

## ESSAI DE BILAN SÉDIMENTATION / ÉROSION DU LAC DE GRAND-LIEU (LOIRE-ATLANTIQUE) : CONSÉQUENCES POUR LA GESTION DU MILIEU NATUREL

Eric MERCIER<sup>1\*</sup> & Martin SANCHEZ<sup>1</sup>

**SUMMARY.** — *Sedimentation / erosion balance in the lake of Grand-Lieu (France, Loire-Atlantique): implications for natural environment management.* — The lake of Grand-Lieu (2000 ha) is a part of a large wetland of Western France. The surface and depth of this lake recently increased. This erosive crisis began around thirty years ago as the consequence of an imbalance between sediment input (0.15 to 0.5 kg/m<sup>2</sup>/year of allochthonous TSS and 0.03 to 0.1 kg/m<sup>2</sup>/year of autochthonous organic matter) and sediment export. The export of sediment is about 1.5 to 2 times higher than inputs ; this situation is exceptional in lake systems. Ultimately, conservation of certain natural environments could be compromised. In this paper, first we present erosion processes that are related to the extensive resuspension of sediments, and then show how, among other factors, the current water management promotes the export of sediment and how it is possible to adapt it in order to reduce the sediment export.

**RÉSUMÉ.** — Le lac de Grand-Lieu, partie lacustre (2000 ha) d'une vaste zone humide de l'Ouest de la France, a vu sa surface et sa profondeur augmenter récemment. Cette crise érosive a débuté depuis une trentaine d'années et résulte d'un déséquilibre entre l'apport sédimentaire (de 0,15 à 0,5 kg/m<sup>2</sup>/an de MES allochtone et de 0,03 à 0,1 kg/m<sup>2</sup>/an de MO autochtone) et l'exportation qui est environ 1,5 à 2 fois plus importante ; ce qui est exceptionnel dans les systèmes lacustres. À terme, la conservation de certains milieux naturels peut être compromise. Nous présentons les processus d'érosion qui sont liés à l'abondante remise en suspension des sédiments, puis nous montrons comment la gestion hydraulique actuelle, entre autres facteurs, favorise l'exportation de ces sédiments et comment il est possible de réduire l'impact de cette gestion.

---

Les lacs, qui constituent des anomalies dans le profil d'équilibre des cours d'eau, sont, à l'échelle géologique, destinés à se combler (Hakanson & Janson 1983 ; Campy & Meybeck, 1995). Dans une démarche de conservation des milieux, qui s'intéresse à une échelle de temps décennale à centenaire, cette évolution est généralement suffisamment lente pour être négligée. Dans le cas des lacs peu profonds, le problème du comblement doit être envisagé de façon plus fine car un faible rehaussement du fond peut radicalement modifier l'écosystème. Par ailleurs la dynamique du phénomène est également plus complexe ; en effet s'opposent alors deux phénomènes antagonistes que sont la sédimentation et l'érosion. À long terme le comblement domine mais, si l'on s'intéresse à des périodes plus courtes, l'érosion peut temporairement prendre le dessus. Classiquement la durée des phases d'érosion est courte (tempête, crue, etc.) et l'hypothèse du comblement peut être retenue à l'échelle décennale voire même annuelle.

---

<sup>1</sup> Université de Nantes, Faculté des Sciences, Laboratoire de Planétologie et Géodynamique (CNRS UMR-6112), 2 rue de la Houssinière, BP 92208. F-44322 NANTES cédex 3

\* Auteur correspondant. Tél. : 02 51 12 54 60. E-mail : [eric.mercier@univ-nantes.fr](mailto:eric.mercier@univ-nantes.fr)

Jusqu'à récemment, c'est dans ce cadre théorique qu'à été envisagé le cas du lac de Grand-Lieu (fig. 1) : ce lac subirait un comblement continu depuis au moins trois siècles (Marion & Marion, 1976) et la vitesse moyenne de comblement actuelle, serait comprise entre 1 et 3 cm/an (e.g. Marion & Marion, 1976 ; Jigorel, 1992 ; Marion, 1992, Commissariat au Plan, 1994, p. 298).

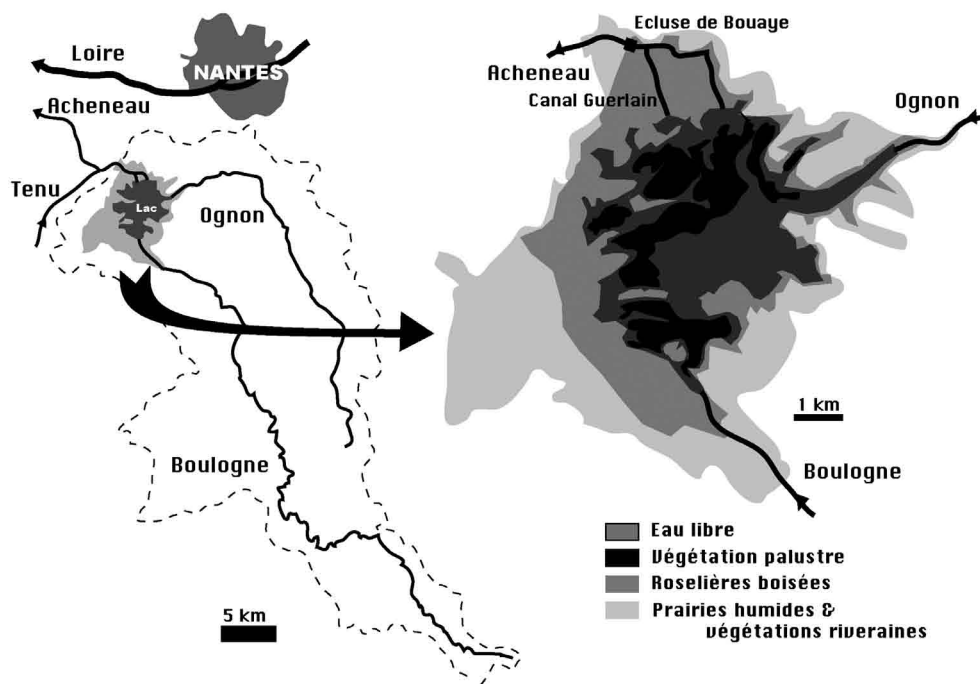


Figure 1. — (A) Localisation de la zone humide de Grand-Lieu et de son bassin versant dans la région nantaise. (B) Répartition des principaux milieux et localisation des émissaires et ouvrages hydrauliques (d'après Martin & Rouxel, 2007 ; Boret & Reeber, 2008, simplifié).

L'étude de divers documents couvrant les XVIII<sup>ème</sup>, XIX<sup>ème</sup> et XX<sup>ème</sup> siècles (relevés bathymétriques, cartes, ouvrages savants ou techniques) a permis de remettre en cause cette conception (Guillou *et al.*, 2008). Il a ainsi été démontré qu'au cours des trois siècles précédents, les sédiments du lac de Grand-Lieu ont subi trois phases d'érosion importante (fig. 2). Ces phases ont duré quelques dizaines d'années chacune, soit une durée très supérieure à la période caractéristique des phases érosives dans un tel contexte (cf. *supra*). Ces longues périodes d'érosion résulteraient de la réaction du milieu à des aménagements hydrauliques lourds qui ont eu pour effet de faciliter l'évacuation des eaux après la crue hivernale.

Par ailleurs, selon cette étude historique, une telle phase érosive serait actuellement en cours, et ce depuis le milieu des années 1970. En effet, depuis cette période, le gestionnaire du lac (Société Nationale de Protection de la Nature : SNPN) constate à la fois, (1) une augmentation de la surface lacustre (15 ha/an en moyenne actuellement : fig. 3), (2) un accroissement de sa profondeur (0,5 mm/an en moyenne sur la période 1997-2006 : fig. 4) et, (3) localement, des érosions très spectaculaires comme l'élargissement du canal Guerlain (fig. 1) qui est passé de 6 à 25 m de large depuis sa création en 1964. Le lac de Grand-Lieu et la zone humide qui l'entoure constituent un ensemble écologique remarquable (ZNIEFF, Site inscrit, Site classé, Réserve de chasse, ZPS, Natura 2000, Ramsar, Réserve Naturelle : Struillou *et al.*, 2006) ; on conçoit que selon que le lac est en voie de comblement rapide ou en phase de curage, sa gestion et les mesures de conservation des milieux ne peuvent qu'être très différentes, voire diamétra-

lement opposées. La mise en place d'une politique de gestion adaptée au bilan sédimentaire réel du lac de Grand-Lieu passe par la compréhension et la quantification des phénomènes en jeu. Dans ce qui va suivre nous nous proposons de dépasser les aspects bathymétrique et cartographique et d'essayer de faire le point sur les processus sédimentaires et érosifs. Puis, en conclusion, nous discuterons succinctement des modifications à apporter à la gestion du lac, notamment sur le plan hydraulique.

