

# APPLICATION DU MODELE "REEL" A DES DONNEES RECENTES (Modélisation du cycle du phosphore)

PAR

Yuri TYUTYUNOV et Roger ARDITI

INSTITUT DE ZOOLOGIE ET D'ÉCOLOGIE ANIMALE  
UNIVERSITÉ DE LAUSANNE, CH - 1015 LAUSANNE

## RESUME

*Le but de ce travail est d'utiliser le modèle "REEL" (modélisation du cycle du phosphore dans le Léman), qui a été développé entre 1987 et 1989 et dont les paramètres avaient été calibrés sur la période 1985-1987, avec les nouvelles données recueillies dans le Léman depuis cette période.*

*Il s'agit d'un modèle unidimensionnel multicouche. Les apports en nutriments, les profils de température et la profondeur de brassage sont introduits, dans ce modèle, comme variables exogènes. A côté des simples phénomènes d'advection, le modèle comprend la production primaire, la minéralisation du phosphore particulaire, sa sédimentation et le relargage de phosphore dissous du sédiment. Ce programme de simulation (appelé "REEL") est développé sur un ordinateur personnel sous le système d'exploitation MS/DOS.*

*Les simulations préliminaires avec les anciens paramètres de calibration ne montrent un bon accord avec les valeurs observées dans le lac que pour l'oxygène et le phosphore particulaire dans l'épilimnion. Il a donc été procédé à une recalibration et à des corrections afin de caler le modèle sur les nouvelles séries de données observées dans le lac.*

*Des simulations prédictives sont effectuées pour la période 1993-1996 en envisageant plusieurs scénarios météorologiques (présence ou absence de brassage hivernal complet).*

## 1. INTRODUCTION

Le but de cette étude est d'utiliser le modèle "REEL" (Risques d'Eutrophisation des Eaux du Léman) développé entre 1987 et 1989 (BURGMAN et ARDITI, 1989) avec les nouvelles données recueillies dans le Léman de 1989 à 1993; puis de faire des simulations prédictives en envisageant plusieurs scénarios météorologiques (présence ou absence de brassage hivernal complet) et en faisant baisser les apports de phosphore du bassin versant.

### *Le modèle "REEL"*

Le modèle contient trois variables d'état : le phosphore inorganique dissous (orthophosphates, OP), le phosphore organique particulaire (PP) et l'oxygène dissous (OX). Un système d'équations différentielles exprime la variation temporelle de la concentration de chacune des variables dans l'épilimnion et dans chaque couche de l'hypolimnion. Les variables temporelles exogènes sont les profils de température du lac, la profondeur de la thermocline, les apports des quatre rivières Aubonne, Venoge,

Dranse et Rhône (leurs flux, températures et concentrations des trois variables d'état), ainsi que la somme des autres apports (comprenant aussi les petites rivières et les déversements des STEP). Les valeurs estimées à tous les instants et toutes les profondeurs nécessaires sont obtenues par interpolation entre les valeurs mesurées.

Le détail des hypothèses et des équations utilisées dans le modèle est exposé dans BURGMAN et ARDITI (1989).

## 2. SIMULATIONS ET NOUVELLES CALIBRATIONS

Les nouvelles données recueillies dans le Léman de 1989 à 1993 ont été utilisées pour constituer de nouveaux fichiers d'entrée pour le modèle REEL (DAT8993.LAK, DAT8993.TEM, DAT8993.RIV). Ces fichiers ont d'abord été utilisés pour accomplir des simulations préliminaires avec les valeurs des paramètres définies antérieurement, telles qu'elles avaient été estimées et calibrées pour la période 1985-1987. Les résultats des simulations du modèle (donnés dans le fichier OLDPARAM.OUT) sont représentés sur les figures 1 et 2. Ils démontrent un bon accord des valeurs simulées avec les valeurs observées pour l'oxygène (OX) et pour le phosphore particulaire (PP) dans l'épilimnion seulement, ainsi que le stock total d'oxygène. Les autres variables, c'est-à-dire les orthophosphates (OP) ainsi que le phosphore particulaire (PP) et l'oxygène (OX) dans l'hypolimnion et au fond, ne montrent pas un bon accord avec les valeurs observées.

Nous avons donc procédé à une recalibration afin de caler le modèle sur les nouvelles séries observées. Les résultats des simulations avec les nouveaux paramètres de calibration se trouvent dans le fichier NEWPARA1.OUT. Les nouvelles valeurs des paramètres sont indiquées dans l'annexe I. Cependant, nous avons constaté que les orthophosphates (OP) et l'oxygène (OX) au fond présentaient des valeurs trop extrêmes en hiver (maximum pour OX et minimum pour OP), au moment où les températures des rivières affluentes sont les plus basses (inférieures aux températures de l'hypolimnion). Nous avons trouvé qu'en modifiant les températures des rivières, c'est-à-dire en limitant les températures les plus basses à celle de la température du lac à 200 m de profondeur, les résultats de la simulation s'améliorent pour les dynamiques des orthophosphates et de l'oxygène au fond. Ceci ne peut pas être obtenu par des modifications de paramètres seules. Antérieurement, les dynamiques du fond étaient déjà difficiles à simuler (BURGMAN et ARDITI, 1989). Nous pensons qu'une raison est que le modèle ne tient pas compte du fait que, durant le parcours nécessaire pour atteindre la profondeur de 305 m, l'eau froide des rivières coule pendant longtemps autour de 200 m et se réchauffe. En conséquence, la distribution verticale de l'afflux des rivières doit être différente de celle qui était simulée antérieurement. Nous suggérons de corriger ce problème en modifiant manuellement les températures des rivières pendant la période la plus froide de l'année et en les portant à la température du lac à 200 m.

