

L'envasement des étangs, lacs et rivières de Bretagne

Alain Jigorel *

Le phénomène d'envasement est observé dans un grand nombre de lacs et rivières de Bretagne. Tout le monde s'accorde à dire, à partir d'observations précises, que le phénomène s'est amplifié ces dernières années. Cette accélération de l'envasement est généralement attribuée à une recrudescence de l'érosion des sols consécutive aux opérations de remembrement. La destruction massive des talus du bocage breton, et le développement de la culture du maïs qui représente désormais 23 % de la surface agricole utile (S.A.U.) et laisse les sols nus pendant de longues périodes, seraient responsables d'une érosion plus importante des sols, puis, par voie de conséquence, de l'envasement des plans d'eau.

En l'absence d'étude globale, il est difficile de juger à la fois de l'importance réelle du phénomène et de son évolution récente. Etant donné le rôle primordial de l'eau dans la vie économique de notre région, mis en évidence un peu plus en 1989 à la suite d'une période de sécheresse exceptionnelle, les gestionnaires des ressources en eau se préoccupent désormais de plus en plus du problème de l'envasement, à la fois pour sauvegarder la qualité des réserves en prenant des mesures appropriées et pour prévoir leur ges-

tion. Un envasement généralisé des rivières et retenues en Bretagne aurait des conséquences néfastes, à la fois sur la qualité des eaux de surface et sur l'environnement, mais également sur l'économie.

Un préjudice économique non négligeable

L'envasement rapide et imprévu d'une retenue peut avoir des conséquences économiques importantes. Ainsi, des collectivités locales qui ont créé des

*Institut national des sciences appliquées, Rennes.

plans d'eau de faible profondeur, pour y développer des activités de loisirs, se retrouvent parfois confrontées à l'envasement généralisé de leur réservoir après seulement quelques années.

Outre les désagréments créés aux usagers, un envasement excessif contribue aussi à dégrader la qualité des eaux et à favoriser des conditions d'anoxie pour les poissons. L'envasement d'une retenue peut aller jusqu'à son remplissage total et dans ce cas, pour rétablir ou maintenir les activités de loisirs, il est indispensable de réaliser un curage à renouveler périodiquement. Le curage d'un plan d'eau est une opération coûteuse qu'il faut prévoir et intégrer dans les budgets de fonctionnement des collectivités locales qui en assurent la gestion. Lorsque ces opérations doivent être renouvelées trop souvent, les frais à engager sont si élevés qu'ils ne peuvent être supportés par les seules ressources des collectivités. De plus, quelles que soient les techniques retenues, il n'est généralement pas possible pendant ces opérations de curage de maintenir toutes les activités économiques dépendantes de la retenue : production d'eau potable, production électrique, nautisme, pêche, tourisme... Aux frais

de dévasement il faut donc parfois ajouter un préjudice économique non négligeable.

L'envasement accéléré d'un lac créé pour la production d'eau potable a une incidence directe sur le volume utile de la réserve mais également sur la qualité de l'eau. Les sédiments sont un réservoir important de fertilisants et contribuent de ce fait au processus d'eutrophisation. Les phosphates qui sont présents en abondance dans les sédiments favorisent le développement exubérant des algues microscopiques du phytoplancton, surtout en période estivale. Cette prolifération algale rend alors plus difficile et plus coûteuse la production d'eau potable : les filtres se colmatent et il est nécessaire d'utiliser une plus grande quantité de réactifs pour traiter l'eau qui a alors un mauvais goût, en l'absence de traitement au charbon actif.

Connaître parfaitement la nature des phénomènes

Si les agents qui favorisent une eutrophisation des plans d'eau sont maintenant bien connus, il apparaît néan-



M. Paugam

Important affleurement de vase à la surface d'un étang.

moins que les phénomènes observés sont très complexes. Il serait donc imprudent de déduire, à partir d'études ponctuelles, des lois générales qui s'appliqueraient d'une manière systématique à tous les milieux aquatiques, sans tenir compte des spécificités naturelles du site et de la région ainsi que des activités humaines. Les actions à entreprendre pour tenter de sauvegarder ou restaurer un milieu aquatique ne peuvent être efficaces que si l'on connaît parfaitement la nature des phénomènes en cause et leur origine. Les centres et laboratoires de recherche, les bureaux d'étude sont en mesure d'apporter une réponse aux problèmes posés. L'expérience montre que bien souvent, les études globales, pluridisciplinaires permettent de mieux atteindre les objectifs. C'est avec une telle démarche que les diverses études des retenues départementales des Côtes-d'Armor ont été menées depuis plusieurs années.

