

Stockage du phosphore dans les sédiments d'un réservoir eutrophe (Gouet, BRETAGNE, FRANCE)

ALAIN JIGOREL¹, ANNICK BOUEDO², REMY NICOLAS², JEAN PIERRE MORIN²

¹ INSA de Rennes, LGCGM – Géologie, 20 Avenue des Buttes de Coësmes, CS 14315, 35043 Rennes Cedex, France
Alain.Jigorel@insa-rennes.fr

² Conseil Général des Côtes d'Armor Direction de l'Agriculture et de l'Environnement (DAE) 2 rue Kuster - B.P. 2375
22023 Saint-Brieuc Cedex 1
BOUEDOannick@cg22.fr, NICOLASremy@cg22.fr, MORINJeanPierre@cg22.fr

Résumé Un bilan du stockage du phosphore a été effectué dans le réservoir du Gouet d'un volume $7,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Côtes d'Armor, France) par l'évaluation des flux entrants et sortants et par le suivi en continu de la sédimentation. La dynamique des apports du phosphore particulaire (Pp) est identique à celle du phosphore soluble (Ps) et liée à l'importance relative des écoulements. Les apports de Pp ont été 2 fois plus élevés que ceux de Ps (9,2 v.s. 4,2 t.an⁻¹). La moitié du Ps et les 2/3 du Pp ont été stockés dans la retenue. Pour la même période de suivi, la quantité de phosphore accumulé dans les sédiments a été estimée à 5,6 t, alors que l'examen comparé des flux a donné un stock de phosphore de 6,6 t dans la retenue. Les apports de phosphore dans la retenue sont liés aux cycles hydrologiques (crues hivernales et printanières) tandis que l'accumulation du phosphore dans les sédiments s'accorde bien aux cycles biologiques (proliférations algales).

Mots clés retenue, phosphore, flux, stockage, sédiment

Abstract A phosphorus budget was established for the $7.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ Gouet reservoir (Côtes d'Armor, France) by measuring inflow and outflow of phosphorus, and sedimentation processes. The dynamic of input of particulate phosphorus (pP) was identical to the dynamic of input of dissolved phosphorus (dP), and both were linked to the relative importance of inflow. The inputs in pP were twice as much as the input of dP (9.2 v.s. 4.2 t.yr⁻¹). Half of dP and two-third of pP remained within the reservoir. During the same period, the amount of phosphorus accumulated in the sediment was estimated at 5.6 t, whereas the mass balance between inflow and outflow suggested that 6.6 t of phosphorus was stored in the reservoir. The input of phosphorus to the reservoir depends on the hydrological cycles (floods during winter and spring) while the storage of the phosphorus by sedimentation is according with the biological cycles (algal blooms).

Key words reservoir, phosphorus, flow, storage, sediment

INTRODUCTION

Dans les régions d'agriculture intensive les eaux superficielles sont polluées par des apports directs de pesticides et d'herbicides. Dans les milieux lentières elles sont également altérées



de manière indirecte par les effets induits de l'eutrophisation. La plupart des retenues eutrophisées ont une forte charge organique, des teneurs très élevées en fer et en manganèse et sont chaque été sous la menace d'une pollution par des cyanotoxines du fait de la prolifération de cyanobactéries (Jigorel *et al*, 1996).

Pour restaurer la qualité de l'eau et lutter contre l'eutrophisation, les responsables politiques bretons ont favorisé la mise en place de programmes d'actions préventives (Bretagne Eau Pure) qui mettent surtout l'accent sur les teneurs en nitrates. Le phosphore est peu évoqué alors qu'il est le facteur limitant de l'eutrophisation (Vollenweider et Kerekes, 1980). En Bretagne, le phosphore est très abondant et provient surtout des activités agricoles (bâtiments d'élevage, épandages des déjections animales, érosion des sols) et des rejets ponctuels industriels et urbains (stations d'épuration). Il parvient dans les retenues sous forme soluble et particulaire. Une partie de la charge phosphorée apportée par les tributaires est stockée dans les réservoirs du fait de la décantation des matières en suspension allochtones et de la sédimentation biogène endogène induite par l'eutrophisation (Forsberg, 1989). Il en résulte un envasement généralisé des retenues eutrophisées (Jigorel et Bertru, 1993; Jigorel et Morin, 1994a). Ces dépôts sédimentaires fins riches en matière organique, de type vase, constituent une réserve importante de phosphore qui peut amplifier la dégradation du milieu. L'importance du stockage du phosphore a été évalué dans la retenue sur le Gouet, qui est représentative du contexte armoricain, par l'étude des flux entrants et sortants et par la mesure en continu des taux de sédimentation sur le fond.

