 4) • BEN = $1 \text{ g O}_2/\text{m}^2/\text{jour}$ dans le Blavet aval

cidé de retenir la formulation classique suivante pour l'oxygène dissous :

$$F = K_2(C_s - C) - K_1 \cdot L - \frac{BEN}{H}$$

avec K_2 coefficient d'aération (s^{-1})

C concentration d'oxygène dissous (mg/l)

C_s concentration d'oxygène dissous à saturation prise égale à $9,2 \text{ mg/l}$, valeur applicable pour la gamme des températures mesu-

rées (voir paragraphe 8.2.2)

L charge oxydable contenue dans l'eau ($\text{mg O}_2/\text{l}$)

K_1 vitesse de dégradation de L (s^{-1})

BEN demande benthique en oxygène dissous ($\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$)

H profondeur moyenne de l'eau dans la section (m)

Ce qui nécessite la simulation d'une variable complémentaire L pour laquelle F s'écrit $F = -K_1 \cdot L$, selon la

formule classique de Streeter et Phelps.

K_2 est déterminé (Gosse *et al.*, 1983) par la relation $K_2 = \sup (K_{2riv}, K_{2lac})$ ce qui revient à prendre K_{2riv} quand les échanges eau-atmosphère sont avant tout conditionnés par le frottement de l'écoulement sur le fond et K_{2lac} quand l'écoulement est très lent et que la turbulence due au vent est le principal mécanisme d'aération. K_{2riv} est calculé à partir des formules de Churchill *et al.*, Owens *et al.* ou O'Connor et Dobbins, selon les valeurs prises par la profondeur et la vitesse de l'écoulement; et K_{2lac} est calculé par la formule de Kanwisher, qui s'est révélée convenable sur le lac de Grangent sur la Loire :

$$K_2 = \frac{2,04 \cdot 10^{-3}}{H(200 - 60 \sqrt{v})}$$

avec v (m/s) vitesse du vent à 2 m au-dessus de la surface de l'eau.

En absence de mesures de DBO (demande biochimique en oxygène), L a été représenté aux conditions limites amont comme la somme d'une constante (caractérisant un système faiblement perturbé) et d'un terme proportionnel à la concentration des matières en suspension totale.

Mise à part la définition – posant peu de difficultés – des conditions initiales (temps $t = 0$) sur tout le tronçon, la calibration du modèle pour l'oxygène dissous consiste donc à déterminer les deux constantes apparaissant dans la formulation de L à la sortie du barrage de Guerlédan, et à ajuster la valeur de K_1 et de BEN.

Le choix retenu pour ces paramètres (tableau 3) permet de reproduire assez convenablement les mesures d'oxygène dissous aux différents points de mesure (figures 19 à 21). Du fait de l'impossibilité – faute de mesures de DBO – de contrôler la variable L , le choix proposé pour les paramètres de calibration ne constitue pas la solution unique. De ce fait, les valeurs fournies pour K_1 et BEN doivent être jugées avec prudence. En revanche, on peut considérer comme nettement plus représentatives les valeurs trouvées pour la somme $\left(K_1 L + \frac{BEN}{H} \right)$

8.5. Commentaires. Capacités d'information et de visualisation du modèle

Plusieurs informations essentielles ressortent de la phase de calibration du modèle :

— la décomposition des matières en suspension en trois compartiments à vitesses de sédimentation différentes est un minimum acceptable pour représenter leur évolution en fin de vidange en aval du barrage de Guerlédan;

— au moment des plus fortes concentrations (entre les heures 50 et 80), la majeure partie des MES sortant du barrage de Guerlédan a une vitesse de dépôt approchant 1 cm/s;

— demandes benthique et au sein de l'écoulement réunies – c'est-à-dire en considérant la somme

$\left(K_1 L + \frac{BEN}{H} \right)$ - les consommations

chimiques et biologiques d'oxygène dissous dans une colonne d'eau en fin de vidange restent toujours inférieures à 0,02 mg/l/minute dans la partie aval du premier bassin de compensation et 0,004 mg/l/minute dans la partie aval du deuxième bassin de compensation. Elles ne dépassent pas 0,0015 mg/l/minute dans le Blavet aval, au delà de 7 km en aval du barrage de Guerlédan.

Les capacités de visualisation du modèle - qui dépassent largement les informations ponctuelles fournies par les mesures - sont illustrées sur la figure 22 qui donne à deux moments de la vidange le profil en long des matières en suspension totales, de l'oxygène dissous et de la DBO entre la sortie du deuxième bassin de compensation et la ville de Pontivy.

9. - CONCLUSION

Quelques idées essentielles se dégagent des applications prévisionnelle - faite avant la vidange - et descriptive - faite après la vidange - du modèle de matières en suspension et d'oxygène dissous du Blavet en fin de vidange du lac de Guerlédan.

La première est qu'il est possible moyennant un effort limité de mesures au cours d'une vidange de lac de reproduire avec un outil numérique relativement simple l'évolution des matières en suspension et de l'oxygène dissous sur la rivière située en aval. L'important est de bien mesurer

les conditions limites amont (sortie de barrage), et de placer judicieusement les quelques points de contrôle aval (en tenant compte des temps de résidence hydraulique et des vitesses de dépôt probables des MES).