Les conséquences économiques liées à l'envasement accéléré des retenues ont été jugées suffisamment importantes par le Conseil Général du département des Côtes-d'Armor pour entreprendre une étude globale du phénomène de sédimentation dans les principales retenues créées par le Département pour l'alimentation en eau potable. L'étude en cours qui a été confiée au Laboratoire de Minéralogie et Géotechnique de l'I.N.S.A. de Rennes est effectuée sous la responsabilité et en collaboration avec les services compétents de la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (D.D.A.F. 22) et du Service Départemental de l'Agriculture et de l'Environnement (S.D.A.E. 22). Une partie des analyses physico-chimiques des sédiments est effectuée par le Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés de l'Université de Rennes-I. A ce jour, le suivi de la sédimentation est effectué sur les deux principaux réservoirs du Département.

La retenue du Gouet

- le lac du Gouet créé en 1978 par la construction du barrage de la Méaugon. Ce réservoir de 7,9 millions de m³

alimente essentiellement la région de Saint-Brieuc ;

- le lac de l'Arguenon créé en 1974 par la construction de La Ville-Hatte. Ce réservoir de 11,5 millions de m³ alimente toute la zone est du département des Côtes-d'Armor.

Les suivis de la sédimentation dans les retenues du Gouet et de l'Arguenon, qui ont respectivement débuté au mois d'avril 1988 et au mois de juin 1989, ont été poursuivis pendant toute l'année 1990. Les premières conclusions des études en cours, présentées ici, se rapportent essentiellement à la retenue du Gouet, car la durée du suivi, qui est à ce jour de deux ans, a permis de bien comprendre à la fois l'importance et l'origine du phénomène de sédimentation dans un lac en voie d'eutrophisation.

Le Gouet est un petit fleuve côtier qui prend sa source sur la bordure sud du massif granitique de Quintin, au pied de la colline de Kerchouan, qui culmine à 320 mètres d'altitude. Il se jette dans la Manche en baie de Saint-Brieuc, après un parcours d'une quarantaine de kilomètres. Le barrage du Gouet est situé à proximité de La Méaugon. A ce niveau, la vallée du Gouet est très encaissée et son verrouillage a permis de créer un important réservoir d'une superficie totale de 82 hectares à la cote maximale, le volume d'eau correspondant étant 7,9 millions de m³. La hauteur du barrage est de 37 mètres. Le lac a une longueur importante, voisine de 7 kilomètres, mais une largeur faible, le plus souvent comprise entre 100 et 200 mètres. Le bassin versant a, au niveau du barrage, une superficie de 200 km².

A l'amont de la retenue, les affluents du Gouet ont sensiblement la même importance sur ses deux rives. Les principaux sont :

- sur la rive gauche : les ruisseaux de Kerbeuf, La Bronce, La Noë Sèche, Le Crenan ;

- sur la rive droite : les ruisseaux du Moulin du Bois, de Saint-Eutrope et du Pas, de Saint-Germain et de La Ville Bresset.

Plusieurs tributaires se jettent directement dans le lac. Ce sont les ruisseaux

des Châtelets et de La Pommeraie sur la rive droite, de Gourgou, de La Salle et enfin de la Maudouve qui est le plus important, sur la rive gauche. Si l'on considère les débits des divers tributaires du lac, seuls le Gouet et la Maudouve sont susceptibles d'apporter des quantités relativement importantes de sédiments.

Les données hydrologiques du Gouet sont fournies par la station de jaugeage de Saint-Julien qui est située à l'amont immédiat de la retenue. Le bassin versant a une superficie de 138 km² à l'amont de la station. Ces relevés, qui présentent un grand intérêt car ils sont réalisés à proximité du lieu de l'étude, sont de plus indispensables pour interpréter les phénomènes sédimentologiques observés dans la retenue.

Les précipitations annuelles décroissent nettement de l'amont du bassin versant vers l'aval. Comprises entre 900 et 1 000 mm dans le secteur le plus

élevé du bassin, à proximité de la source du fleuve, elles chutent à des valeurs voisines de 700 mm dans la région de Saint-Brieuc, c'est-à-dire à proximité de l'embouchure du Gouet. Le gradient des précipitations annuelles est donc très élevé, voisin de 100 mm pour 10 km, du sud vers le nord du bassin versant.

Les courbes de variations annuelles des débits moyens mensuels mesurés à Saint-Julien donnent un débit moyen mensuel du Gouet de 1,9 m³/s pour la période 1979-1987, avec un maximum de 3,57 m³/s en janvier et un minimum de 0,47 m³/s en août. Ces résultats montrent que, comme pour toutes les rivières de Bretagne, soumises à un régime pluvial océanique, le Gouet a ses débits les plus élevés en hiver et les plus faibles en été. Il faut souligner que les débits d'étiage sont dans le cas présent relativement bien soutenus, car les formations d'altération (arènes) des massifs granitiques du bassin versant constituent d'assez bons réservoirs.