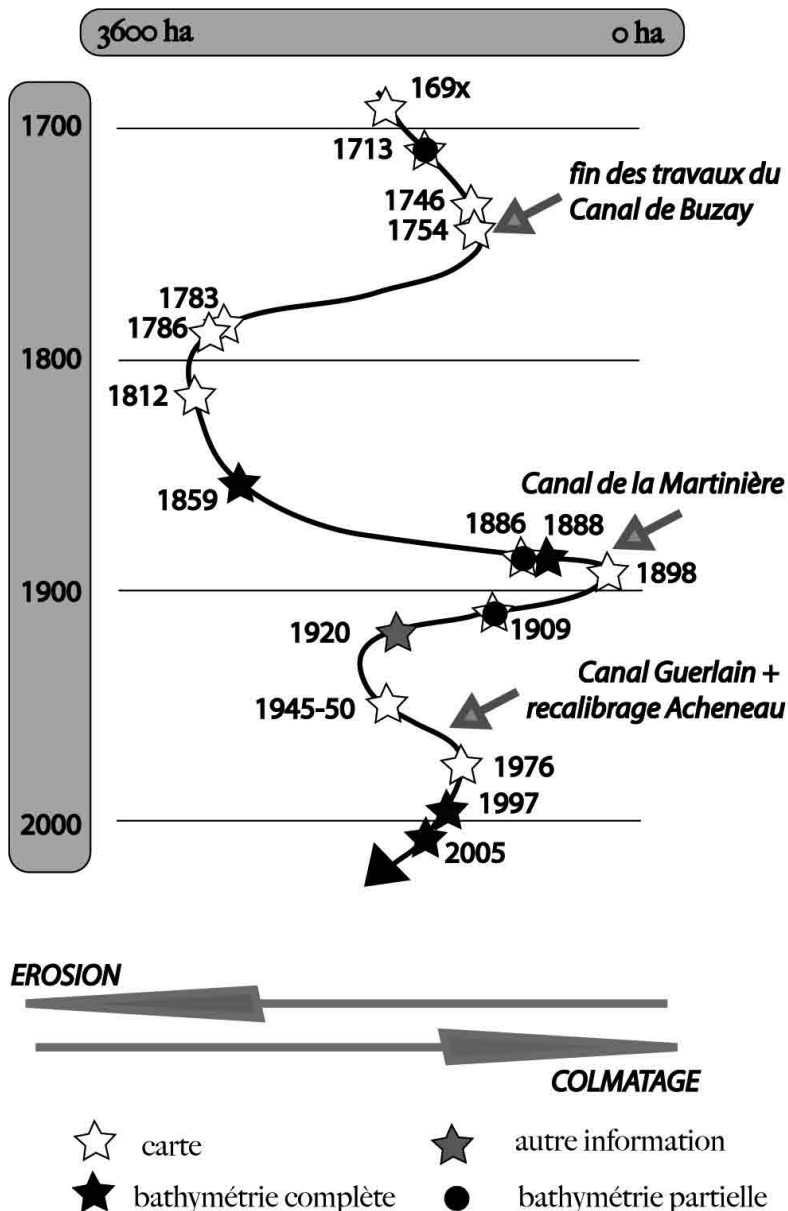


Figure 2. — Évolution schématique de la surface lacustre depuis le début du XVIII<sup>ème</sup> siècle (Guillou *et al.*, 2008, complété) et localisation temporelle des principales étapes documentées. Depuis 1976 le lac serait en érosion en réaction à des travaux hydrauliques majeurs sur son exutoire (recalibrage important de l'Acheneau) et des aménagements internes (création du canal Guerlain).

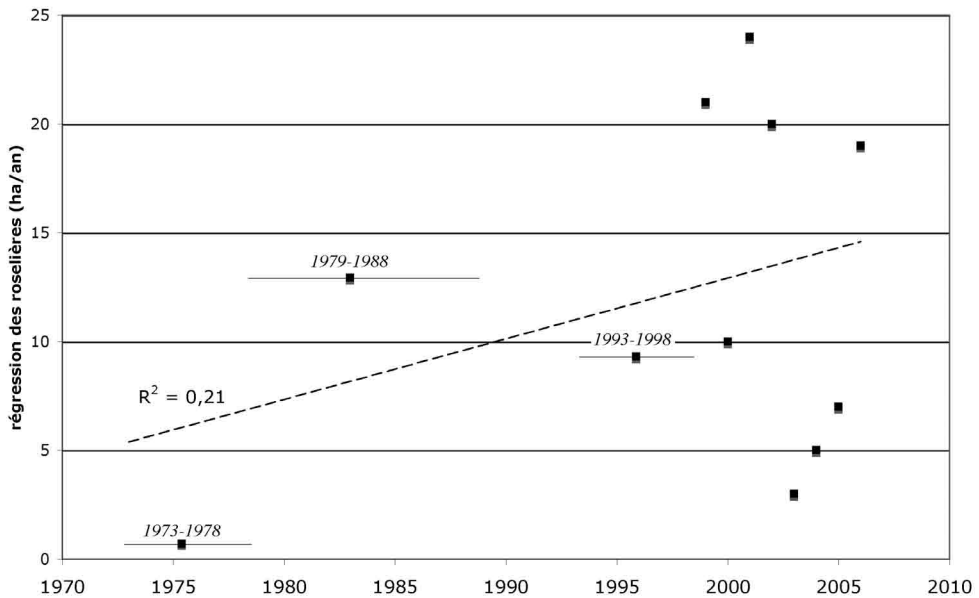


Figure 3. — Évolution du recul des roselières au profit du lac (exprimée en ha/an), d'après les photographies aériennes (données de Marion, 1992 ; Borret & Reeber, 2008). Une certaine accélération de l'érosion des berges est sensible.

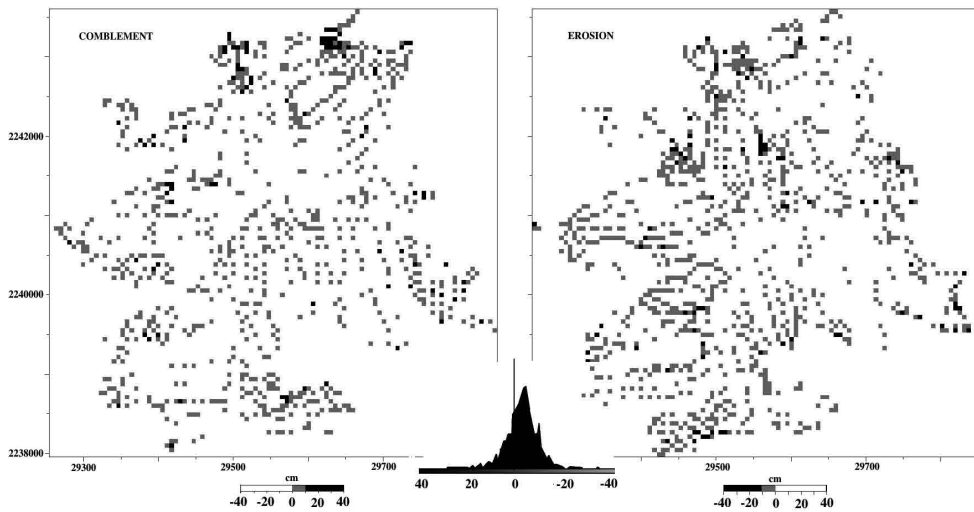


Figure 4. — Cartes de localisation des points en érosion et en comblement (différence des mesures réalisées par la SNPN en 1997/1998 et en 2005/2006 ; cartes en coordonnées Lambert II étendu). Les zones en érosion ou comblement modérés sont largement majoritaires (-10 à +10 cm : en gris sur les cartes) ; mais le bilan est érosif, ce qui illustré par l'histogramme (environ 0,5 mm/an soit environ 0,2 kg/m<sup>2</sup>/an de sédiment sec) (données d'après Boret, 2005).

## LE LAC DE GRAND-LIEU ET SON CONTEXTE HYDRAULIQUE ACTUEL

La zone humide du lac de Grand-Lieu est localisée au niveau d'un élargissement de vallée où se rejoignent l'Ognon et la Boulogne pour devenir l'Acheneau. Le bassin versant d'alimentation de cette zone humide (fig. 1) est de 840 km<sup>2</sup>. L'Acheneau se jette dans l'estuaire de la Loire et sa pente est extrêmement faible, si bien que le courant peut s'inverser et, avant des travaux hydrauliques réalisés au XIX<sup>ème</sup> siècle, les marées étaient sensibles dans le lac (Guillou *et al.*, 2008).