SITES ET METHODES

La retenue sur le Gouet, située au centre-nord du département des Côtes d'Armor, France, (Fig. 1) a été créée en 1978, par le verrouillage d'une vallée côtière étroite et encaissée. Le réservoir est très allongé (6 km) et sa profondeur s'accroît régulièrement de l'amont vers



l'aval pour atteindre 37 m au niveau du barrage. Sa surface est de 81 ha et sa capacité maximale atteint 7,9 millions de m³. La vocation de ce plan d'eau est essentiellement l'alimentation en eau potable de la région de Saint Briec. La production annuelle, voisine de 6 millions de m³, répond aux besoins d'une population de 200 000 habitants.

Le bassin versant a une surface de 195 km² au barrage et est essentiellement de nature granitique. Les sous bassins du Gouet et de la Maudouve ont des surfaces respectives de 138 et 24,2 km². Le réseau hydrographique dense prend sa source sur les reliefs de la bordure méridionale du bassin versant, soit dans le massif granitique de Quintin, soit dans les formations schisto-gréseuses du paléozoïque fortement plissées qui forment une ligne de crête à une altitude voisine de 300 m.

De nombreux affluents viennent grossir le Gouet en amont de la retenue mais la Maudouve est le seul ruisseau important à se jeter directement dans la retenue.

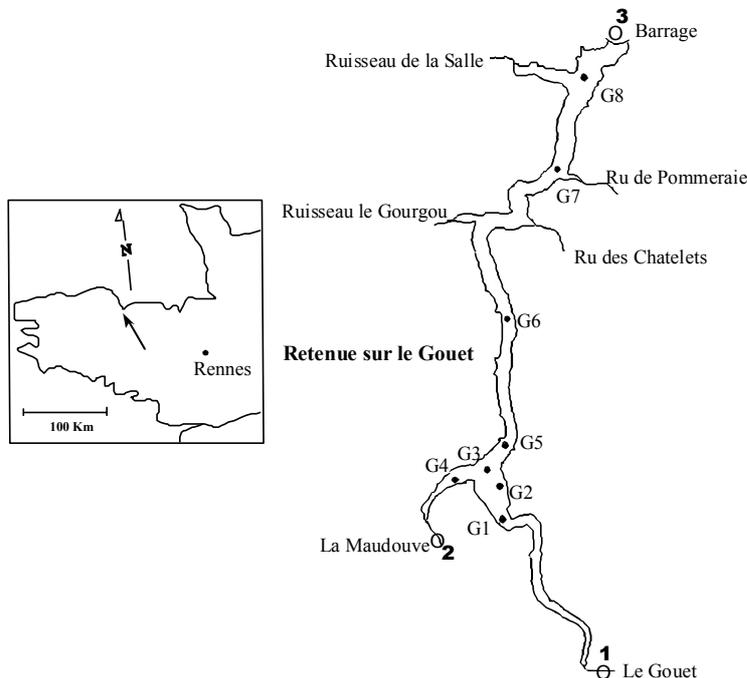


Fig. 1 La retenue sur le Gouet. Situation et dispositif de mesure :
3 stations de jaugeage (1) et 8 sédimentomètres (G)

Les débits sont mesurés en continu dans 3 stations de jaugeage établies sur le Gouet (1) et la Maudouve (2) en amont de la retenue, et sur le Gouet (3) à l'aval immédiat du barrage



(Fig. 1).

Les prélèvements d'eau ont été effectués selon une périodicité mensuelle. Les matières en suspension ont été mesurées selon le protocole de la norme NF EN 872. Les dosages des orthophosphates et du phosphore total ont été réalisés selon les protocoles de la norme NF EN 1189. Tous les résultats sont exprimés en P.

Les quantités de sédiments déposées dans la retenue ont été évaluées à l'aide de 8 sédimentomètres posés sur le fond dans les différentes unités sédimentologiques de la retenue (Fig. 1). Les sédimentomètres présentent des caractéristiques proches de celles préconisées par Bloesh et Burns (1980). Leur surface de collecte est de 0,1 m² et leur hauteur de 60 cm. La pose et le relevé des appareils ont été effectués tous les deux mois. Les sédiments recueillis sont décantés au laboratoire puis séchés au déshydrateur. Les analyses portent sur la quantité de matière sèche par unité de surface, la teneur en matières organiques par perte au feu à 550 °C et la teneur en phosphore total.

Les mesures en entrée et en sortie du phosphore ont été effectuées pendant 6 années (août 1998 – septembre 2004). L'évaluation du phosphore stocké dans les sédiments recueillis dans les sédimentomètres a été faite pendant la période juillet 2002 – septembre 2003.