Ces données modifiées pour les rivières sont stockées dans un nouveau fichier (MOD8993.RIV). Les résultats de la simulation (stockés dans le fichier NEWPARA2.OUT) avec la nouvelle calibration (abaissement de la valeur du paramètre  $F_{max}$ ) sont donnés sur les figures 3 et 4. Les nouvelles valeurs des paramètres sont indiquées dans l'annexe I.

Le fait que cette meilleure calibration demande un abaissement de  $F_{max}$  confirme indirectement notre hypothèse sur la nécessité de modifier les températures des rivières car le relargage des orthophosphates (OP) des sédiments a diminué durant les dernières années (BLANC et al., 1994).

## 3. SIMULATIONS PREDICTIVES

Des simulations prédictives ont été faites pour la période 1993-1996. Nous avons supposé que les concentrations des orthophosphates (OP) et du phosphore particulaire (PP) dans les rivières diminueraient chaque année de 5 % (évolution constatée depuis quelques années), la dynamique saisonnière étant celle de 1992.

Nous avons envisagé trois scénarios météorologiques différents selon la présence d'un brassage hivernal complet du lac (tableau 1). Les modifications générées par ces trois scénarios se trouvent dans des nouveaux fichiers (\*.LAK = dynamique saisonnière de la profondeur de la thermocline et \*.TEM = profils de température typiques d'années froides et chaudes).

TABLEAU 1 : Scénarios météorologiques retenus pour les simulations prédictives (brassage hivernal complet du lac = oui / non)

Scénario	1993	1994	1995	1996	Commentaire
I	non	non	non	non	cas défavorable
II	non	oui	oui	oui	cas favorable
III	non	oui	non	non	cas intermédiaire

Les simulations du modèle donnent des dynamiques raisonnables des variables. Les dynamiques des orthophosphates (OP) et de l'oxygène (OX) au fond et en stock total, sous les trois scénarios météorologiques donnés au tableau 1, sont représentées dans les figures 5 et 6.

Il est généralement admis qu'un régime avec brassage hivernal complet chaque année est souhaitable pour la qualité de l'eau (concentrations basses de phosphore et élevées d'oxygène). Cependant, nous remarquons que, dans nos simulations, le cas intermédiaire III donne de plus basses concentrations du stock total des orthophosphates (OP) que dans le cas II (avec brassage chaque année). Pour comprendre comment ce résultat paradoxal est obtenu, nous avons examiné d'autres variables qui ne sont pas normalement accessibles à l'utilisateur du programme REEL, comme le flux des orthophosphates (OP) en provenance du sédiment (figure 7). En examinant la dynamique de l'oxygène (OX) au fond, on remarque que, dans le cas intermédiaire III, la concentration d'oxygène est encore assez élevée une année après un brassage complet (c'est-à-dire la troisième année). Naturellement, ceci réduit le relargage des orthophosphates (OP) du sédiment (voir les concentrations de l'OP au fond à la figure 5) Dans le modèle, le relargage des orthophosphates (OP) du sédiment dépend uniquement des concentrations des orthophosphates (OP) et de l'oxygène (OX). Cet effet positif de l'absence de brassage est aussi dû au fait que, dans l'hypolimnion (défini comme le volume au-dessous des couches mélangées), le phosphore particulaire (PP) décomposé ne devient pas du phosphore dissous (OP) disponible comme dans l'épilimnion mais reste emprisonné dans une enveloppe de bactéries (voir BURGMAN et ARDITI, 1989). L'intensité de ce processus est bien plus grande lorsque le brassage est seulement partiel. La conjugaison de ces deux mécanismes essentiels pour la qualité de l'eau explique pourquoi, dans le modèle, le scénario intermédiaire donne un meilleur résultat qu'un brassage complet chaque année. Nous ignorons bien sûr si ceci se produirait également dans la réalité.

#### 4. CONCLUSIONS

Les simulations préliminaires avec les anciens paramètres de calibration (estimés et calibrés pour la période 1985-1987) ne montrent un bon accord avec les valeurs observées dans le lac que pour l'oxygène et le phosphore particulaire dans l'épilimnion.

Il a donc été nécessaire de procéder à une recalibration et à des corrections afin de caler le modèle sur les nouvelles séries de données observées dans le lac.

Les simulations prédictives se basant sur une baisse des apports annuels de phosphore de 5 % par année et trois scénarios météorologiques différents (présence ou absence de brassage complet du lac) ont montré, entre autres, que la situation la plus favorable pour l'évolution du stock des orthophosphates n'est pas un brassage chaque année, mais tous les deux ou trois ans.

## BIBLIOGRAPHIE

BLANC, P., CORVI, C. et RAPIN, F. (1994) : Evolution physico-chimique des eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1993.

BURGMAN, M.A. et ARDITI, R. (1989) : Modélisation du cycle du phosphore : un modèle stochastique de l'eutrophisation du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1988, 107-138.

BURGMAN, M.A., ARDITI, R. et BYRDE, O. (1991) : User Manual for REEL. Risques d'Eutrophisation des Eaux du Léman. Eutrophication Risks in Lake Geneva. 13 p.