En été, on peut reconnaître dans la zone de Grand-Lieu une mosaïque de milieux qui ont globalement une organisation concentrique (fig. 1) :

— au centre, le lac proprement dit, d'une profondeur moyenne de 0,70 m à la fin de l'été. En dépit de sa taille (2000 hectares) il correspond plutôt à la définition d'un étang dans la classification de Dussart (1992). Cet étang, que nous continuerons néanmoins à appeler lac en conformité avec les habitudes locales et la terminologie internationale (Scheffer, 1998), est divisé en une zone centrale d'eau libre (environ 1300 hectares), et une zone périphérique (environ 700 hectares), où se développe une végétation palustre (macrophytes flottants).

— entourant le lac, un ensemble de roselières et de roselières boisées en continuité avec celles qui bordent les vallées de l'Ognon, de la Boulogne et de l'Acheneau (environ 1650 hectares).

— en position tout à fait externe, on trouve des prairies humides (1600 hectares), particulièrement bien représentées au sud-ouest du lac.

Depuis la construction de l'écluse de Bouaye (au début des années 1960), le lac n'est alimenté que par la Boulogne et l'Ognon auxquels s'ajoute le débit souterrain de la nappe aquifère contenue dans les sédiments post-glaciaires situés au SE.

Le flux annuel provenant des rivières a été évalué à 168.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> pour la période 1945-1991 (CEMAGREF *in* Marion, 1992), et à 153.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> pour la période 1981-1994 (débit spécifique d'après Hallier (1996), corrigé de la surface du bassin versant). Ce débit est inégalement réparti dans l'année (fig. 5) avec un flux quasiment nul de juin à septembre. Par ailleurs les moyennes mensuelles masquent une forte variabilité avec des crues hivernales et printanières parfois importantes (par exemple une pointe de crue à plus de 93 m<sup>3</sup>/s le 13 février 1988 soit presque 10 fois la moyenne mensuelle ; Hallier, 1996).

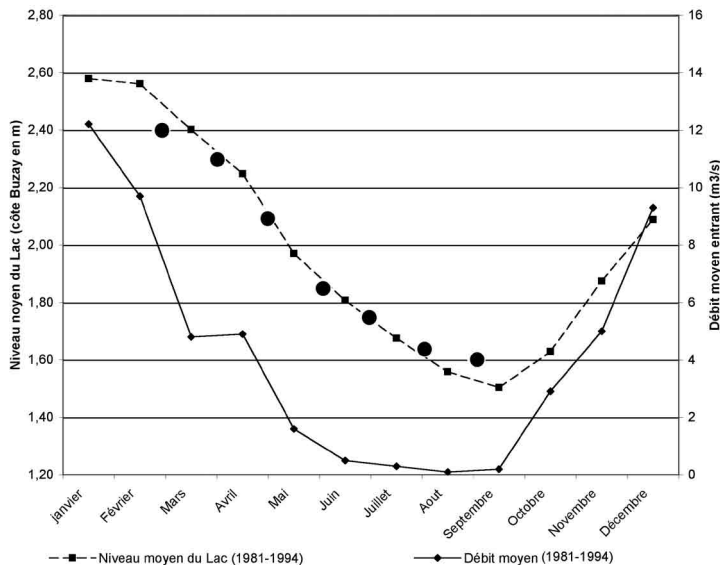


Figure 5. — Moyenne interannuelle (1981-1994) du débit liquide de surface alimentant le lac et niveau moyen du lac (1981-1994), donné comme toutes les cotes citées dans ce travail en cote « Buzay » (= NGF(69) - 0,45 m) qui est utilisée systématiquement comme référence hydraulique dans la région ; Peltier, 2004) (d'après Hallier, 1996). Les points noirs indiquent les niveaux de gestion actuelle (niveaux dit des « accords de 2004 » ; Pierrelée & Lamprier, 2004).

Le flux de la nappe est mal connu, sans doute de l'ordre d'une dizaine de  $10^6 \text{ m}^3$  si l'on extrapole les données du Martin & Rouxel (2007). L'évacuation de l'eau se fait par évapotranspiration ( $19.10^6 \text{ m}^3$  ; Martin & Rouxel, 1997), mais surtout par l'intermédiaire de l'Acheneau (fig. 1). Cette évacuation est contrôlée par l'écluse de Bouaye en respectant des niveaux fixés par arrêté préfectoral. Cela n'a pas toujours été le cas et l'on peut résumer l'apparition et l'évolution de cette gestion de la façon suivante (Guillou *et al.*, 2008) (fig. 6) :

- période antérieure à 1958 : le niveau du lac au printemps est la conséquence de l'ampleur des crues hivernales et la faible capacité que possédait alors l'Acheneau à évacuer les débits. Les années humides, la crue hivernale débordait largement sur l'été ;

- période 1958-1964 : c'est l'époque d'un profond recalibrage de l'Acheneau, l'évacuation des débits est grandement facilitée si bien que les cotes du lac s'écroulent, notamment à la fin de l'été. Le propriétaire du lac obtient la construction de l'écluse de Bouaye qui commandera le niveau du lac à partir de 1962 ;

- période 1965-1994 : le niveau est fixé par arrêté préfectoral, ce qui revient à remonter le niveau moyen estival de presque 20 cm (Guillou *et al.*, 2008) et à supprimer les étiages les plus sévères. À partir de 1985 une gestion plus rigoureuse de l'écluse permet d'éliminer plus tôt dans l'année les volumes résiduels des crues d'hiver. Au total, (1) l'augmentation de la capacité structurelle à évacuer l'eau hivernale, (2) le mode de gestion de l'écluse et (3) des aménagements secondaires (creusement, en 1964, du canal Guerlain qui constitue un raccourci hydraulique entre le lac et l'écluse), concourent à augmenter de façon importante les pointes de courants de vidange dans le lac (fig. 7) ;

- période 1995-actuel : suite à l'élaboration d'une doctrine de gestion qui sera présentée et discutée plus loin dans le texte, un nouvel arrêté remonte les cotes (+0,50 m au 1<sup>er</sup> avril par exemple). Des conflits importants avec les riverains étant apparus, de nouvelles dispositions modérant la hausse de niveau sont prises successivement en 1996 et 2004.

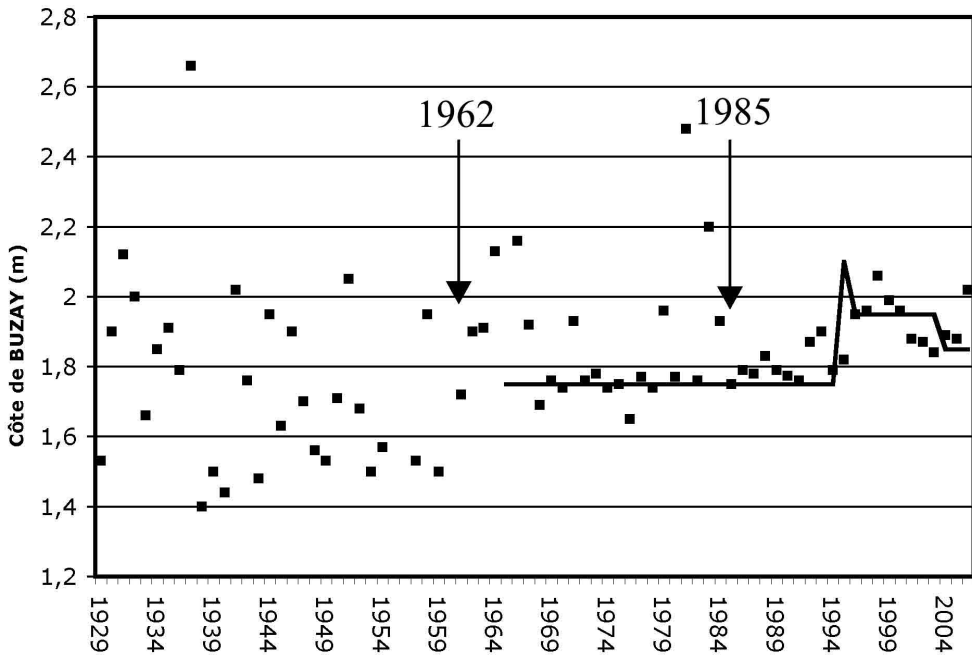


Figure 6. — Cote du lac au 1<sup>er</sup> juin depuis 1929. Le trait gras continu indique l'évolution du règlement d'eau (arrêté préfectoral ou accord). On remarque les deux ruptures dans la gestion signalées dans le texte qui se traduisent par la suppression des étiages estivaux au début des années 1960, puis suppression des crues estivales (1985).