RESULTATS

Flux entrant de phosphore

Les flux mensuels de phosphore particulaire mesurés à la station 1 sur le Gouet montrent une très grande irrégularité qui se traduit par l'alternance de pics élevés et de faibles apports. Les flux maxima sont enregistrés chaque année en hiver et/ou au printemps lorsque les débits du Gouet sont élevés. Le flux mensuel maximal a atteint 5 t de Pp et a été mesuré pendant les fortes crues de janvier 2001. Les flux mensuels maxima ont été voisins de 3,5 t de Pp en 1999



et 2,5 de Pp en 2000 et 2002 alors qu'ils ont été seulement légèrement supérieurs à 1 t en 2003 et 2004 (Fig. 2). Les flux maxima de Pp n'ont pas toujours coïncidé avec les débits maxima du Gouet. Ainsi en 1999 et 2000, les apports maxima de Pp ont été enregistrés au mois d'avril, période pendant laquelle les écoulements ont été soutenus mais nettement inférieurs à ceux de janvier-février.

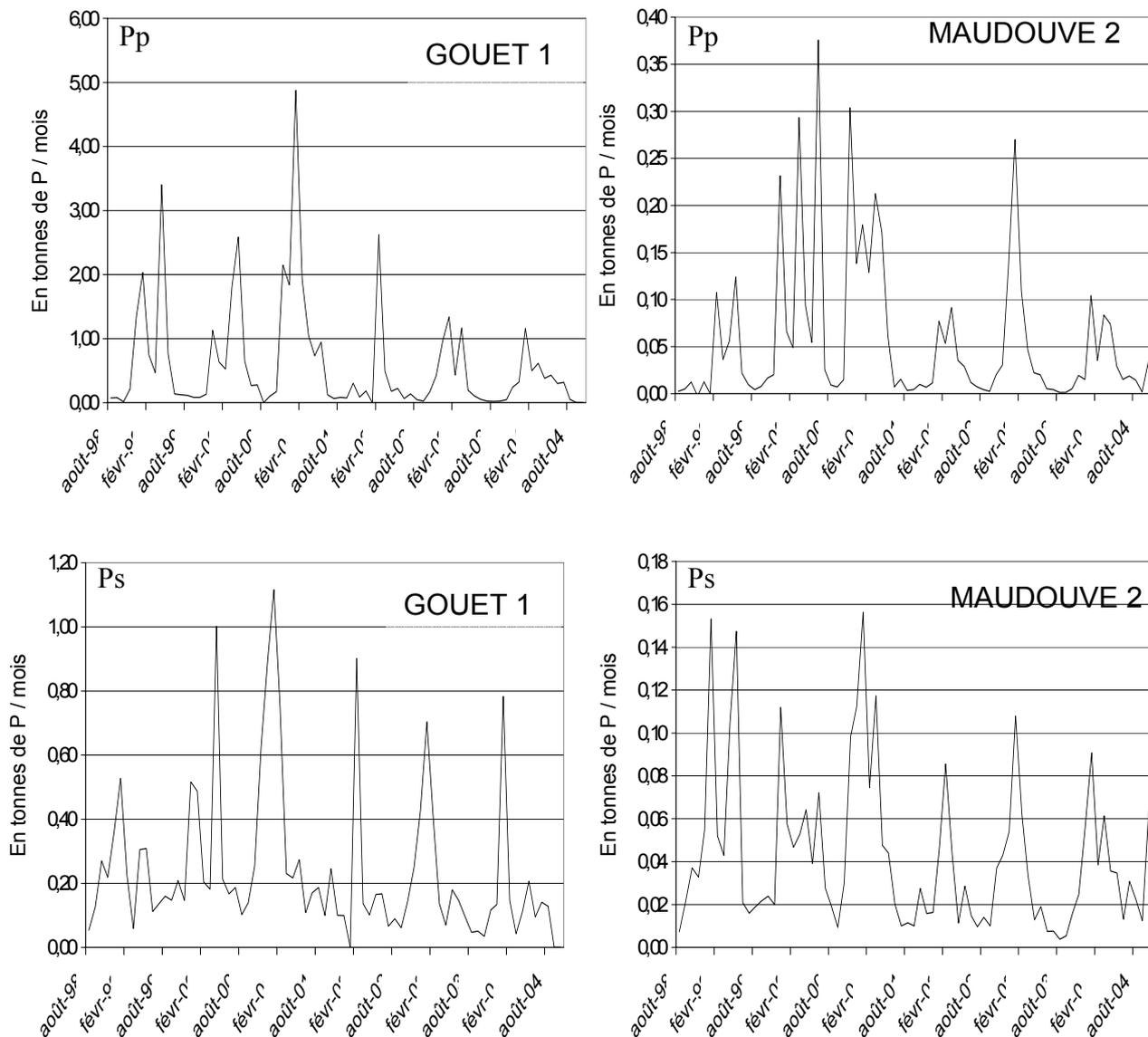
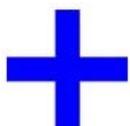


Fig. 2 Evolution des flux mensuels de phosphore particulaire (Pp) et soluble (Ps) dans les stations 1 (Gouet) et 2 (Maudouve)

Les flux de Pp de la Maudouve se distinguent de ceux du Gouet par la plus grande fréquence de pics (Fig. 2). Cela se vérifie en particulier en 2000 et 2001. Tous les pics enregistrés sur le



Gouet sont présents mais avec une amplitude différente. Des pics importants ont également été mesurés plus tardivement sur la Maudouve en avril-mai.