TABEAU 2 : Fragment de l'une des trois feuilles "Excel" contenant les valeurs observées des trois variables d'état (oxygène - OX - dans le cas présent). Les deux premières lignes contiennent les volumes et les profondeurs des couches

02	620.032	1237.63	1232.77	1227.92	1830.99	2426.84	3558.3	6750.14
Jour	0	2.5	5	7.5	10	15	20	30
16	10.82	10.72	10.68	10.69	10.72	10.74	10.68	10.66
44	10.91	10.78	10.76	10.84	10.76	10.54	10.71	10.72
65	11.38	11.36	11.32	11.29	11.26	11.18	11.18	11.13
79	11.58	11.52	11.52	11.48	11.51	11.46	11.34	10.92
100	12.64	12.44	11.86	11.62	11.55	11.56	11.42	11.92
114	13.87	13.80	13.88	13.32	12.93	12.50	11.74	11.14
129	14.04	14.25	13.76	12.34	12.20	11.39	10.84	10.45
142	15.63	15.80	15.96	12.34	11.29	10.95	10.68	10.54
156	10.77	10.73	10.78	10.56	10.68	10.26	10.31	10.42
170	10.90	10.86	11.02	11.11	10.49	9.90	10.00	10.21
186	10.81	10.81	10.82	10.46	10.37	9.61	9.19	9.80
205	10.06	10.18	11.71	9.97	9.41	7.92	8.10	9.44
219	10.02	10.06	10.24	10.48	9.48	7.28	7.58	8.92
233	9.40	9.58	9.82	10.76	10.03	7.18	6.87	8.74
254	10.22	10.32	10.23	9.60	7.46	6.72	7.71	9.08
261	11.48	11.78	11.69	11.42	9.40	7.11	6.62	8.48
275	9.14	9.08	9.14	9.10	9.05	8.74	8.50	8.21

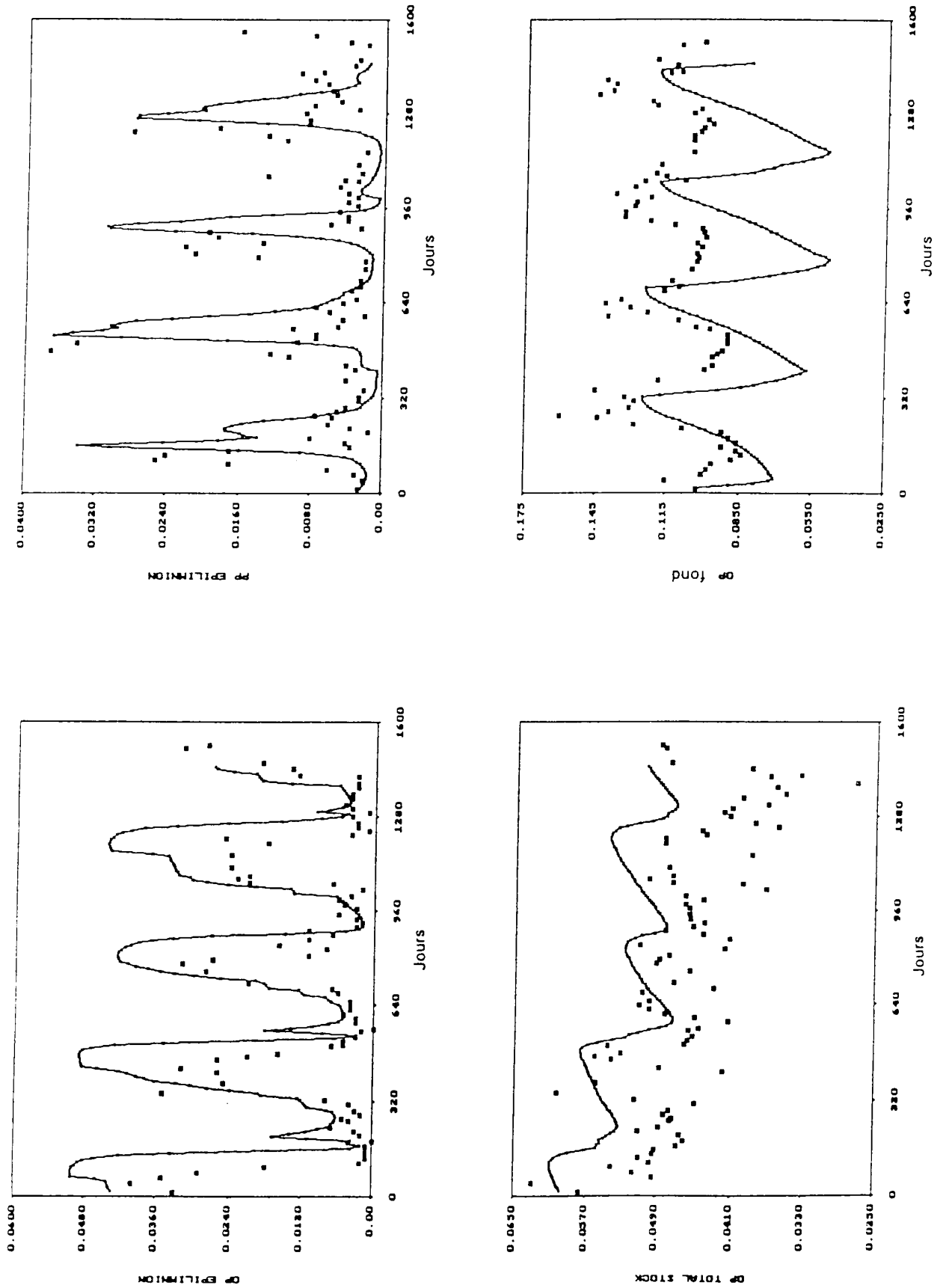


Figure 1 : Dynamiques simulées des orthophosphates (OP) et du phosphore particulaire (PP) avec les valeurs antérieures des paramètres. Les points représentent les valeurs observées (d'après le fichier OLDPARAM.OUT).