Les caractéristiques hydrologiques pendant la durée de l'étude apparaissent très contrastées et éloignées des conditions moyennes. L'année 1988 a été marquée par des crues d'une ampleur exceptionnelle au mois de février, c'est-à-dire deux mois avant la mise en place des premiers appareils de mesure, dans le lac. Pendant le mois de février 1988, les débits absolus ont dépassé 15 m³/s à Saint-Julien à deux reprises et ont donc été deux fois plus élevés que ceux enregistrés pour les plus fortes crues de 1987. Les crues des mois de mars et avril 1988 sont par contre assez proches de celles généralement observées au printemps, les débits absolus étant compris entre 6 et 8 m³/s. La fin de l'année 1988 et toute l'année 1989 ont été caractérisées par un important déficit pluviométrique qui s'est traduit par des débits moyens mensuels anormalement bas.

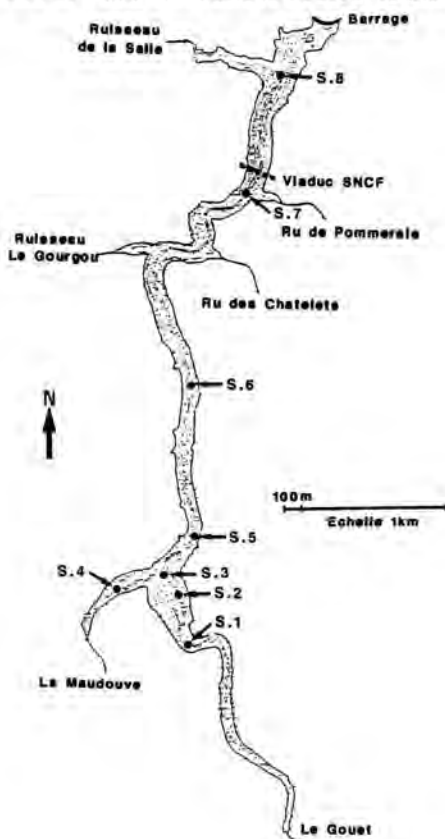


Fig. 1: Plan, de la retenue du Gouet - situation et numérotation des sédimentomètres.

Choisir une méthode

L'objectif de l'étude était de caractériser qualitativement et quantitativement la sédimentation dans le lac et plus particulièrement dans la queue de retenue

qui constituait a priori une zone d'envasement privilégiée. Si l'analyse qualitative des sédiments ne présentait pas de difficultés particulières, car nous pouvons réaliser facilement des prélèvements de sédiments à l'aide d'une drague manuelle à la fois dans la basse vallée du Gouet et dans la queue de retenue, il était beaucoup moins aisé de faire une étude globale de la sédimentation dans une retenue aussi importante. Diverses méthodes pouvaient être envisagées et parmi celles-ci, nous pouvons citer la mesure directe des épaisseurs de sédiments et la mesure des débits solides.

L'importance de la sédimentation dans une rivière, un étang ou une retenue de faible profondeur peut être déterminée par la mesure directe des épaisseurs de vases et sédiments. Dans le cas de lacs profonds comme celui du Gouet, où la hauteur d'eau est pour l'essentiel de sa surface, supérieure à 10 mètres, il aurait été nécessaire d'utiliser des moyens lourds et onéreux pour réaliser les carottages permettant de déterminer les épaisseurs de sédiments. Le volume global des sédiments déposés dans la retenue n'aurait pu, de plus, être estimé avec une bonne précision, qu'en réalisant un grand nombre de carottages. L'opération qui aurait été très coûteuse aurait permis de bien connaître l'état d'envasement du lac, à un moment donné, mais n'aurait donné aucune indication sur l'évolution actuelle du phénomène.

L'étude de la sédimentation dans une retenue peut également être effectuée par la mesure des débits solides des principaux tributaires. En Bretagne, les débits solides sont très faibles en période d'étiage et, les apports sédimentaires les plus importants ont lieu pendant les très fortes crues. En règle générale, les quantités de sédiments transportés par les rivières pendant les plus fortes crues, qui ne durent que quelques jours par an, sont plus importantes que celles apportées pendant tout le reste de l'année. Les débits solides ne peuvent donc être déterminés par des mesures ponctuelles, mais nécessitent l'emploi d'appareils à prélèvements continus, les quantités prélevées devant être proportionnelles aux débits instantanés des rivières. Avec un

tel dispositif, la sédimentation éventuelle liée à la production primaire du lac n'est pas évaluée.