En aval du barrage, les flux de Pp présentent également une irrégularité, mais les pics maxima de flux mensuels ont toujours été inférieurs ou voisins de 1 t sauf pendant la crue de février 2001 où le flux mensuel a atteint 3 t.

Les flux mensuels de phosphore soluble mesurés sur le Gouet et la Maudouve montrent une similitude avec les flux de phosphore particulaire (Fig.2). Les pics sont toujours enregistrés pendant les mêmes périodes mais leur amplitude varie. Les maxima coïncident avec ceux du phosphore particulaire mais les pics d'orthophosphates enregistrés en 2002 et 2003, années de faibles écoulements, sont mieux marqués que ceux du phosphore total.

Evaluation des quantités de phosphore stockées dans la retenue

Les quantités de phosphore stockées dans la retenue ont été évaluées à partir des flux entrants totaux et du flux sortant.

Tableau 1 Bilan des apports et du stockage du phosphore dans la retenue
B.V.C. Bassin versant contiguë de la retenue. Maud = Maudouve

Années	98-99		99-00		00-01		01-02		02-03		03-04	
	Pp	P.PO ₄										
Gouet en t	9,41	2,70	8,30	3,62	13,97	4,88	4,45	2,27	4,94	2,72	4,36	1,91
Gouet kg/km ²	68,2	19,6	60,1	26,2	101,2	35,4	32,2	16,4	35,8	19,7	31,6	13,8
Maud en t	0,37	0,69	1,23	0,56	1,25	0,74	0,34	0,32	0,67	0,41	0,40	0,41
Maud kg/km ²	15,3	28,5	50,8	23,1	51,7	30,6	19,0	08,3	27,7	16,9	16,5	16,9
B. V. C. en t	0,49	0,91	1,62	0,74	1,64	0,97	0,45	0,42	0,88	0,54	0,53	0,54
P Apports. en t	10,27	4,30	11,15	4,92	16,86	6,59	5,24	3,01	6,49	3,67	5,29	2,86
Pp + P.PO ₄	14,56		16,06		23,45		8,25		10,16		8,14	
Pp/P.PO ₄	2,4		2,3		2,6		1,7		1,8		1,8	
P stocké en t	8,77	1,80	8,61	2,78	8,62	2,49	3,56	1,47	3,61	1,89	3,41	1,23
% stocké	85,39	41,82	77,21	56,47	51,13	37,81	67,92	48,85	55,63	51,48	64,43	42,98

Les quantités de phosphore particulaire et soluble apportées par les deux principaux tributaires (Gouet et Maudouve) et par les ruisseaux qui se jettent directement dans la retenue (B.V.C.) ont été calculées pour la période août 1998 – septembre 2004 (Tableau 1). En



l'absence de mesures directes, nous avons considéré que les sous bassins drainés par les ruisseaux qui se jettent directement dans la retenue ont des caractéristiques identiques à celui de la Maudouve car l'occupation du sol et la morphologie des bassins sont comparables. Les apports sont donc proportionnels aux surfaces respectives des bassins versants.

Les apports totaux de phosphore particulaire ont varié de 16,9 t .an⁻¹ en 2000 – 2001 à 5,2 t.an⁻¹ en 2001 – 2002. Les apports totaux de phosphore soluble ont fluctué de 6,6 t.an⁻¹ en 2000 – 2001 à 2,9 t.an⁻¹ en 2003 – 2004. Les flux de phosphore soluble varient sensiblement comme les flux de phosphore particulaire. Ils sont liés à l'importance relative des écoulements.

Le rapport des flux annuels de phosphore particulaire sur ceux de phosphore soluble varient relativement peu (1,7 à 2,6). Pendant la période de suivi, le flux entrant de phosphore particulaire a été 2 fois plus important que le flux de phosphore soluble (9,2 v.s 4,2 t.an⁻¹ de P).

Les apports de phosphore particulaire exprimé en kg/km² sont toujours plus élevés dans le bassin versant du Gouet que dans celui de la Maudouve. La différence est d'autant plus importante que les débits sont plus élevés. Ainsi pendant la période 1998 – 2001, les apports moyens annuels ont été de 76 kg/km² dans le bassin du Gouet et 39 kg/km² dans le bassin de la Maudouve. Pendant la période 2001 – 2004 qui a connu des déficits d'écoulement, les apports annuels ont été deux fois moins importants dans les deux bassins (respectivement 33 kg/km² et 21 kg/km²).