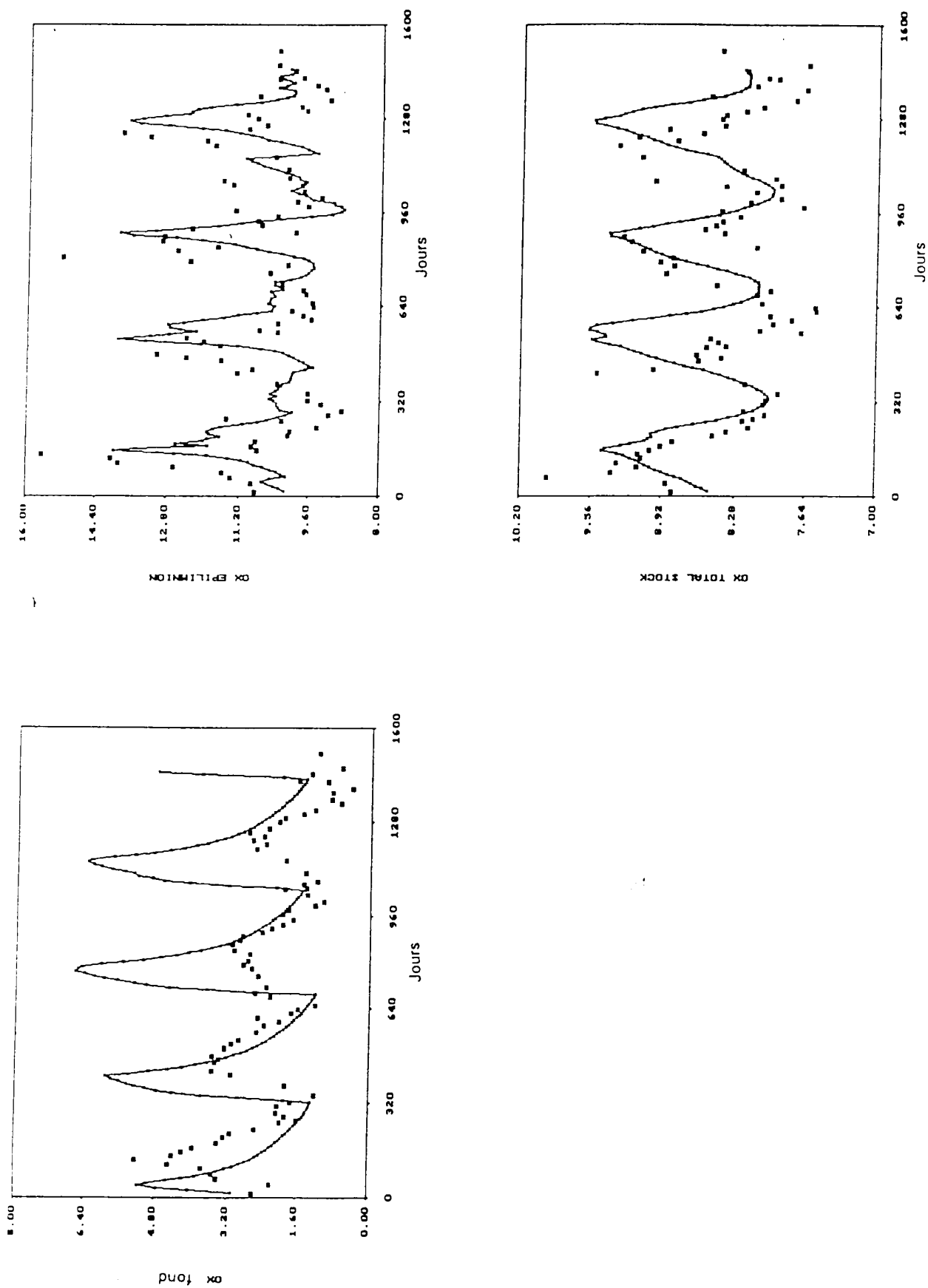


Figure 2 : Dynamique simulée de l'oxygène (OX) avec les valeurs antérieures des paramètres. Les points représentent les valeurs observées (voir figure 1)