Le sédimentomètre

De ce fait, après avoir procédé à une analyse qualitative des sédiments du lac à l'état initial, et pour limiter les coûts de l'étude, nous avons utilisé un appareil de mesure, le sédimentomètre, qui s'est avéré à l'usage, particulièrement adapté à l'étude en continu de la sédimentation dans les étangs, lacs et retenues artificielles à vitesses de courant faibles. Le sédimentomètre utilisé a été conçu et réalisé à l'Institut National des Sciences Appliquées (I.N.S.A.) de Rennes et a fait l'objet d'un dépôt de modèle à l'Institut National de la Propriété Industrielle (I.N.P.I.). Le sédimentomètre, qui est analogue au pluviomètre, est posé sur le fond du lac. Le nombre d'appareils mis en place et leur répartition sont établis en fonction des conditions locales : morphologie et surface du plan d'eau, nombre et importance des tributaires... Un sédimentomètre est constitué d'un cadre en acier inoxydable, lesté à sa base par une petite dalle de mortier, dans lequel est placé un fût en plastique à ouverture totale. Un entonnoir en acier inoxydable fixé sur le bâti métallique et entrant dans le fût permet de recueillir les sédiments qui se déposent. La surface de collecte de l'appareil est de 0,1 m². Le sédimentomètre est posé directement sur le fond, la dalle de mortier lui assurant à la fois une bonne assise et une bonne stabilité. Chaque sédimentomètre repéré en surface par une bouée est relevé, selon la périodicité souhaitée. Le fût qui contient les sédiments est remplacé par un fût vide. La fermeture hermétique des fûts permet leur transport au laboratoire sans perte de matériel. La pose et le relevé des sédimentomètres qui sont relativement aisés à partir d'un bateau, sont effectués par deux personnes.

Les sédiments recueillis sont les particules en suspension dans la tranche d'eau au-dessus de l'appareil. Seuls les éléments présents dans la tranche d'eau située au-dessous de l'entonnoir



Station de jaugeage de Saint-Julien.

ne peuvent être collectés. Cela concerne une hauteur de 0,55 m environ. De ce fait, les sédiments les plus grossiers, roulés sur le fond ne peuvent être recueillis. L'analyse de l'état initial a montré que dans le cas de la retenue du Gouet, ces sédiments ne sont rencontrés que lors des crues exceptionnelles, dans la queue de retenue au niveau de l'ancien lit du fleuve. Ces types d'apports momentanés sont donc peu importants et très localisés. La mise en place des sédimentomètres a été effectuée en plusieurs étapes. Les premiers appareils ont été posés à la fin du mois de mars 1988 dans la queue de retenue du lac, c'est-à-dire dans le secteur où les apports dus aux tributaires principaux, Gouet et Maudouve, étaient jugés les plus importants. Le dispositif avait été établi en fonction du schéma classique où les matériaux transportés en suspension par les rivières décantent dans le lac, à la suite de la chute brutale des vitesses d'écoulement. Les particules les plus grossières, c'est-à-dire les sables, se

déposent à l'exutoire des rivières, tandis que les limons et les argiles décanent progressivement. La décantation des particules argileuses les plus fines est favorisée par leur état floculé en eau calme. Dans un premier temps, cinq appareils avaient été disposés dans la queue de retenue Gouet-Maudouve comme indiqué sur le plan de la figure 1. Ce secteur avait été jugé suffisamment vaste pour assurer une décantation totale des apports des rivières. Si les premières mesures étaient tout à fait conformes aux prévisions, celles du mois de juin 1988 ont montré que les dépôts de sédiments étaient cinq fois plus importants dans le lac proprement dit, au niveau de l'appareil n° 5, qu'au débouché des rivières. Il était donc établi que les sédiments déposés dans le lac ne se limitaient pas aux apports des rivières, mais provenaient pour une part essentielle de la production primaire. A la suite de ces observations qui ont été largement confirmées ultérieurement, nous avons complété le dispositif de mesure sur

l'ensemble du lac. Depuis le mois de janvier 1989, ce sont huit sédimentomètres qui fonctionnent en continu et sont relevés régulièrement selon une périodicité voisine de deux mois. Les sédiments recueillis sous forme de boue liquide sont déshydratés au laboratoire pour être étudiés. Les analyses suivantes : granulométrie, minéralogie, teneurs en matières volatiles, teneurs en cuivre et en phosphore, sont effectuées de manière systématique sur tous les échantillons recueillis.

Les sédiments déposés dans le lac sont constitués de deux fractions, d'origine bien distincte. La première allochtone est due aux apports des rivières, tandis que la seconde autochtone résulte de la production primaire du lac.