D'autre part, compléter les mesures de qualité d'eau effectuées au cours d'une vidange par des mesures complémentaires de DBO (demande biochimique en oxygène pendant un, deux ou cinq jours à l'obscurité) est un moyen peu coûteux d'amélioration de la description du bilan d'oxygène dissous. L'absence de telles mesures dans notre étude n'a en effet pas permis de contrôler directement l'évolution de la variable charge oxydable, ce qui induit une imprécision sur la détermination de la demande benthique et des consommations biochimiques au sein de l'écoulement du Blavet.

L'application prévisionnelle du modèle a montré tout son intérêt puisque l'on ne s'est pas trompé sur les propriétés de décantation des deux bassins de compensation et que le majorant des MES annoncé avant la vidange à la sortie du deuxième bassin de compensation - 1 g/l - n'a pas été dépassé.

Justifiée par l'impossibilité actuelle de décrire finement les mécanismes d'entraînement et d'éboulement de vases au sein du lac, l'approche utilisée consistant à injecter dans le modèle à la sortie du barrage des courbes temporelles observées lors de vidanges effectuées sur d'autres sites apparaît donc intéressante. Ce qui conforte l'action actuelle d'EDF de constitution d'une banque de don-

Fig. 22. — Application descriptive du modèle : profils longitudinaux des matières en suspension (MES), de la charge oxydable (L) et de l'oxygène dissous calculés par le modèle sur le Blavet aval à deux moments de la période de fin de vidange (45 heures et 90 heures après le démarrage du calcul qui s'effectue le 23 septembre 1985 à 5 heures TU). L'origine des abscisses est la sortie immédiate du deuxième bassin de compensation.

Fig. 22. — Descriptive application of the model : longitudinal profiles of suspended solids (MES), oxidizable load (L) and dissolved oxygen, calculated by the model on the Blavet downstream at two moments during the period at the end of draining (hours 45 and 90 after start-up of calculation on September 23, 1985, at 5 a.m. UT). The origin of the abscissa is the outlet of the second regulating reservoir.

nées des évolutions mesurées de qualité d'eau – avec une discrétisation temporelle la plus fine possible – à la sortie immédiate des barrages de lacs vidangés.

Par comparaison – au minimum – de l'envasement du lac en projet de vidange avec celui de lacs préalablement suivis, l'utilisation de cette banque et le développement de modèles du type de celui présenté ici peuvent permettre d'indiquer le domaine probable de variation de la qualité d'eau plusieurs kilomètres en aval du barrage, dans un premier temps en fin de vidange, et, selon la richesse des données, lorsque le lac est temporairement à sec.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie : Xavier Graffin pour sa participation à la réalisation de l'application prévisionnelle du modèle, dans le cadre d'un stage à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne (année scolaire 1984-1985); le personnel du GME Bretagne – en particulier celui de l'usine de Guerlédan – qui a fourni les plans des bassins de compensation et nous a assisté sur le terrain lors des opérations de traçage et de vidange; J.P. Bolivard et P. Beliakoff de EDF/DER pour leur aide sur le terrain lors des opérations de traçage; H. Cardinal, J. Néau et D. Vazelle de EDF/DER qui ont effectué une grande partie des mesures de qualité d'eau au cours de la vidange et ont collecté les données de MES à Confolent et à La Bourboule; P. Le Tenaff de la DDE de Pontivy qui a fourni des plans du Blavet aval.

Bibliographie

- Anonyme, 1980. A review of the mathematical water quality model QUAL1E and guidance for its use. NCASI. Stream Improvement Technical Bulletin n° 331.
- Bouchard, J.P., Cardinal, H., Eon, M., 1986. Influence des retenues sur le milieu aquatique. Les vidanges des retenues. Société hydrotechnique de France. XIXe Journées de l'Hydraulique Paris. Question n° V. Rapport n° 5.
- Cardinal, H., 1988 : Bilan des recherches et recommandations en matière de vidange de retenues. Procédure LIVRE. Electricité de France. Rapport EDF/DER/HE31/88 n° 20.
- Comolet, R., 1963. Mécanique Expérimentale des Fluides. Masson Ed.
- Garric, J., Migeon, B., Vindimian, E., 1990. Lethal effects of draining on Brown trout. A predictive model based on field and laboratory studies. Wat. Res., 24, 1, 59-65.
- Gosse, Ph., Albignat, J.P., Coantic, M., 1983. Aeration mechanisms in the dissolved oxygen balance of a harnessed stream. Proceedings, 20th IAHR Congress. Moscow 1983. Vol. 3, pp. 153-169.
- Lepetit, J.P., 1979. Dispersion en mer. Modèle simple en cellule. Electricité de France. Rapport EDF/DER/E42/79 n° 33.
- Rambaud, J., Clair, M., Sandret, J., Frau, J.P., Khalanski, M., Ricard, C., 1988. Expérience acquise dans les vidanges de retenues par Électricité de France et la Compagnie Nationale du Rhône. Commission Internationale des Grands barrages. Seizième Congrès des Grands Barrages. San Francisco.
- Rofes, G., Trocherie, F., Garat, O., Vallon, M., Cardinal, H., 1991. Caractérisation des sédiments des retenues pour la prévision des risques écotoxicologiques liés aux vidanges. Rev. Sci. Eau. 4, 1, 65-82.
- Water Pollution Research Laboratory (WPRL), 1973. Aeration at weirs. Notes on water pollution, n° 61.