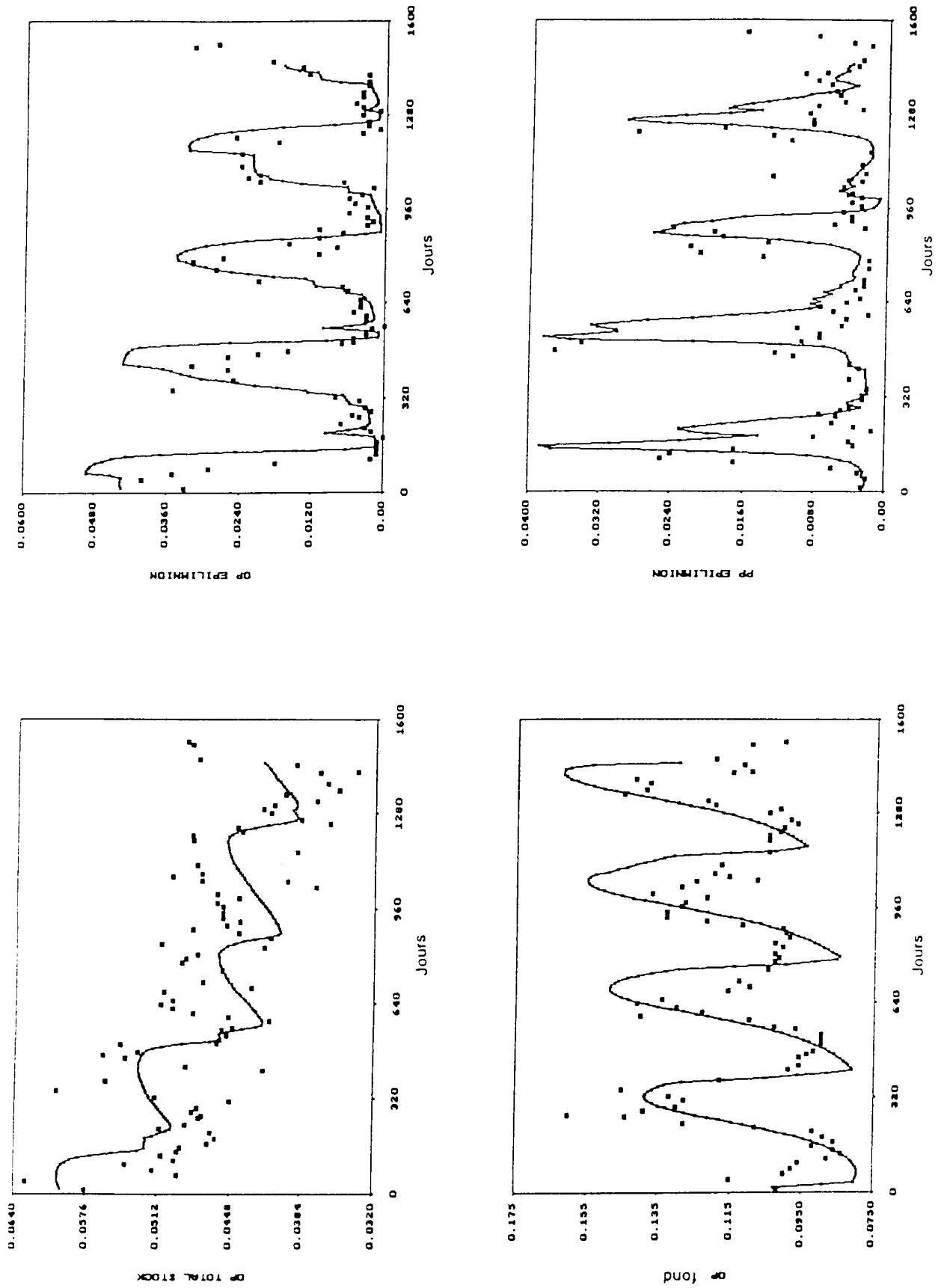


Figure 3 : Dynamiques simulées des orthophosphates (OP) et du phosphore particulaire (PP) avec les nouvelles valeurs des paramètres (d'après le fichier NEWPARA2.OUT).