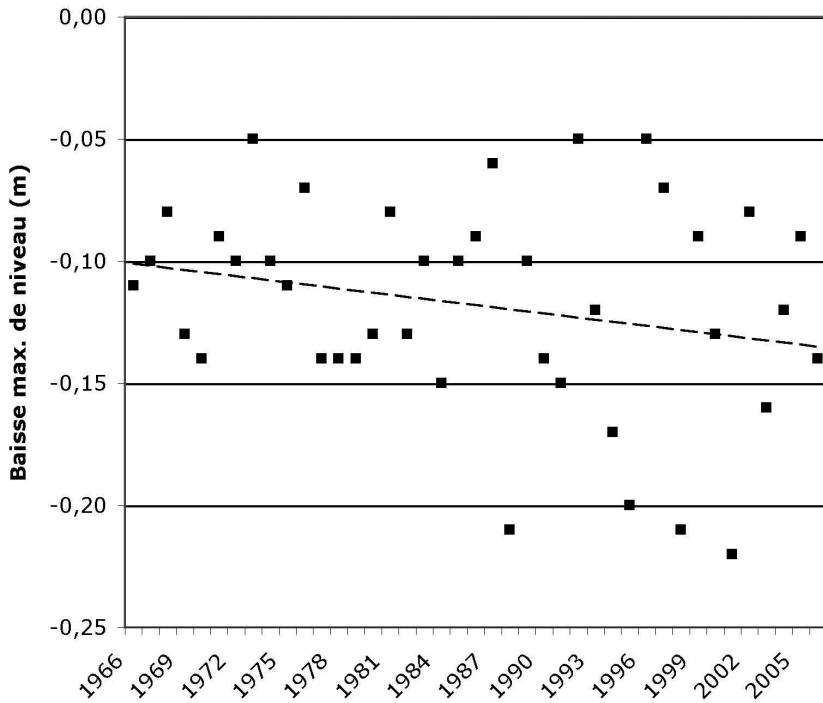


Figure 7. — Évolution de la vitesse maximale de baisse du niveau lacustre sur 3 jours depuis l'existence d'un règlement d'eau. On note que, depuis 1985, la gestion des niveaux de plus en plus rigoureuse (Fig. 6) engendre, lors des hivers humides, des pointes de vidange de plus en plus rapides.

Actuellement l'écluse de Bouaye est fermée à partir de mai ou juin (Hallier, 1996) ; seule l'évapotranspiration contribue alors à la baisse du niveau avant les premières pluies efficaces d'automne (début septembre à fin novembre selon les années).

En moyenne, le temps de séjour théorique de l'eau dans le lac est inférieur à un mois (Marion & Marion, 1976), mais cette évaluation masque une grande fluctuation saisonnière du fait de la variabilité à la fois des flux entrants et du volume du lac (fig. 5). Les eaux sont renouvelées très rapidement en hiver (quelques semaines), alors qu'en été, quand l'écluse de Bouaye est fermée, elles sont piégées dans la zone humide jusqu'à la remontée automnale des niveaux. Les variations de cote du lac se traduisent par une variation de la surface d'inondation, et en hiver ce sont plus de 5000 ha qui se retrouvent sous les eaux en incluant notamment les prairies humides.

## LE BILAN SÉDIMENTAIRE

Classiquement (Hakanson & Janson, 1983) l'origine des sédiments d'un lac est à rechercher dans le bassin versant amont, on parle de sédiments allochtones, et dans le lac lui-même, on parle de sédiments autochtones. Dans le cas du lac de Grand-Lieu, on peut considérer que les premiers sont essentiellement constitués de matières minérales transportées sous forme de matières en suspension (MES), et que les seconds sont formés de matière organique (MO) provenant de l'écosystème lacustre (CEMAGREF, 1991). Les apports éoliens, organiques allochtones et les précipitations minérales autochtones sont ici négligeables.

## LES SÉDIMENTS DU LAC DE GRAND-LIEU

Les sédiments ne sont présents que dans la partie centrale et occidentale du lac. À l'Est, et sur plusieurs centaines d'hectares, c'est le substratum géologique qui affleure sous la forme de galets et graviers d'âge quaternaire ancien. Cette absence de sédiments récents résulte de l'effet combiné (1) des vents dominants d'Ouest, qui ont un effet maximum sur l'agitation de l'eau dans cette zone (Papon, 2007 ; Liao, 2006) et (2) du flux de la nappe aquifère qui émerge à ce niveau en lessivant les formations détritiques anciennes. Quand ils existent, les sédiments sont vaseux, de couleur marron à brun et fluides. Ils possèdent une teneur en eau élevée (60 à 85 % ; CEMAGREF, 1991 ; Creach, 1998) et sont riches en débris végétaux. Cette vase ne dégage aucune odeur particulière et correspond assez bien à la définition de Gytija (Dussart, 1992), même si cette terminologie est contestée (Campy & Meybeck, 1995).

La teneur moyenne en matière organique est, avant l'hiver, remarquablement constante (20 à 23 %, exprimée en perte au feu) quelles que soient la localisation et la profondeur (Tab. I). Le reste correspond à la fraction minérale essentiellement constituée de quartz (supérieure à 98 % selon nos analyses minéralogiques aux rayons X). Cette composition de la fraction minérale est surprenante car elle ne reflète pas celle des sols du bassin versant qui, même quand ils sont développés sur des niveaux géologiques très sableux, contiennent une part non négligeable de minéraux argileux (Gaudin, com. pers., 2008). On peut, dès à présent, soupçonner des processus de tri et de ségrégation durant le transport et la sédimentation.

TABLEAU I

*Données disponibles de MO (exprimée en perte au feu) dans les sédiments. Les données qui concernent septembre et octobre sont indiquées en caractères gras. Les données originales de Creach (1998) en carbone organique sont transformées en perte au feu à l'aide du coefficient local établi par CEMAGREF (1991)*

	N	Période d'échantillonnage	Profondeur (m)	MO en % (perte au feu)		
				Max.	Min.	Moy.
<b>CEMAGREF (1991)</b>	<b>20</b>	<b>Septembre</b>	<b>0 à 0,70</b>	<b>33</b>	<b>11</b>	<b>20,1</b>
<b>Creach (1998)</b>	<b>26</b>	<b>Sept./Oct.</b>	<b>0,09 à 0,55</b>	<b>38</b>	<b>14</b>	<b>22,9</b>
Cottini (2007)	28	Fév./ Avril/ Mai	0 à 0,2	52	1	25,9
<b>Guillou (2007)</b>	<b>12</b>	<b>Octobre</b>	<b>0,05 à 0,70</b>	<b>26,2</b>	<b>16,8</b>	<b>22,4</b>

Sur le plan granulométrique et quelle que soit la profondeur, la fraction minérale est caractérisée par une distribution unimodale (CEMAGREF, 1991 ; Liao, 2006 ; Cottini, 2007) et une forte représentation (environ 50 %) de la classe granulométrique des limons fins (2-20 µm). Selon le CEMAGREF (1991) c'est au sein de cette classe que se situe la médiane ; les analyses plus récentes (Liao, 2006 ; Cottini, 2007) indiqueraient une médiane plus grossière (100 à 200 µm) sans qu'il soit certain que cette différence soit significative.

### LE FLUX SÉDIMENTAIRE ENTRANT

Le CEMAGREF (*in* Jigorel, 1992) a évalué le flux entrant de MES minérale à 5000 à 10 000 t pour l'année 1990-1991, dont environ 80 % lors des 19 jours de crue de fin décembre 1990-début janvier 1991. Depuis 2002, une analyse de MES est réalisée chaque mois par la DIREN sur les deux contributeurs du lac. En extrapolant ces valeurs mensuelles, on peut calculer le flux de MES entrant dans le lac, soit 2400 t/an, c'est-à-dire 2 à 4 fois moins que l'évaluation précédente. Mais on sait que la méthodologie utilisée dans la seconde évaluation (une mesure par mois à une date aléatoire) sous-évalue l'effet des crues (Kern & Westrich, 1997) ; alors que celui-ci peut être déterminant dans le bilan annuel du flux de MES (80 % en 19 jours lors de l'année 1990-91). Nous retiendrons donc la fourchette proposée par le CEMAGREF comme ordre de grandeur du flux entrant de MES.