Du sable à la vase

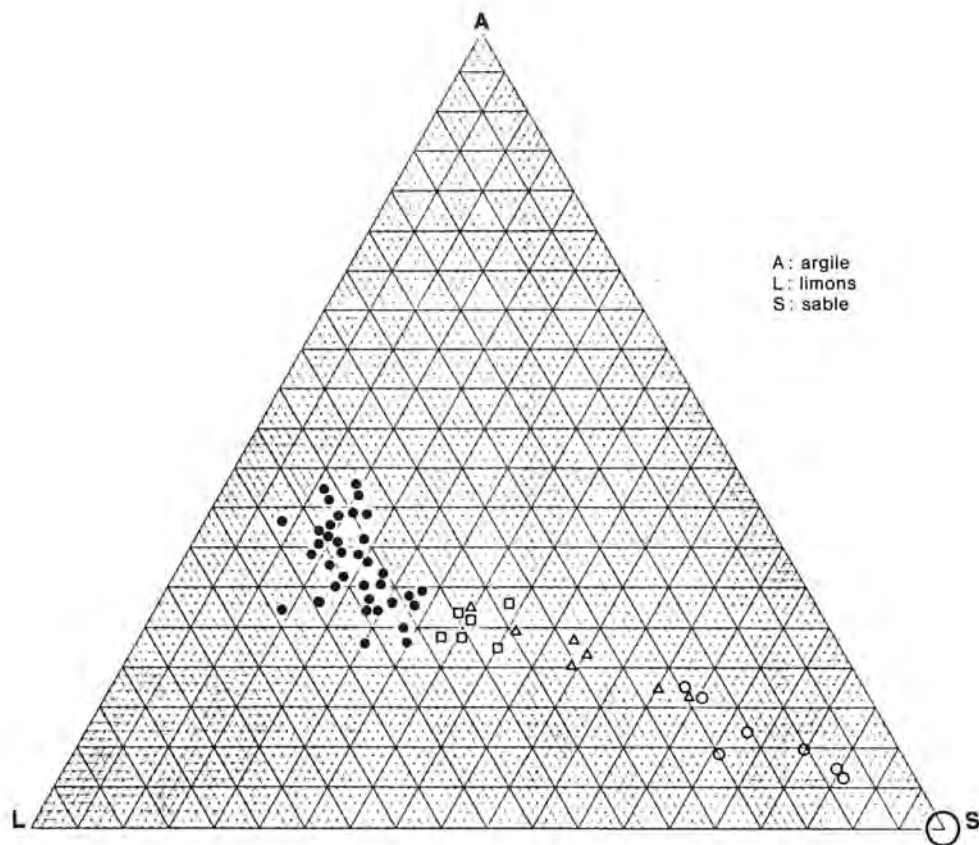
Une part variable selon les sites est formée d'éléments terrigènes issus de l'érosion des sols et transportés par les rivières. Le bassin versant étant de nature granitique, les constituants sont essentiellement le quartz, la biotite, les feldspaths et divers minéraux argileux. L'étude détaillée des dépôts consécutifs aux crues exceptionnelles de février 1988 a permis de bien caractériser la sédimentation d'origine détritique de la basse vallée et de la queue de retenue du Gouet. Tous les sédiments déposés pendant cette période ont sensiblement la même composition minéralogique, mais ils se distinguent selon le lieu de dépôt par leurs caractéristiques granulométriques. Pendant les très fortes crues, les rivières charrient des quantités non négligeables de sables. Les sables grossiers ne parviennent pas jusqu'au lac, mais sont déposés en bordure du lit des rivières, en quelques points bien localisés sous forme de bancs ou de cordons. Le dépôt des sables fins s'effectue en bancs au débouché des rivières dans le lac, tandis que les éléments plus fins argilo-limoneux transportés en suspension décantent progressivement dans la queue de retenue. Ainsi on observe une diminution régulière du pourcentage de sables fins dans les

sédiments et corrélativement un accroissement de la fraction argileuse, au fur et à mesure que l'on s'éloigne du débouché des rivières. L'examen comparé des caractéristiques granulométriques des dépôts montre que l'influence des courants ne se fait guère sentir au-delà du site n° 3, même lors des crues exceptionnelles. De ce fait, tous les apports terrigènes du Gouet et de la Maudouve sont décantés à l'amont du site n° 5.

En résumé, la faible compétence des rivières ne permet pas, même en périodes de fortes crues, un apport significatif de sables grossiers dans la retenue. Les sédiments transportés par les rivières et déposés dans le lac ont une texture sableuse fine et limono-argileuse (figure 2).

Le rôle essentiel de la production primaire dans le processus de sédimentation a été mis en évidence dès les premiers relevés des appareils. Depuis sa mise en eau en 1978, le lac subit un phénomène d'eutrophisation qui se traduit d'une manière bien visible et parfois spectaculaire par la formation de fleurs d'eau au printemps et en été. La prolifération du phytoplancton et en particulier des algues microscopiques de la classe des diatomées favorise la sédimentation d'origine biologique. Un échantillon de vase séché à l'air apparaît donc constitué d'un mélange dans des proportions variables, de minéraux, de frustules de diatomées et de matières organiques (figure 3).