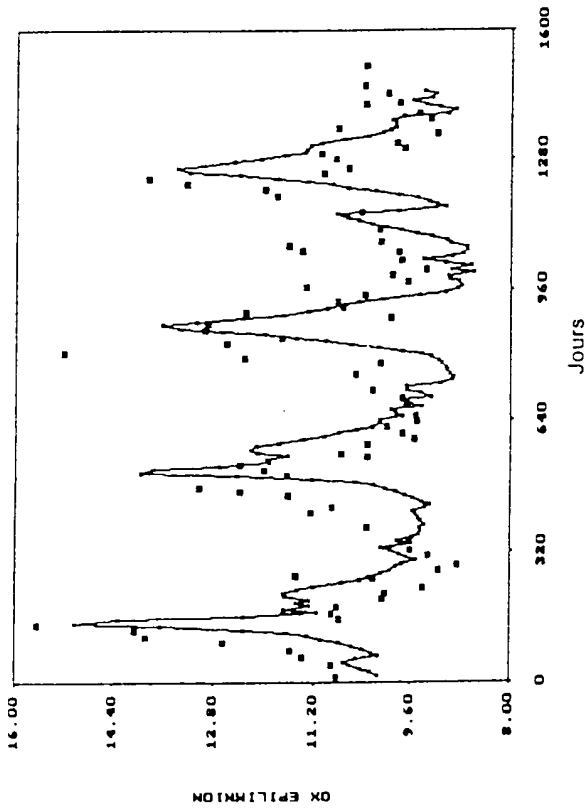
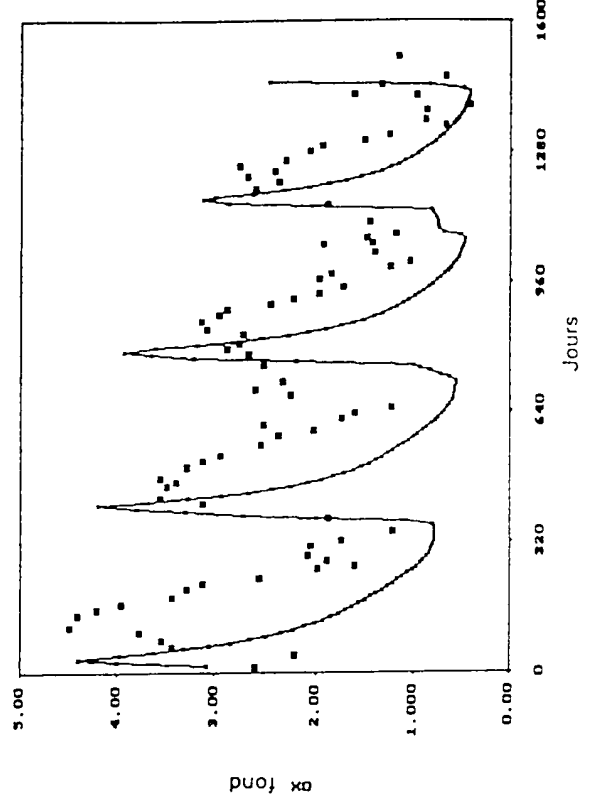
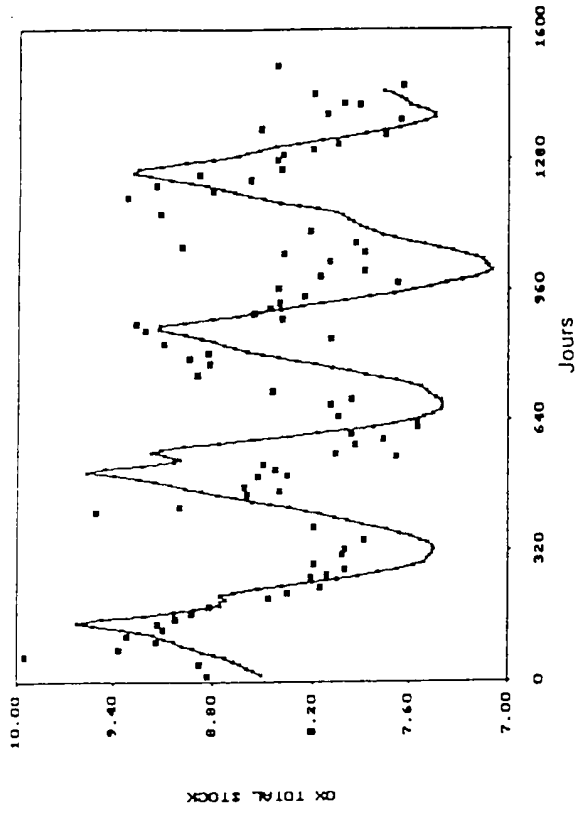
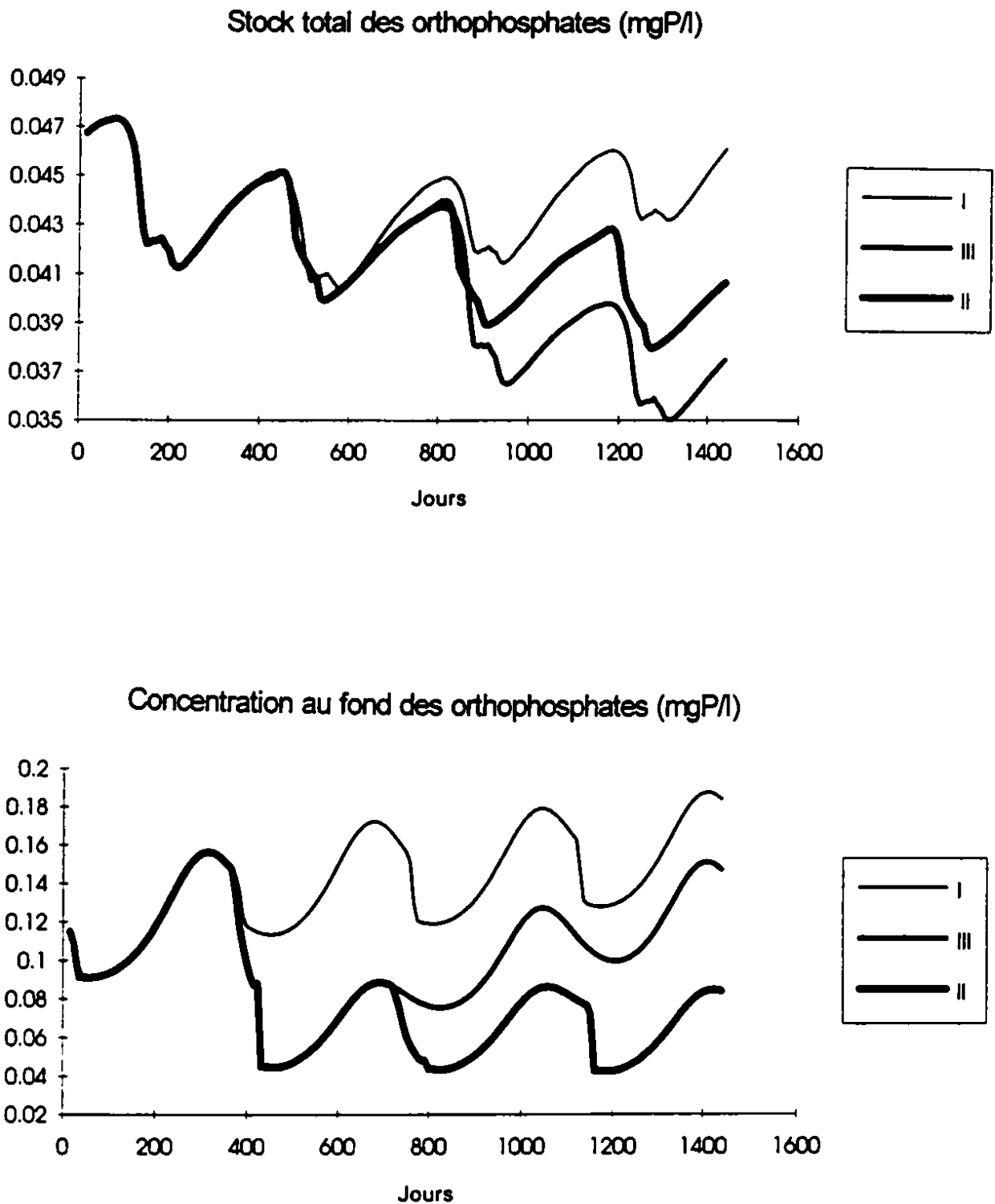
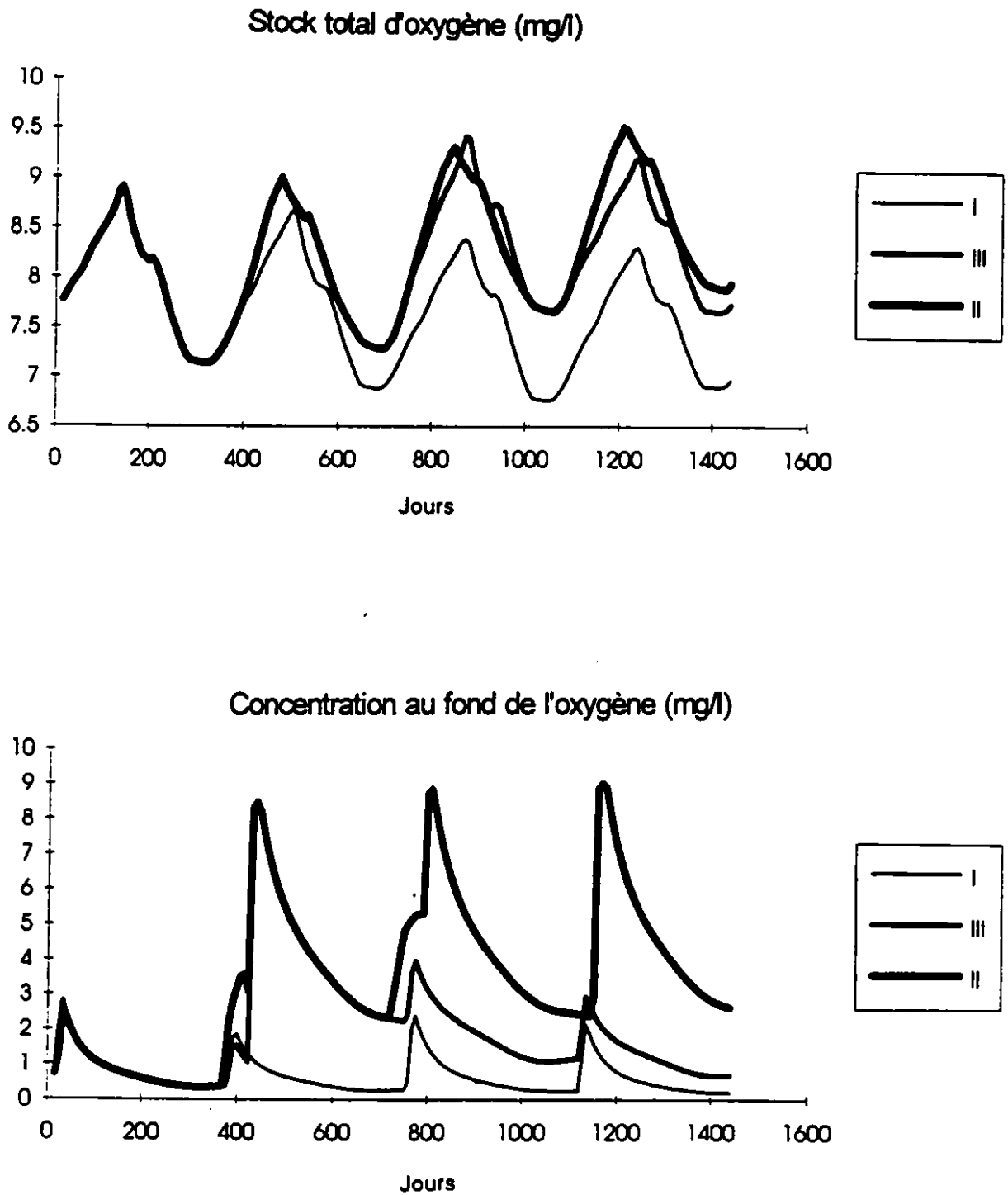