Si l'on divise le flux annuel en MES par la surface du lac on obtient un taux de sédimentation potentiel annuel : 0,25 à 0,5 kg/m<sup>2</sup> (soit, pour fixer les idées, 0,85 à 1,7 mm de vase



minérale avec une teneur en eau de 75 %). La valeur de  $0,5 \text{ kg/m}^2$  constitue le maximum envisageable car (1) il retient la fourchette haute de l'évaluation du CEMAGREF, mais aussi, (2) il ne tient pas compte des exportations (voir *infra*), et surtout, (3) il suppose que tout le flux de MES se sédimente uniquement dans les 2000 hectares de la zone lacustre *s.s.* Or l'essentiel du flux de MES est introduit dans le lac en période où celui-ci est en crue (fig. 8) ; une part très importante de la sédimentation concerne donc plutôt les roselières et les prairies humides qui représentent plus de 70 % de la surface d'inondation hivernale. Il est possible qu'une partie de ce matériel sédimentaire retourne ensuite dans le lac, à la faveur de divers processus de remobilisation sédimentaire, mais une part significative doit être piégée hors du lac. Si  $0,5 \text{ kg/m}^2/\text{an}$  représente la fourchette haute d'apport de MES allochtones envisageable, la fourchette basse est plus difficile à fixer, sans doute de l'ordre de  $0,15 \text{ kg/m}^2$ .

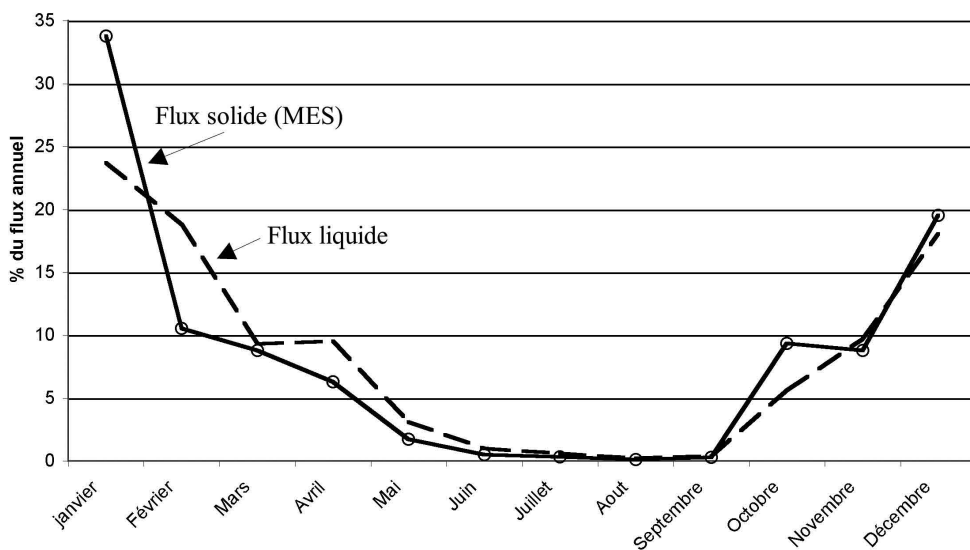


Figure 8. — Flux mensuels moyens, hors crues, de MES et d'eau (en % du flux annuel) ; données DIREN sur l'Ognon (Sorinières) et la Boulogne (St Philbert de Grand-Lieu) (période 2002-2006).

La granulométrie de la MES apportée par les rivières est inconnue ; néanmoins, Cottini (2007) a comparé la granulométrie de sédiments déposés dans les cours avals de l'Ognon et de la Boulogne (où existe un courant) avec celle de sédiments de surface du lac (où le courant est moindre). Paradoxalement il a montré que les sédiments étaient plus grossiers dans le lac (fig. 9), nous reviendrons sur cette observation.

#### LA SÉDIMENTATION ORGANIQUE AUTOCHTONE

La quantification de cette composante est souvent difficile (Malmaeus & Hakanson, 2003). Jigorel (1992) a installé 19 pièges à sédiments situés à 50 cm du fond du lac et dont le rôle était d'intercepter et de conserver la sédimentation détritique et organique. En ce qui concerne la MO (macrophytes et microphytes lacustres exprimés en matière sèche), et sur une année, il a recueilli en moyenne  $9,2 \text{ kg/m}^2$ . Ce taux ne représente pas la contribution de la végétation aquatique à la sédimentation car plusieurs facteurs tendent à le majorer fortement (Bloesch & Burns, 1980 ; Bloesch & Uehlinger, 1986 ; Bloesch, 1994).

— une partie de la MO sédimentée subit normalement, à l'interface eau / sédiment puis dans le sédiment, une minéralisation qui revient à la faire disparaître du bilan sédimentaire. Ce n'est pas le cas dans les pièges qui sont relevés tous les deux mois.

— ce taux intègre la contribution d'organismes qui ont trouvé dans l'appareil un milieu de vie favorable. C'est notamment le cas des diatomées, particulièrement abondantes dans la matériel recueilli, alors qu'elles sont rares, voire très rares, dans les sédiments lacustres.

— les pièges recueillent des sédiments (MES et MO) précédemment déposés au fond du lac mais remis en suspension sous l'effet de l'agitation de l'eau. Ce phénomène est particulièrement bien illustré par la MES qui contribue pour 25,3 kg/m<sup>2</sup>/an à l'alimentation des pièges alors que, nous l'avons vu, 0,5 kg/m<sup>2</sup>/an constitue le maximum envisageable.

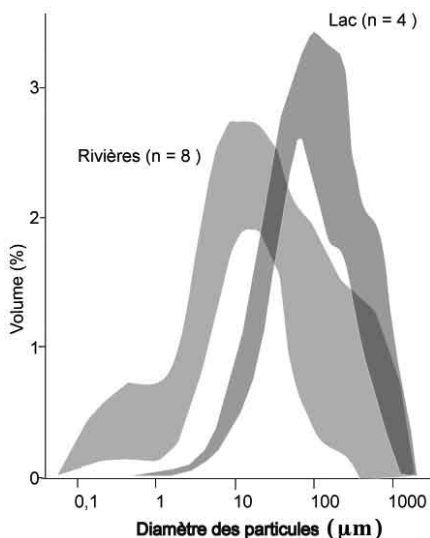


Figure 9. — Enveloppes des courbes granulométriques de la fraction minérale des sédiments du lac et des cours inférieurs de l'Ognon et de la Boulogne (d'après Cottini, 2007).

Selon l'importance que l'on donne à ces différents facteurs, on peut arriver à des évaluations très différentes de la contribution de la MO à la sédimentation lacustre. Ainsi en 1992, Jigorel avait conclu à un apport en MO de 26 000 à 40 000 t/an soit de 1,4 à 2,5 cm/an de sédiments organiques (selon son calcul). Puis Marion (1998), suite au travail de Le Rouzic & Brient (1998), a ré-évalué ces conclusions pour ramener la contribution de la végétation à environ 15 000 t/an (0,8 kg/m<sup>2</sup>/an), soit une sédimentation de l'ordre de quelques mm/an.

Cette dernière estimation, pourtant fortement minorée par rapport à la première, apparaît encore excessive. En effet, dans un sédiment, comme dans tout mélange, la proportion des constituants reflète la contribution des différentes sources sédimentaires. Dans les sédiments du lac, la MO représente 20 à 23 % du sédiment total à la fin de l'été (Tab. I) ; on peut donc en conclure que la végétation ne contribue que pour 20 à 23 % de la sédimentation totale, soit un taux de sédimentation organique compris entre 0,03 et 0,11 kg/m<sup>2</sup>/an (0,1 à 0,4 mm/an) selon l'hypothèse retenue pour le flux de MES entrant (fourchette basse ou haute). La végétation du lac ne constitue donc pas l'« usine à vase » qui est parfois évoquée.

#### LE FLUX SÉDIMENTAIRE SORTANT

Nous ne disposons que de peu d'informations directes sur ce flux. Marion & Brient (1998) ont proposé des calculs de flux de MES, en entrée et en sortie du lac sur 6 mois d'hiver et de printemps, aussi bien en année humide (1994) que sèche (1996). Selon cette étude les flux sortants seraient respectivement égaux à 7913 et 2019 t (0,4 et 0,1 kg/m<sup>2</sup>) pour les 6 mois de suivi. Par ailleurs, et d'après leurs figures, le flux de MES sortant est supérieur au flux entrant. C'est aussi ce que l'on constate si l'on compare les mesures, cette fois-ci ponctuelles, réalisées par l'Agence de l'Eau en entrées et sortie de lac entre 1999 et 2008 (75 mesures réalisées le même

jour en entrées et en sortie ; moyenne des entrées = 13,4 mg/l ; moyenne de sortie = 43,8 mg/l). Mais ces deux séries de données ne sont pas interprétables car la méthodologie retenue, dans un cas comme dans l'autre, surévalue la MES en période de végétation, en y intégrant systématiquement l'exportation du phytoplancton lacustre vivant. Par ailleurs, et c'est peut-être le plus important, l'impact des crues n'est pas pris en compte.