L'examen systématique, au microscope électronique à balayage (MEB), des vases et sédiments recueillis dans les sédimentomètres, a permis d'apprécier les parts respectives des éléments minéraux et des tests de diatomées. Pour faciliter l'observation des sédiments, nous avons procédé à la destruction préalable, à l'eau oxygénée, de la matière organique qui recouvre et masque les autres constituants. Après traitement, il ne subsiste plus dans le sédiment que les éléments minéraux et les divers tests d'origine biologique. Parmi ceux-ci, les tests de diatomées, qui ont la particularité d'être siliceux, sont généralement bien conservés et faciles à reconnaître. Les frustules de diatomées ont des formes variées et une ornementation fine



- Sédiments autochtones dus à la production primaire du lac.
- △ □ Sédiments essentiellement allochtones, dus au apports terrigènes des rivières.
- Sédiments recueillis dans les sédimentomètres n° 1 et n° 4 en période de crues.
- △ Sédiments déposés dans la queue de retenue du lac lors des crues exceptionnelles de février 1988.
- Sédiments déposés en bancs au débouché des rivières dans le lac.
- Sables déposés dans la basse vallée du Gouet en amont du lac, lors des très fortes crues.

Fig. 2. Évolution des caractéristiques granulométriques des sédiments déposés dans le barrage et la basse vallée du Gouet.

caractéristique de chacune des espèces. Lorsqu'ils sont fragmentés, les tests sont repérés par le détail de leur ornementation.

Les résultats de l'examen au MEB montrent que dans la queue de retenue du lac, les espèces de diatomées sont variées, les pennées étant aussi abondantes que les centrées (figure 4), tandis que dans le lac lui-même, et

quelle que soit la saison, c'est une diatomée centrée du genre *Melosira* (*Melosira italica*) qui domine très nettement (figure 5), au point de former la totalité des sédiments de la station n° 8 (figure 6). La prédominance d'une seule espèce de diatomée est assez fréquente dans les lacs. Ainsi dans le lac de l'Arguenon, c'est une diatomée pennée, *Fragilaria crotonensis*, qui, par son abondance et sa répartition, a un

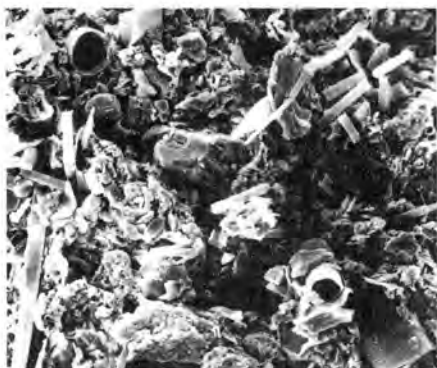


Fig. 3. Vue au microscope électronique à balayage (grossissement : 400) d'un échantillon de sédiment brut séché à l'air et formé d'éléments minéraux, de frustules de diatomées et de matières organiques.



Fig. 4. Vue au microscope électronique à balayage (grossissement : 4 000) d'un échantillon de sédiment après destruction de la matière organique. Le cliché montre deux diatomées, l'une centrique, l'autre pennée, des débris organiques divers et quelques micas.



Fig. 5. Vue au microscope électronique à balayage (grossissement : 4 000) de diatomées centriques du genre *Melosira*. Les tests siliceux des diatomées ont une ornementation très fine caractéristique de chaque espèce.

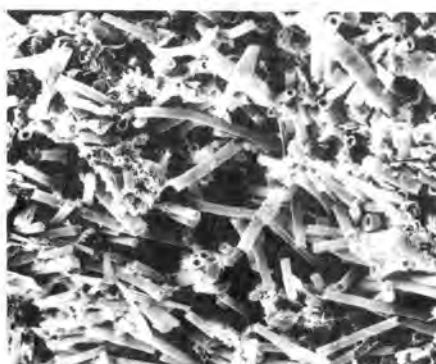


Fig. 6. Vue au microscope électronique à balayage (grossissement : 400) d'un échantillon de sédiment du Gouet formé presque exclusivement d'une seule espèce de diatomée : *Melosira italica*.



Fig. 7. Vue au microscope électronique à balayage (grossissement : 1 000) d'un échantillon de sédiment du lac de l'Arguenon formé essentiellement d'une diatomée pennée : *Fragilaria crotonensis*, associée à quelques diatomées centriques.

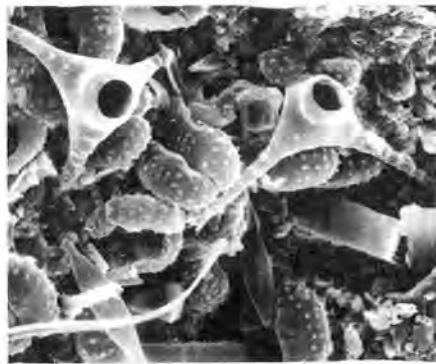


Fig. 8. Vue au microscope électronique à balayage (grossissement 1 000) d'un sédiment du Gouet qui contient des chlorophycées : *Staurostrum gracile* et *Cosmarium reniforme*, associées à des diatomées centriques et pennées.

rôle analogue à *Melosira italica* dans le lac du Gouet (figure 7). Les frustules de diatomées forment toujours, et pour toutes les stations, la part essentielle et nettement dominante de la fraction argilo-limoneuse des sédiments. Les éléments minéraux, partout présents en proportion variable dans la fraction sableuse fine, sont majoritaires dans les sédiments des deux stations situées au débouché des rivières et déposés en période de fortes crues.