Figure 4 : Dynamique simulée de l'oxygène (OX) avec les nouvelles valeurs des paramètres (voir figure 3)





**Figure 5 :** Dynamiques simulées du stock total des orthophosphates (OP) et de leurs concentrations au fond. Prédiction pour la période 1993-1996 sous différents scénarios météorologiques : (I) aucun brassage, (II) brassage chaque année, (III) une seule année (1994) avec brassage complet.



**Figure 6 :** Dynamiques simulées du stock total d'oxygène (OX) et de sa concentration au fond. Prédiction pour la période 1993-1996 sous différents scénarios météorologiques (voir figure 5)

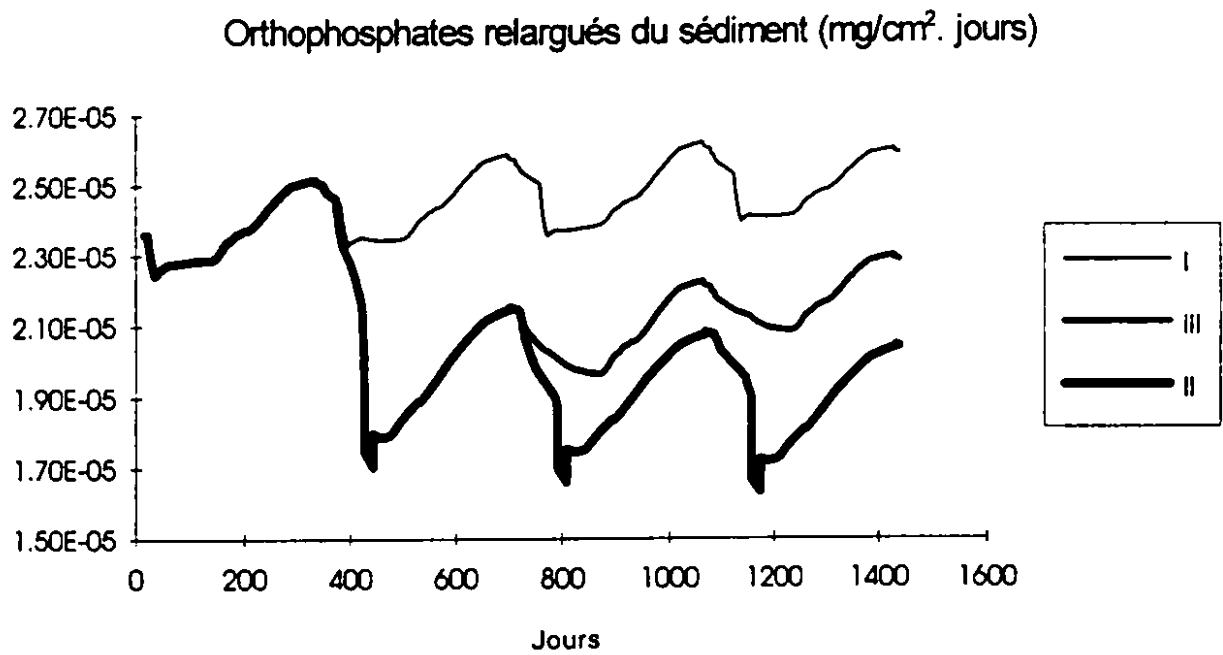


Figure 7 : Dynamique des orthophosphates (OP) relargués du sédiment. Prédictions pour la période 1993-1996 sous différents scénarios météorologiques (voir figure 5)