Il est néanmoins possible d'approcher le flux sédimentaire sortant de manière indirecte. En effet, dans le contexte de bilan érosif, celui-ci correspond à la somme des apports sédimentaires (MES et MO) et de l'abrasion du fond (fig. 4). Le calcul donne un chiffre compris entre 0,33 et 0,75 kg/m<sup>2</sup>/an (1,1 à 2,6 mm/an) selon l'hypothèse retenue pour le flux de MES entrant. Le flux sédimentaire sortant resterait donc dans les mêmes ordres de grandeur que le flux d'alimentation (facteur de l'ordre de 1,5 à 2). Le bilan sédimentaire ne serait donc qu'assez faiblement déséquilibré, même si une accélération du phénomène est probable (fig. 3).

## LES PROCESSUS POST-DÉPÔT AFFECTANT LES SÉDIMENTS DU LAC DE GRAND-LIEU

Il ressort de ce qui précède que les importations de MES et les apports de MO dans les sédiments du lac de Grand-Lieu sont faibles (de l'ordre de 0,6 à 2,1 mm/an de vase). Une très faible variation des conditions d'exportation peut facilement inverser le bilan et se traduire par une augmentation de la surface et du volume lacustre aux dépens des roselières. Une telle crise érosive a débuté au milieu des années 1970 et perdure actuellement. L'analyse historique (Guillou *et al.*, 2008) montre (1) que de telles phases d'érosion durent plusieurs dizaines d'années, ce qui est remarquable, et (2) que ces périodes sont la conséquence d'aménagements hydrauliques lourds dans le bassin versant. Nous nous proposons de discuter ici des facteurs naturels et anthropiques qui favorisent ces crises érosives.

La comparaison entre l'apport sédimentaire maximum envisageable (0,6 kg/m<sup>2</sup>/an de MES + MO) et la charge recueillie dans les pièges à sédiments situés à 0,50 m de fond (34,5 kg/m<sup>2</sup>/an) illustre l'importance des phénomènes de remise en suspension. Le turn-over serait d'ordre hebdomadaire, ce qui ne semble pas exceptionnel dans ce type de lac (Douglas & Rippey, 2000). La remise en suspension est largement favorisée dans le cas du lac de Grand-Lieu par le vent, la faible profondeur et la faible cohésion du sédiment constitué, pour sa partie minérale, à plus de 98 % d'une « farine » de quartz.

Le lac de Grand-Lieu, vaste lac de plaine situé à peu de distance de l'océan, est souvent balayé par des vents violents (3,8 % supérieurs à 29 km/h). Les calculs hydrodynamiques (Liao, 2006 ; Papon, 2007) et l'observation (fig. 10) montrent que ces vents sont susceptibles de remettre en suspension les vases déposées et ce probablement sur des épaisseurs pluri-décimétriques si l'on en croit les données isotopiques sur des carottes de sédiments analysées par Creach (1998). Ces remaniements sont à la fois importants (turbidité supérieure à 200 mg/l en cas de coup de vent ; Boret, 2005) et fréquents. Comme cela semble classique dans les lacs peu profonds (Luettich *et al.*, 1990 ; Bailey & Hamilton, 1997), cette mise en suspension s'accompagne de déplacements dont le résultat sur plusieurs années est bien mis en évidence sur la figure 4. On y constate la coexistence de zones en dépression et de zones en engraissement dont la répartition est globalement aléatoire.

Le phénomène de remise en suspension ne concerne pas le sédiment de façon homogène. Ainsi le CEMAGREF (1991) a souligné que la matière minérale interceptée par les pièges à sédiments possédait une fraction fine (< 2 µm) jusqu'à 8 fois plus abondante que dans le sédiment lacustre lui-même. La MES est donc d'autant plus facilement remise en suspension qu'elle est fine. La MO, de densité plus faible, est également remise en suspension par l'agitation due au clapot et, se trouvant en contact avec de l'eau, peut être minéralisée si l'eau contient de l'oxygène. C'est le cas à Grand-Lieu où la teneur en oxygène dissous est très généralement importante, surtout en période de vent. D'après les mesures de Le Rouzic & Brient (1998), des déficits ne peuvent apparaître que localement (sous la végétation aquatique) et pendant l'été.

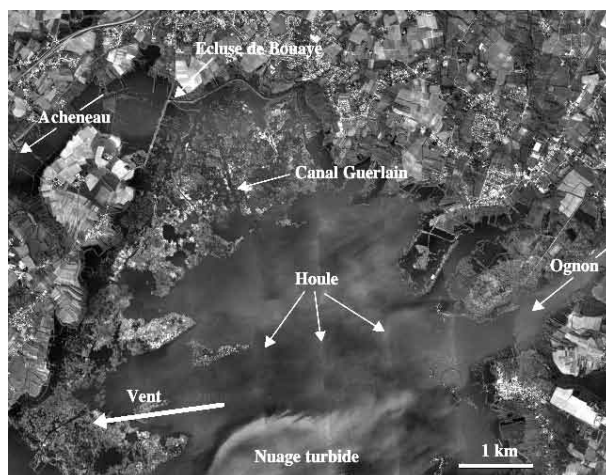


Figure 10. — Photo satellite de la partie Nord du lac en crue (image Google-Earth, 15 mars 2007, cote 3,01 m Buzay soit 61 cm au dessus de la moyenne interannuelle). Le sens du vent est opposé à celui des vents dominants. Sa vitesse est, ce jour-là et les jours précédents, relativement faible (13 à 15 km/h, 22 km/h au maximum la veille), mais provoque une turbidité généralisée des eaux. Le nuage turbide visible au sud correspond au panache issu de la Boulogne.

La remise en suspension n'explique pas, à elle toute seule, l'exportation des sédiments. Des courants de vidange sont nécessaires ; plus ces courants sont importants en période de forte turbidité, plus l'exportation est efficace. C'est là qu'interviennent les facteurs anthropiques et notamment les aménagements hydrauliques et le mode de gestion qui, et c'est leur but, favorisent les vidanges rapides (fig. 7).

L'exportation se fait aux dépens de la fraction granulométrique remise en suspension : la plus fine. En période de crise érosive, les exportations étant supérieures aux apports, on doit s'attendre à un appauvrissement en fraction fine du stock sédimentaire. Un indice va dans ce sens : le fait que le sédiment soit plus grossier dans le lac que dans les contributaires (fig. 9), ce qui constitue une observation *a priori* paradoxale. En fait, ceci confirme que la fraction la plus fine, facilement remobilisée par l'agitation de l'eau, est exportée plus rapidement du système lacustre. Cette remise en suspension est d'ailleurs de plus en plus facile au fur et à mesure que le sédiment est moins cohésif du fait de l'évacuation des minéraux argileux (Gerbersdorf *et al.*, 2005).

## DISCUSSION

### LE BILAN SÉDIMENTAIRE DU LAC DE GRAND-LIEU

Le bilan sédimentaire d'un lac dépend des apports (flux sédimentaires de MES et de MO) et des phénomènes érosifs. L'érosion lacustre est la conséquence de deux phénomènes qui doivent être concomitants pour être efficaces : la remise en suspension et les courants de vidange. Le lac de Grand-Lieu cumule les facteurs favorables à la remise en suspension des sédiments. Il est en effet caractérisé par (1) une grande surface (il est le 8<sup>ème</sup> ou 9<sup>ème</sup> plus grand des lacs naturels français), (2) une influence du vent importante (il est situé à 22 km de l'océan, sans aucune protection topographique dans la direction des vents dominants océaniques), (3) une faible profondeur (0,70 m en moyenne à l'étiage) et (4) un sédiment fin et très riche en quartz, et donc peu cohésif. Par ailleurs, le marnage dépasse largement la profondeur (moyenne : 1,20 m ; maximum : 2,70 m pour la période post-1960) ce qui est favorable à la mise en place de courants de vidange puissants et rapides.

En dépit de cette accumulation de facteurs favorables à l'érosion, il semble qu'en situation « normale » le comblement domine (fig. 2), parfois même avec des taux de sédimentation importants comme à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle (1 à 2 mm/an), époque où la zone lacustre a bien failli disparaître (Guillou *et al.*, 2008). Mais il s'agissait d'une période d'intense défrichement agricole et donc d'érosion continentale. Les phases d'érosion lacustre (trois documentées en trois siècles) sont chronologiquement liées à des aménagements hydrauliques destinés à favoriser l'évacuation de la crue hivernale et donc à augmenter l'intensité des courants de vidange. Historiquement, l'augmentation anthropique de ces courants apparaît donc comme le facteur qui fait basculer le bilan vers l'érosion (Guillou *et al.*, 2008).

La bibliographie disponible indique que le taux de sédimentation actuel serait, dans le lac de Grand-Lieu, d'ordre centimétrique à pluri-centimétrique et donc que son comblement serait imminent. En fait, nous avons montré que seul un apport sédimentaire inférieur à 2 mm/an est envisageable pour la période actuelle, et que les exportations sont environ 1,5 à 2 fois plus importantes que les apports : le lac, dont la taille et la profondeur augmentent, est en érosion depuis le milieu des années 1970.