De la matière organique

Le troisième constituant essentiel des vases et sédiments est, avec les minéraux et les tests d'origine biologique, la matière organique. Celle-ci est correctement approchée par la détermination des matières volatiles, selon la méthode de la perte au feu à 550° C. Les résultats des analyses montrent que la teneur moyenne en matières organiques est élevée et voisine de 19 % du poids sec des sédiments. Celle-ci traduit la forte participation biologique, en particulier du phytoplancton, dans le phénomène de sédimentation. Des fluctuations relativement faibles sont observées dans les teneurs, à la fois en fonction des saisons et selon les stations. Les valeurs les plus élevées, voisines de 23 %, sont obtenues en période estivale, tandis que les teneurs les plus basses, voisines de 15 %, sont mesurées en période hivernale. Les taux plus élevés en été sont le résultat de l'explosion, pendant cette période, de chlorophycées et cyanophycées. Outre les diatomées, il se développe de nombreuses espèces d'algues telles que *Cosmarium reniforme* et *Staurastrum gracile*, chlorophycées très communes dans le lac du Gouet (figure 8).

Pour les stations 1 et 4 qui sont respectivement situées dans le bras du Gouet et de la Maudouve, les fluctuations des teneurs en matières organiques sont indépendantes de celles observées dans le lac lui-même. En période de crues, les apports terrigènes forment la fraction dominante des sédiments et corrélativement la fraction organique d'origine biologique est moindre. En

hiver, le taux de matières organiques augmente très légèrement en raison de l'apport par les rivières, de feuilles et débris végétaux du bassin versant qui se déposent au voisinage de ces deux stations. Globalement, le pourcentage de matière organique varie peu selon les sites et les saisons. Ces résultats montrent que la forte participation du phytoplancton, et en particulier des diatomées, tend à uniformiser les caractéristiques des sédiments.

Les mesures bimestrielles effectuées sur les vases recueillies dans les sédimentomètres pendant deux ans ont montré qu'il existe une excellente corrélation entre la hauteur de vase déposée et le poids sec du matériau correspondant. Il est donc possible d'avoir une bonne approximation de la hauteur de l'envasement annuel pour chaque station à partir des quantités de sédiments recueillies dans les divers appareils.

En 1988, le dispositif de mesure comportait cinq appareils répartis dans la queue de retenue du lac. Ce sont les sédimentomètres n° 1 et n° 5, situés respectivement au débouché du Gouet dans le lac et à l'extrémité aval de la queue de retenue, qui ont collecté le plus de sédiments. Les quantités de sédiments, exprimées en poids sec et déposées pendant huit mois sont respectivement de 20 kg/m² et 27 kg/m² pour les stations 1 et 5, ce qui correspond à des hauteurs d'envasement de 9 et 11,5 cm. Les mesures bimensuelles montrent que la sédimentation est maximale depuis la fin du printemps jusqu'au début de l'automne et minimale en hiver.

Le graphique de la figure 9 montre très nettement que la sédimentation est quatre fois plus importante pendant la période mai-juin que pendant la période novembre-décembre. Si les quantités de sédiments recueillis dans les appareils n° 1 et n° 4 sont pour partie liées aux apports terrigènes des rivières en périodes de crues, il apparaît toutefois que l'importance de la sédimentation est nettement plus dépendante du développement du phytoplancton que des apports des rivières. La quantité moyenne de sédiments déposés dans la queue de retenue du lac, pendant les huit mois du

suivi de 1988, est de 12 kg/m² de matériau sec, ce qui correspond à un envasement de 5 à 6 cm.

Influence de la sécheresse

L'année 1989 a été marquée par un fort déficit pluviométrique global et une période de sécheresse exceptionnellement longue. De ce fait, les sédiments déposés dans le lac sont presque exclusivement dus à la production primaire.

La courbe de variation des quantités de sédiments recueillis dans les huit sédimentomètres (figure 10), montre que la sédimentation est maximale en été et en automne, c'est-à-dire pendant la période où le débit des rivières est le plus faible. Les quantités de sédiments déposés pendant le second semestre de 1989 (juillet à décembre) sont trois fois plus importantes que celles du premier semestre (janvier à juin). Le développement du phytoplancton et en particulier des diatomées est maximal à la belle saison, depuis la fin du printemps jusqu'à l'automne. Les facteurs qui favorisent le développement des algues microscopiques, pendant cette période, sont essentiellement l'élévation de la température et la pénétration de la lumière dans l'eau.