Les apports de phosphore soluble sont identiques dans les deux bassins versants, soit 27 kg/km² en moyenne pendant les 3 premières années et 15 kg/km² pendant les 3 dernières années.

Les quantités de phosphore particulaire stockées dans la retenue varient du simple au double en fonction de l'importance des écoulements. Pendant les 3 années d'écoulements



soutenus elles ont été voisines de $8,7 \text{ t.an}^{-1}$ et pratiquement constantes. Pendant les 3 années d'écoulements faibles, le phosphore particulaire stocké a été constant et voisin de $3,5 \text{ t.an}^{-1}$. Pendant les 3 années d'écoulement soutenu, les pourcentages de phosphore particulaire stockés ont varié de 51 à 85 %. La valeur la plus faible a été enregistrée l'année où les écoulements ont été maxima. Durant les années d'écoulements plus faibles le pourcentage de phosphore particulaire stocké a varié de 55 à 68 %.

Les quantités de phosphore soluble piégées dans la retenue ont varié de 38 à 56 %. Elles ont été les plus faibles en 2000 – 2001, années de fortes crues hivernales.

Les quantités totales de phosphore apportées dans la retenue chaque année sont présentées sur la figure 3. Les apports ont varié en relation avec l'importance relative des écoulements tandis que les quantités stockées ont été pratiquement constantes, à des niveaux différents, les 3 premières années et les 3 dernières années. Elles ont été respectivement de 11 t.an^{-1} , pendant les années d'écoulements soutenus et de 5 t.an^{-1} pendant les années d'écoulements faibles.