À l'issue des deux phases érosives précédentes, le comblement avait repris au bout de quelques décennies. Il semble impossible de prévoir quand cela interviendra cette fois-ci. L'analyse des photographies aériennes montre qu'une tendance à l'accélération de l'érosion est sensible, mais aucune extrapolation n'est possible (fig. 3 ; Boret & Reeber, 2008). D'autant plus que de nombreux paramètres, en pleine évolution actuelle, peuvent interférer avec l'érosion (espèces invasives, régression des macrophytes flottants en lien avec les niveaux estivaux hauts, gestion des crues hivernales, etc.).

#### CONSÉQUENCES POUR LA GESTION DES MILIEUX NATURELS

Depuis quelques années le gestionnaire exprime des inquiétudes sur l'évolution des milieux (Boret & Reeber, 2008 ; Boret, com. pers.) qui se traduit notamment par le recul des roselières et la diminution des ceintures de macrophytes flottants (perte de surface de près de 40 % sur la période 1975-2007, ou de 10 % entre 2000 et 2007, incluant une baisse de 63 % des Châtaignes d'eau *Trapa natans*, 66 % des Limnanthèmes jaunes *Nymphoides peltata* et 57 % des Scirpes lacustres *Scirpus lacustris*). D'une manière générale, les lacs peu profonds ont une écologie et un fonctionnement particuliers (*e. g.* Nixdorf & Deneke, 1997 ; Scheffer, 1998). Des facteurs abiotiques habituellement secondaires, comme le vent ou de faibles variations du niveau d'eau, prennent une influence déterminante sur le fonctionnement de l'écosystème (*e. g.* Carrick *et al.*, 1993 ; Hellstrom, 1991 ; Pierson *et al.*, 2003 ; Paillisson & Marion, 2006). On est donc très logiquement conduit à s'interroger sur l'influence que pourrait avoir la dynamique érosive décrite précédemment sur la pérennité des milieux naturels. Nous considérons que ce travail questionne la gestion hydraulique actuelle au moins sur deux points : la gestion des niveaux et celle des débits.

#### LE PROBLÈME DE LA GESTION DES NIVEAUX PRINTANIERS ET ESTIVAUX

Actuellement, la « doctrine » qui constitue la base de la gestion des niveaux printaniers et estivaux du lac repose sur les postulats suivants (Marion, 1999 ; Paillisson & Marion, 2005) :

- le lac subit un envasement annuel pluri-centimétrique ;
- cet envasement est essentiellement relatif à la matière organique autochtone et spécialement aux macrophytes flottants ;
- le meilleur moyen pour lutter contre ces macrophytes consiste à maintenir des niveaux hauts au printemps pour les asphyxier (Paillisson & Marion, 2005, 2006).

En fait, nous avons montré que le bilan sédimentaire était négatif et que, de plus, les caractéristiques sédimentologiques et physiques du milieu lacustre sont telles que la MO produite est minéralisée et ne s'accumule pas dans le sédiment. Par ailleurs Reeber (2000), pour l'avifaune, et Dupont (2003), pour la végétation, ont montré les impacts négatifs sur le milieu naturel de la gestion actuelle des niveaux. Enfin, on sait que des niveaux élevés au printemps contribuent à diminuer l'extension, la densité et la productivité des macrophytes flottants (c'est

d'ailleurs ici le but de ce mode de gestion : Paillisson & Marion, 2006) ; on sait aussi que ces diminutions ont une influence directe sur la vitesse des courants et la remise en suspension des sédiments et donc au final sur l'érosion (Dieter, 1990 ; James & Barko, 1994 ; Madsen *et al.*, 2001 ; James *et al.*, 2004). En d'autres termes, (1) la gestion actuelle des niveaux n'apparaît pas fondée, (2) elle a un impact négatif sur le milieu naturel et, (3) en association avec d'autres facteurs comme les espèces invasives (écrevisses de Louisiane *Procambarus clarkii*, ou ragonides *Myocastor coypus*), elle contribue au phénomène d'érosion. Les niveaux printaniers ayant été relevés depuis le milieu du XX<sup>ème</sup> siècle (fig. 6), il existe probablement une marge de liberté permettant de ramener les niveaux printaniers et estivaux à une cote plus basse, compatible avec la conservation des milieux et la lutte contre l'érosion lacustre.

#### LE PROBLÈME DE LA GESTION DES DÉBITS

La gestion des débits est une conséquence de la gestion des niveaux. Il s'agit de respecter, à certaines dates, des niveaux fixés par le règlement d'eau (fig. 5) ; en cas de crue hivernale tardive des débits de sortie importants sont nécessaires pour respecter les cotes. Avant 1985, la gestion était approximative (fig. 6), mais depuis, le respect des objectifs est bien meilleur, et, par voie de conséquence, les débits de pointe ont significativement augmenté lors des années humides (fig. 7). Vu la facilité avec laquelle les sédiments sont mis en suspension, on peut raisonnablement soupçonner que cette conséquence de la gestion actuelle contribue à l'accélération des exportations des sédiments.

Une amélioration simple de cette gestion consisterait à interdire la vidange du lac en période de forte turbidité et/ou par fort vent. Mais il est sans doute souhaitable d'aller plus loin et d'abandonner la gestion actuelle basée sur le respect de niveaux imposés à certaines dates pour mettre en place une gestion basée sur des débits de vidange maximum. Cette modification de politique de gestion aurait un double avantage : elle irait dans le sens d'une limitation de l'érosion (courant de vidange amoindri), mais également dans le sens d'une variabilité inter-annuelle. Ainsi, un haut niveau hivernal se traduirait par une vidange plus longue, et donc des niveaux printaniers plus hauts ; et un hiver sec, par un étiage précoce et des niveaux estivaux plus bas. Une telle variabilité interannuelle est généralement considérée comme favorable à la biodiversité ; notamment à Grand-Lieu où elle est souhaitée par Reeber (2000) pour l'avifaune et Dupont (2003) pour la végétation.

#### CONCLUSION

Selon le suivi des photos aériennes, l'érosion du lac de Grand-Lieu est en phase d'accélération (fig. 3). À la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle une crise érosive longue d'une cinquantaine d'années avait conduit à la quasi-disparition des ceintures de roselières, la zone lacustre occupait alors toute la cuvette (fig. 2). Cette évolution s'est évidemment traduite par une homogénéisation des écosystèmes dans la zone humide. Pour le futur, la répétition de ce scénario n'est pas souhaitable. Actuellement le rapport entre l'érosion et les apports sédimentaires est de l'ordre de 1,5 à 2. Diminuer de 33 % à 50 % l'érosion lacustre permettrait donc l'installation d'un bilan sédimentaire équilibré. Faute de données historiques suffisantes sur la turbidité de l'eau et les exportations de MES, il n'est pas possible d'affirmer que les mesures d'aménagement de la gestion hydraulique proposées plus haut soient suffisantes pour stopper l'évolution érosive. Il n'est pas exclu que des restaurations hydrauliques soient nécessaires (modification du Canal Guerlain notamment). En fait, nous pensons que la prise en compte du risque érosif dans la définition d'une gestion à moyen et long terme du milieu passera par l'acquisition en continu sur plusieurs années de données sur les flux liquide et solide en entrée et en sortie, ainsi que sur les caractéristiques de la MES transportée. Cette acquisition constitue le préalable à la mise au point d'un modèle numérique hydro-sédimentaire calé sur un ensemble de données hydrauliques, sédimentologiques et climatiques. Mais une telle démarche prendra du temps. Face au risque de dégradation rapide puis de banalisation du milieu, et à titre de précaution minimale, la modification à très court terme des modes de gestion hydraulique du lac de Grand-Lieu apparaît indispensable.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur reconnaissance à P. Borret, S. Reeber et M. Echaubard (SNPN) qui les ont aidés et encouragés tout au long de cette étude ; à J.J. Guillou qui est à l'origine de ce travail et avec lequel de très nombreuses discussions ont eu lieu ; et aux deux rapporteurs anonymes dont les remarques ont fortement contribué à l'amélioration du manuscrit.