## ANNEXE 1 : VALEURS DES PARAMETRES DU MODELE

Paramètre	Valeurs antérieures (calibration sur 1985-1987)	Valeurs nouvelles (calibration sur 1989-1993)	Valeurs nouvelles avec modification des températures des rivières
	fichier OLDPARAM.OUT	fichier NEWPARAM1.OUT	fichier NEWPARAM2.OUT
$F_{max}$	0.014	0.013	0.011
$KO$	6.0	3.5	3.5
$KOP$	0.1	0.35	0.35
$\beta_{20e}$	0.025	0.015	0.015
$\beta_{20h}$	0.025	0.04	0.04
$b$	0.015	0.015	0.015
$E_s$	0.6	0.5	0.5
$E_w$	1.2	1.2	1.2
$H$	1.2	0.5	0.5
$\mu_0$	0.65	0.85	0.85
$\theta_\mu$	1.005	1.005	1.005
$\alpha$	140	140	140
$\sigma$	0.8	0.8	0.8
$R_s$	0.3	0.5	0.45
$K_{rs}$	5.0	5.0	5.0

(OP),(PP),(OX) : concentrations des orthophosphates, du phosphore particulaire et de l'oxygène ( $g/m^3$ )

$F_{max}$  : taux maximum de relargage d'OP du sédiment ( $g/m^2 \cdot jour$ )

$KO$  : constante de l'OX pour le relargage d'OP du sédiment ( $g/m^2$ )

$KOP$  : constante de l'OP pour le relargage d'OP du sédiment ( $g/m^2$ )

$\beta_{20e}$  : taux de minéralisation à 20 °C dans l'épilimnion ( $jour^{-1}$ )

$\beta_{20h}$  : taux de minéralisation à 20 °C dans l'hypolimnion ( $jour^{-1}$ )

$b$  : paramètre du modèle de la diffusion turbulente ( $m^{-1}$ )

$E_s$  : vitesse de sédimentation dans l'épilimnion au printemps (du 100e au 170e jour de l'année) ( $m/jour$ )

$E_w$  : vitesse de sédimentation dans l'épilimnion de reste de l'année ( $m/jour$ )

$H$  : vitesse de sédimentation dans l'hypolimnion ( $m/jour$ )

$\mu_0$  : taux maximum de photosynthèse à 20 °C ( $jour^{-1}$ )

$\theta_\mu$  : coefficient de température pour la photosynthèse (sans dimension)

$\alpha$  : rapport stoechiométrique oxygène / phosphore (sans dimension)

$\sigma$  : coefficient d'échange de l'oxygène à la surface ( $m/jour$ )

$R_s$  : taux maximum de consommation d'oxygène par le sédiment ( $g/m^2 \cdot jour$ )

$K_{rs}$  : constante de Michaelis pour la consommation d'oxygène par le sédiment ( $g/m^3$ )

## ANNEXE II : CHANGEMENTS DU CODE SOURCE DU PROGRAMME "REEL" (version 2.3)

*Problèmes ("Bugs") détectés et corrigés dans les versions précédentes du programme REEL (jusqu'à version 2.2)*

1. Une note du manuel de l'utilisateur (BURGMAN et al., 1991) indique que le fichier pour les données des rivières ne peut pas contenir plus de 120 enregistrements par rivière. En fait, la limite dans le programme était de 100. Elle a maintenant été portée à 120 de sorte que le texte du manuel est devenu correct.
2. Le code pour la formule (4) de BURGMAN et ARDITI (1989), décrivant la consommation d'OP par le PP dans l'hypolimnion, était erroné mais, en raison de la faible concentration du PP dans l'hypolimnion, ceci ne donnait pas d'erreur quantitative sérieuse. Ceci a été corrigé.

### *Nouveautés*

- Dans la nouvelle version de REEL (version 2.3), il est maintenant possible de comparer les valeurs simulées et observées des variables modélisées (voir les copies d'écran des figures 1 à 4, où les dynamiques observées sont représentées par des points). Ceci simplifie l'utilisation pratique du logiciel.
- Les fichiers contenant les données observées peuvent être sélectionnés par l'utilisateur par le nouvel article *Select Observed Values* ajouté au menu *File*. Comme pour la procédure *Select Input Data Files*, il est demandé à l'utilisateur de donner les noms de trois fichiers contenant l'information sur la dynamique de l'OP, PP et OX aux différentes profondeurs. Nous suggérons de donner à ces fichiers les extensions \*.OP, \*.PP, et \*.OX. Nous recommandons l'utilisation de "Microsoft Excel" pour créer ces fichiers et pour les sauver au format texte. Un fragment de feuille "Excel" contenant l'information sur la dynamique de l'OX est présenté au tableau 2. Les deux premières lignes contiennent de brefs commentaires, les volumes et les profondeurs des couches.
- Une information sur les fichiers sélectionnés apparaîtra dans le cadre de dialogue *Simulation Conditions*. Une erreur de lecture de ces fichiers ou l'absence de leur sélection ne doit pas causer de problème : en tel cas, les graphiques ne présenteront que les dynamiques simulées.