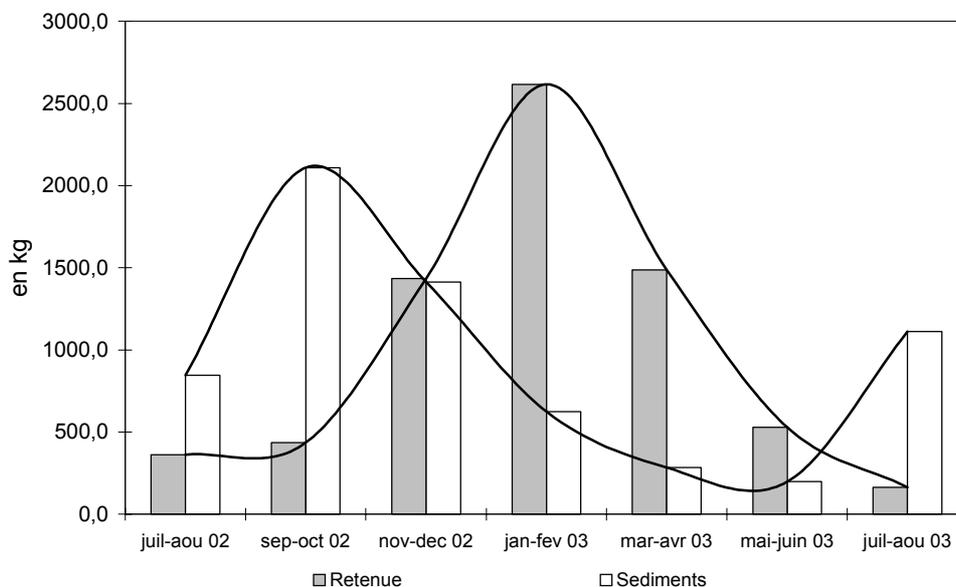


Fig. 3 Apports annuels et quantités de phosphore total stockées dans la retenue



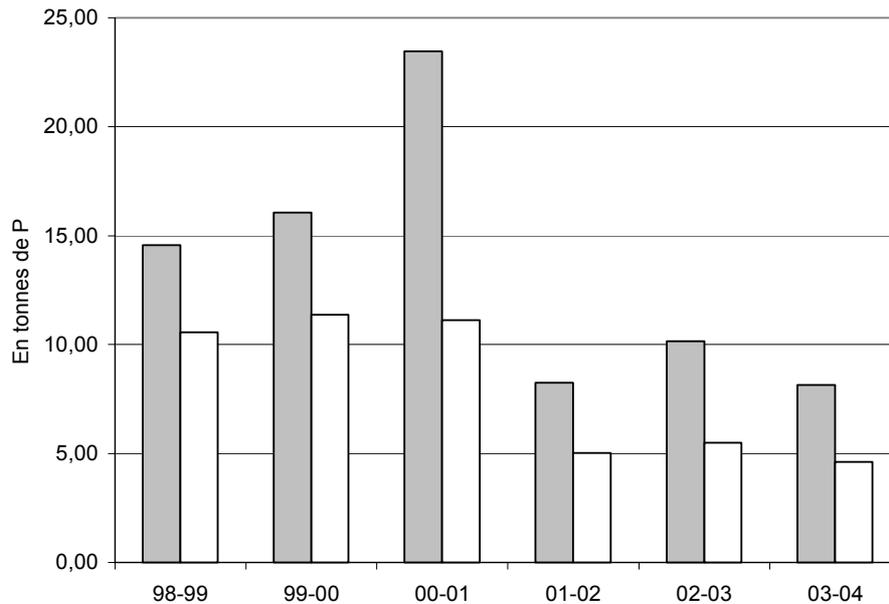


Fig. 4 Evolution bimestrielle du phosphore total stocké dans la retenue et du phosphore accumulé dans les sédiments

Evaluation des quantités de phosphore stockées dans la retenue et accumulées dans les sédiments

L'évaluation des quantités de phosphore accumulées dans les sédiments a été effectuée pendant la période août 2002-septembre 2003 à partir des quantités de sédiments recueillies dans les 8 sédimentomètres et des teneurs en phosphore total des sédiments. Les sédimentomètres ayant été relevés tous les 2 mois, les taux de sédimentation et les quantités de phosphore piégées dans les sédiments ont été évaluées par bimestre.

Les quantités de sédiments recueillies dans les sédimentomètres montrent une grande amplitude de variation (Fig. 4). Les dépôts maxima en septembre – octobre 2002 ont régulièrement diminué jusqu'en mai – juin 2003. La période estivale (juillet – août) a connu des taux de sédimentation relativement importants et plus élevés en 2003 qu'en 2002.

Les teneurs en phosphore total des sédiments ont peu varié, quelle que soit la période ou le site de dépôt. Toutes les valeurs sont comprises entre 0,15 et 0,33 % de P, la valeur moyenne étant de 0,25 (écart-type : 0,05 - 50 mesures) du poids sec des sédiments.



La quantité totale de phosphore accumulée dans les sédiments de la retenue a pu être évaluée à partir des résultats d'études antérieures (Jigorel et Morin, 1994b). L'envasement est relativement uniforme sur le fond plat de la cuvette et la surface envasée au niveau du fond représente 54 % de la surface totale de la retenue. La quantité totale de phosphore accumulée dans les sédiments s'élève à 5,6 tonnes pour la période juillet 2002 – août 2003.

L'examen comparé des flux entrants et sortants montre parallèlement que la quantité de phosphore total stockée dans la retenue s'élève à 6,6 t pendant la même période.

DISCUSSION

L'évaluation des quantités de phosphore accumulées dans la retenue peut être effectuée avec une bonne précision lorsque les flux entrants et sortants sont mesurés en continu. Dans le cas présent, les débits des deux principaux tributaires sont bien mesurés en continu, mais les flux de phosphore ont par contre été évalués à partir de prélèvements mensuels. Une telle périodicité ne prend pas en compte tous les pics de crue et de ce fait les flux de phosphore particulaire risquent d'être sous évalués. Des études antérieures (Cann, 1994) effectuées dans un contexte géologique et hydrologique identique ont montré que les flux évalués à la fois par des mesures continues et par des mesures mensuelles étaient très proches lorsque les écoulements étaient modérés. Dans le cas présent, la période de suivi n'a pas connu d'écoulements très importants ni de crues de forte amplitude sauf au début de l'année 2001. Vu les conditions hydrologiques de la période d'étude, les flux de phosphore évalués doivent être assez peu éloignés des flux réels en particulier pour la période 2001 – 2004.

L'examen comparé des apports des deux tributaires montre que les pics de phosphore sont plus fréquents et se poursuivent plus longtemps au printemps sur la Maudouve. Cette différence résulte sans doute du relief plus accentué de ce bassin. Les apports par pics successifs s'expliquent par l'origine du phosphore. Celui-ci provient des remises en



suspension de sédiments fins dans le lit des rivières pendant les crues, de l'érosion des sols saturés et nus en hiver, des apports massifs de matière organique sous l'action du ruissellement. Dans tous les cas, le ruissellement superficiel semble jouer un rôle majeur dans le transport des matières en suspension car la fraction organique est toujours très importante, même en hiver, et voisine de 20 % dans les sédiments recueillis à l'exutoire des deux rivières dans la retenue.

Les périodes de forte pluviosité sont les plus propices au transfert par le ruissellement vers le réseau hydrographique, de déjections animales riches en phosphore stockées à proximité des bâtiments d'élevage ou épandues sur des terres agricoles pentues.