## RÉFÉRENCES

- BAILEY, M.C. & HAMILTON, D.P. (1997). — Wind induced sediment resuspension : a lake-wide model. *Ecol. Mod.*, 99 : 217-228.
- BLOESCH, J. (1994). — A review of methods used to measure sediment resuspension. *Hydrobiologia*, 284 : 13-18.
- BLOESCH, J. & UEHLINGER, U. (1986). — Horizontal sedimentation differences in a eutrophic Swiss Lake. *Limnol. Oceanogr.*, 31 : 1094-1109.
- BLOESCH, J. & BURNS, N.M. (1980). — A critical review of sediment trap technique. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 42 : 15-56.
- BORET, P. (2005). — *Bathymétrie de la zone centrale du lac de Grand-Lieu*. Document non publié, SNPN, Paris.
- BORET, P. & REEBER, S. (2008). — *Suivi spatial de la zone centrale du lac de Grand Lieu entre 1993 et 2007*. Rapport SNPN, Paris.
- CAMPY, M. & MEYBECK, M. (1995). — Les sédiments lacustres. Pp 185-226 In : R. Pourriot & M. Meybeck (eds). *Limnologie générale*. Masson, Paris.
- CARRICK, H.J., ALDRIDGE, F.J. & SCHELSKE, C.L. (1993). — Wind influences phytoplankton biomass and composition in a shallow, productive lake. *Limnol. Oceanogr.*, 38 : 1179-1192.
- CEMAGREF (1991). — *Lac de Grand-Lieu, étude sédimentologique*. Rapport final.
- COMMISSARIAT AU PLAN (1994). — *Les zones humides, rapport de l'instance d'évaluation*. La Documentation Française, Paris.
- COTTINI, S. (2007). — *Studio idrosedimentario del lago di Grand-Lieu*. Master 2 Thesis, Geological Sciences. Université de Gènes, Italie.
- CREACH, V. (1998). — *Les conditions de minéralisation des macrophytes et des algues et leur rôle dans la vitesse d'envasement du lac de Grand-Lieu*. SNPN, Paris & LESNM, Université de Rennes 1.
- DIETER, C.D. (1990). — The importance of emergent vegetation in reducing sediment resuspension in wetlands. *J. Freshwat. Ecol.*, 5 : 467-473.
- DOUGLAS, R.W. & RIPPEY, B. (2000). — The random redistribution of sediment by wind in a lake. *Limnol. Oceanogr.*, 45 : 686-694.
- DUPONT, P. (2003). — L'évolution de la flore et de la végétation du lac de Grand-Lieu (Loire Atlantique) et de ses ceintures : situation actuelle, problèmes de conservation et de gestion. *Bulletin de la Société Botanique du Centre-Ouest*, 34 : 3-64.
- DUSSART, B., 1992. — *Limnologie, l'étude des eaux continentales*. Gauthier Villars, Paris.
- GERBERSDORF, S.U., JANCKE, T. & WESTRICH, B. (2005). — Physico-chemical and biological sediment properties determining erosion resistance of contaminated riverine sediments - Temporal and vertical pattern at the Laufen reservoir / River Neckar, Germany. *Limnologica*, 35 : 132-144.
- GUILLOU, J.-J. (2007). — *Analyses Grand-Lieu, échantillonnage du 15 octobre 2007 ; matière organique*. Rapport Faculté des Sciences, Nantes.
- GUILLOU, J.-J., MERCIER, E. & SANCHEZ, M. (2008). — Influence des aménagements hydrauliques sur l'évolution des niveaux d'eau dans le lac de Grand-Lieu depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle. *Bull. Soc. Historiens Pays de Retz*, 27 : 21-30.
- HAKANSON, L. & JANSSON, M. (1983). — *Principles of lake sedimentology*. Springer-Verlag ed., Berlin.
- HALLIER, A. (1996). — *Les variations saisonnières du lac de Grand-Lieu : éléments d'explication*. Mémoire de Maîtrise de Géographie, Nantes.
- HELLSTRÖM, T. (1991). — The effect of resuspension on algal production in a shallow lake. *Hydrobiologia*, 213 : 183-190.
- JAMES, W.F. & BARKO, J.W. (1994). — Macrophyte influences on sediment resuspension and export in a shallow impoundment. *Lake and Reservoir Management*, 10 : 95-102.
- JAMES, W.F., BEST, E.P. & BARKO, J.W. (2004). — Sediment resuspension and light attenuation in Peoria Lake : can macrophyte improve water quality in this shallow system ? *Hydrobiologia*, 515 : 193-201.
- JIGOREL, A. (1992). — *Étude sédimentologique du lac de Grand-Lieu*. INSA, Rennes.
- KERN, U. & WESTRICH, B. (1997). — Sediment budget analysis for river reservoirs. *Water Air Soil Poll.*, 99 : 105-112.
- LE ROUZIC, B. & BRIENT, L. (1998). — *Productivité des microalgues planctoniques d'un lac de plaine eutrophe : le lac de Grand-Lieu*. SNPN, Paris et LESNM (Université de Rennes 1).
- LIAO, Z. (2006). — *État hydro-sédimentaire du lac de Grand-Lieu : approche expérimentale*. Mémoire de Master 2 de Génie Côtier, Université de Nantes.

- LUETTICH JR, R.A., HARLEMAN, D.F. & SOMLÓDY, L. (1990). — Dynamic behavior of suspended sediment concentrations in a shallow lake perturbed by episodic wind events, *Limnol. Oceanograph.*, 35 : 1050-1067.
- MADSEN, J.D., CHAMBERS, P.A., JAMES, W.F., KOCH, E.W. & WESTLAKE, D.F. (2001). — The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia*, 444 : 71-84.
- MALMAEUS, J.M. & HAKANSON, L. (2003). — A dynamic model to predict suspended particulate matter in lakes. *Ecol. Model.*, 167 : 247-262.
- MARION, L. (1992). — *Lac de Grand-Lieu : causes de l'envasement et mesures de sauvetage. Rapport de Synthèse.* Université de Rennes - INSA de Rennes -CEMAGREF-Ouest Aménagement.
- MARION, L. (1998). — *Justification de l'étude sur le phytoplancton dans le cadre du plan de sauvetage du lac de Grand-Lieu*, 8 p. en introduction de LE ROUZIC, B. & BRIENT, L. (1998).
- MARION, L. & BRIENT, L. (1998). — Measures of a wetland's effect on water quality : input-output studies of suspended particulate matter, nitrogen (N) and phosphorus (P) in the main plain lake, Grand-Lieu. *Hydrobiologia*, 373/374 : 217-235.
- MARION, L. (1999). — *Le lac de Grand-Lieu, un joyau tropical à préserver.* Réserve naturelle du lac de Grand-Lieu, SNPN.
- MARION, L. & MARION, P. (1976). — *Contribution à l'étude écologique du lac de Grand-Lieu.* Société des Sciences Naturelles de l'Ouest de la France, Nantes.
- MARTIN, J.C. & ROUXEL, E. (2007). — *Bassin versant de Grand-Lieu. Synthèse des études BRGM et bilan volumique.* Rapport final, BRGM/RP 55463 FR.
- NIXDORF, B. & DENEKE, R. (1997). — Why 'very shallow' lakes are more successful opposing reduced nutrient loads. *Hydrobiologia*, 342/343 : 269-284.
- PAILLISSON, J.M. & MARION, L. (2005). — *Productivité des macrophytes flottants du lac de Grand-Lieu (saison 2004).* Effets de paramètres environnementaux. DIREN et LESNM (Université de Rennes 1).
- PAILLISSON, J.M. & MARION, L. (2006). — Can small water level fluctuations affect the biomass of *Nymphaea alba* in large lakes ? *Aquatic Botany*, 84 : 259-266.
- PAPON, P. (2007). — *Les plans d'eau superficiels : définition, fonctionnement et aménagements. Étude du lac Balaton, du lac de Grand-Lieu et de l'étang de Cieux,* Thèse Université de Limoges.
- PELTIER, D. (2004). — *Proposition d'une méthodologie pour la localisation de la zone humide du lac de Grand Lieu conformément au S.A.G.E Logne, Boulogne, Ognon et Grand Lieu.* CLE Grand-Lieu.
- PIERRELÉE, D. & LAMPRIER, A. (2004). — *Grand-Lieu, lac et marais : mémoire des paysages entre Loire et Baie.* Siloe.
- PIERSON, D., MARKENSTEN, H. & STRÖMBECK, N. (2003). — Long and short term variations in suspended particulate material : the influence on light available to the phytoplankton community. *Hydrobiologia*, 494 : 299-304.
- REEBER, S. (2000). — *Impact du relèvement du niveau d'eau du lac de Grand-Lieu sur l'avifaune.* SNPN, Paris.
- SCHEFFER, M. (1998). — *The ecology of shallow lakes.* Chapman & Hall, London.
- STRUILLLOU, J.F., MENANTEAU, L., CHADENAS, C., & POURINET L. (2006). — *Protection du patrimoine naturel et développement durable dans l'estuaire de la Loire. Le cas du lac de Grand-Lieu.* Colloque International Interactions Nature-Société : analyses et modèles, La Baule (Loire-Atlantique - France) 3 - 6 mai 2006.