Les bassins versants du Gouet et de la Maudouve ont apporté chaque année des quantités d'orthophosphates identiques et voisines de 2,1 kg/km² de P. Les deux bassins versants ont en commun d'avoir des activités agricoles intensives. Le bassin versant du Gouet est aussi soumis à des rejets urbains et industriels qui sont traités dans les stations d'épuration. Les apports d'orthophosphates en provenance des deux bassins sont proches et cela tend à montrer que les rejets urbains sont aujourd'hui assez bien maîtrisés. Les rejets résiduels de phosphore par les stations d'épuration ont vraisemblablement diminué après à la mise en place d'unités de déphosphatation au début des années 1990. La faiblesse des flux de phosphore total en période d'étiage confirme que les apports phosphorés d'origine urbaine et industrielle sont désormais limités au regard des apports d'origine agricole.

L'accumulation du phosphore dans les sédiments s'effectue de manière directe par la décantation des matières en suspension et de manière indirecte par l'assimilation d'orthophosphates par le phytoplancton qui alimente ensuite directement ou indirectement après broutage par le zooplancton, la sédimentation biogène. La quantité de phosphore piégée dépend de la gestion hydraulique, du temps de séjour et du niveau d'eutrophisation de la retenue. En hiver, la retenue est maintenue à un niveau bas (marnage de 4 m) pour écrêter les



crues et le fonctionnement des turbines de l'usine hydroélectrique favorise le transit amont aval de la masse d'eau. Les conditions sont peu favorables à la décantation des matières en suspension et le piégeage du phosphore particulaire est de ce fait moins important. Pendant les crues de janvier 2001, le stockage du phosphore a concerné 62 % des apports de Pp et 35 % de P.PO₄. Au printemps le stockage augmente fortement à des valeurs voisines de 85 % (Pp et P.PO₄). En été, les écoulements des rivières sont faibles et la retenue est maintenue autant que possible, à son niveau maximum. Les matières en suspension décantent d'autant plus facilement que la masse d'eau est soumise à un très faible courant. Le phosphore nécessaire au développement de la biomasse algale est fourni par la masse d'eau, la minéralisation de la matière organique et les relargages à partir des sédiments qui sont favorisés par les conditions réductrices au niveau du fond (Jewel et Mc Carthy, 1971; Scribe *et al*, 1990). Pendant cette période, le phosphore accumulé dans les sédiments est supérieur au flux entrant et la retenue constitue un véritable piège à phosphore.

Les teneurs moyennes en phosphore total des sédiments ont été de 0,25 % pendant le suivi 2002 – 2003. Les analyses effectuées pendant la période 1989 – 1992 sur des échantillons recueillis dans les mêmes sédimentomètres avaient donné une valeur moyenne de 0,30 % (écart-type : 0,08 - 127 mesures) Il apparaît donc que les apports phosphorés ont été très légèrement réduits en 10 ans. Cette évolution favorable est sans aucun doute due à une diminution des apports de P.PO₄ suite à la mise en place d'unités de déphosphatation dans les stations d'épuration au début des années 1990. Il n'est pas possible de préciser si la diminution du phosphore a été limitée dans le temps au début des années 1990 ou si elle a été progressive pendant la période 1990 – 2004.

Les apports de phosphore et les dépôts de sédiments sur le fond de la retenue présentent des distributions unimodales respectivement centrées sur les bimestres janvier – février et septembre – octobre (Fig. 4). La période d'apport maximum de phosphore dans la retenue



précède de 6 mois la période de forte sédimentation et donc d'accumulation du phosphore sur le fond de la retenue. Les apports de phosphore sont liés au cycle hydrologique : reprise des débits en automne, crues hivernales et débits soutenus de printemps, tandis que l'accumulation du phosphore dans les sédiments suit le cycle de développement du phytoplancton (printemps, été, automne). L'importance de la sédimentation biogène dépend des successions algales (Reynolds, 1992) et des conditions de dégradation de la matière organique (Jigorel et Bertru, 1993). La sédimentation biogène est de ce fait maximale en été et en automne lorsque les proliférations algales (chlorophycées, diatomées, cyanobactéries) sont abondantes. Pendant cette période les apports des rivières sont très faibles. De juillet à octobre, la quantité de phosphore accumulée dans les sédiments est supérieure aux apports totaux dans la retenue. L'eau du réservoir et surtout la biomasse phytoplanctonique et les sédiment jouent alors un rôle tampon pour le phosphore. Après épuisement du stock d'orthophosphates présent dans l'eau, le phosphore est fourni par la minéralisation de la matière organique et par les relargages des sédiments.

CONCLUSION

Les responsables bretons de la gestion des réservoirs d'eau brute destinée à la production d'eau potable ont surtout privilégié les mesures visant à réduire les teneurs en nitrates qui excèdent souvent 50 mg.l^{-1} . Ils prennent aujourd'hui conscience du rôle capital du phosphore et celui-ci est désormais pris en compte dans les programmes de restauration de la qualité des milieux aquatiques. Ainsi, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France a exigé récemment pour l'une des retenues départementales (Arguenon) des Côtes d'Armor, la mise en place de mesures réglementaires « pour maîtriser les apports de phosphore d'origine agricole (organique et minéral) favorisant le développement de cyanobactéries toxiques dans la retenue et d'autres phénomènes d'eutrophisation gênants pour la production d'eau



potable ».

Il est établi que l'agriculture intensive et les productions animales hors sol qui caractérisent l'ouest armoricain, sont à l'origine d'apports phosphorés énormes. L'importance du stockage du phosphore dans les retenues dépend à la fois des conditions de décantation des matières en suspension (volume, temps de séjour) et du degré d'eutrophisation du milieu qui détermine les taux de sédimentation biogène. Dans la retenue sur le Gouet, l'action conjuguée de ces deux processus permet de stocker la moitié des apports de P.PO₄ et les deux tiers de Pp dans les sédiments. Ce dernier devient disponible lorsque des conditions réductrices règnent au niveau du fond et maintient ainsi un processus d'eutrophisation même en l'absence d'apports externes.

L'amélioration trophique et la suppression des blooms de cyanobactéries dans les réservoirs passent par une diminution drastique des flux entrants. La reconquête de la qualité du milieu sera très longue car toutes les mesures préventives mises en œuvre dans la retenue sur le Gouet n'ont permis d'abaisser les teneurs en phosphore des sédiments de plus 16 % en 15 ans. Le stock de phosphore accumulé dans les sédiments contribue de manière significative au maintien du processus d'eutrophisation et la restauration globale du milieu nécessitera à terme un curage des sédiments.

REFERENCES

- Bloesh, J. & Burns, N. M. (1980). A critical review of sedimentation trap technique. *Schweiz. Z. Hydrol.* **42**. pp. 15-55.
- Cann, C. (1994). Etude de l'évolution des flux de phosphore apportés au littoral par le cours d'eau du Yar en baie de Lannion. Editions CEMAGREF. 135 pages.
- Forsberg, G. (1989). Importance of sediments in understanding nutrient cycling in lakes. Sly, P. G. & Hart, B. T. (eds). *Sediment/Water Interaction. Hydrobiologia* **176/177**. pp. 263-277
- Jewell, W. J. & McCarthy P.L. (1971). Aerobic decomposition of algae. *Envir. Sci. Technol.* **5**. pp.1023-1031.
- Jigorel, A. & Bertru, G. (1993). Endogenic development of sediments in a eutrophic lake. *Hydrobiologia* **268**. Kluwer Academic Publishers. Belgium. pp. 45-55.



- Jigorel, A. & Morin, J.P. (1994a). Eutrophisation et sédimentation dans les retenues départementales des Côtes d'Armor, France. Actes des journées « Petits barrages » AFEID-CFGB, Bordeaux 1993. *Cémagref Editions 1994*. pp.431-448.
- Jigorel, A. & Morin, J.P. (1994b). Bilan de la sédimentation dans une retenue eutrophisée quinze ans après sa création. Proceedings Seventh International Congress of International Association of Engineering Geology. Lisbonne 1994. pp 2667-2674.
- Jigorel, A. Morin, J.P. & Bertru, G. (1996). Eutrophisation et qualité des eaux brutes dans les retenues des Côtes d'Armor, France. Hydrologie dans les pays celtiques. Actes du 1^{er} Colloque Interceltique d'Hydrologie et de Gestion des Eaux. Rennes, France, 8 - 11 juillet 1996. INRA Editions, Paris 1996. *Les Colloques n° 79*. pp. 241-252.
- Reynolds, C. S. (1988). The concept of biological succession applied to seasonal periodicity of freshwater phytoplankton. *Verh. Int. Ver. Limnol.* **23**. pp. 683-691.
- Reynolds, C. S. (1992). Eutrophication and management of planktonic algae: what Vollenweider couldn't tell us. In Eutrophication: Research and application to water supply. Sutcliffe D. W. & Jones, J.G. (eds). Fresh Water Association. pp. 4-29.
- Scribe, P. Ngoumbi-Nzouzi, J. S. Fuche, C. Pepe, C. & Saliot, A (1990). Biochemistry of organic matter in lake Geneva: 1 – Particulate hydrocarbons as biogenic and anthropogenic molecular markers. Bonin, D.J. & Golterman H. S. (eds). Fluxes between trophic levels and through the water-sediment interface. *Hydrobiologia* **207**. pp 319-331.
- Vollenweider, R. A. & Kerekes, J. (1980). The loading concept as basis for controlling eutrophication. Philosophy and preliminary results of the OECD programme on eutrophication. *Progress in Water Technology* **12**. pp. 5-38.