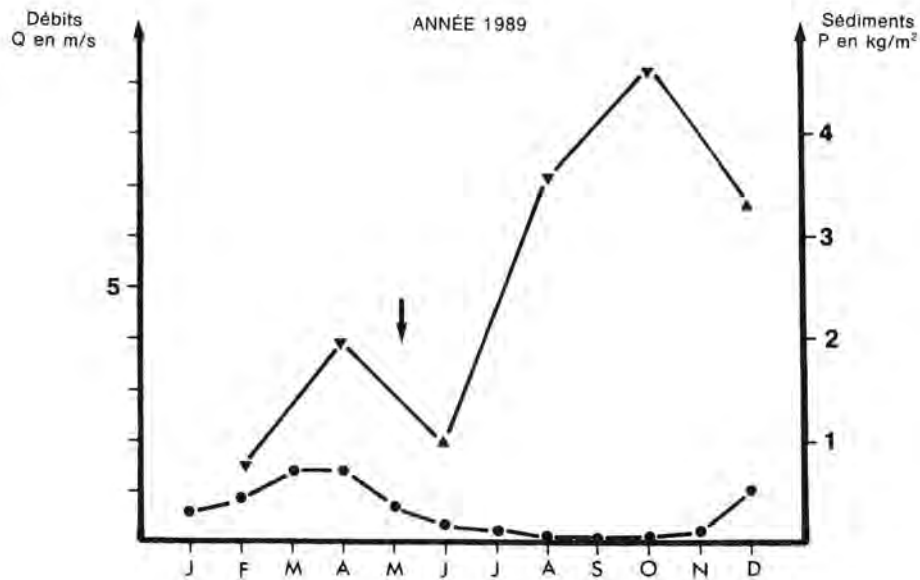
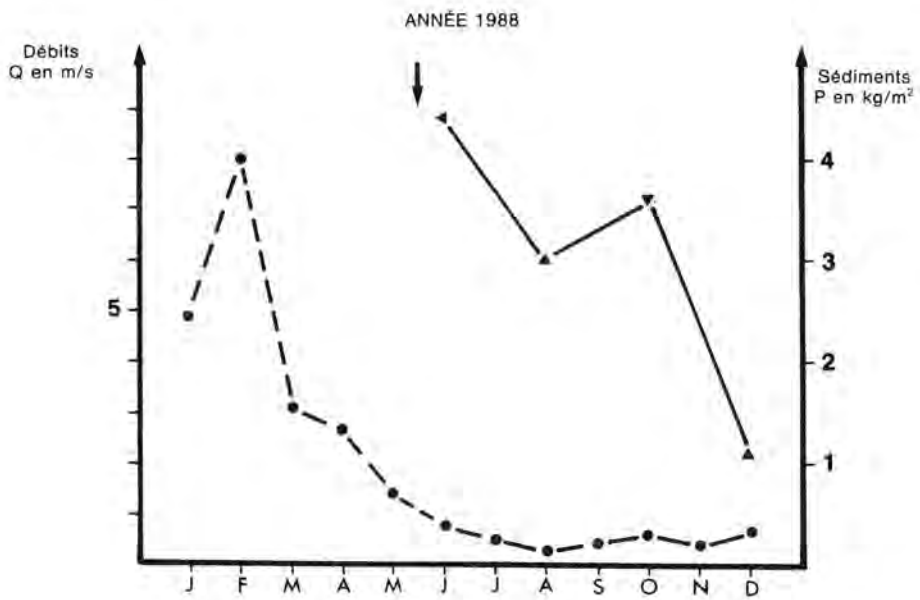
Si l'on compare les mesures effectuées en 1988 et 1989, on observe un léger décalage dans le temps de l'augmentation de la sédimentation. Celle-ci est directement liée aux conditions climatiques spécifiques de l'année.

Pendant l'année 1989, l'envasement a été maximal dans les stations n° 1, 5 et 7. Les quantités de sédiments recueillis pour ces trois sites sont de 27, 21 et 19,6 kg/m², ce qui correspond à des hauteurs de vase de 11,5 9,6 et 9 cm. Ces résultats sont tout à fait en accord avec ceux obtenus en 1988. Il est vraisemblable que la production primaire est homogène dans l'épilimnion, sur toute la surface du lac et que les variations des quantités de sédiments déposés au niveau des diverses stations s'expliquent beaucoup plus par les conditions locales de dépôt des sédiments que par des fluctuations de la

production primaire. Les tests siliceux de diatomées ne sédimentent pas d'une manière uniforme sur toute la superficie du lac, mais s'accumulent d'une manière préférentielle dans les secteurs favorables aux dépôts. La localisation de ces aires peut varier au gré des conditions hydrologiques, des vents dominants, de la cote du plan d'eau... Les deux secteurs correspondant aux stations n° 5 et 7 apparaissent particulièrement propices aux dépôts. La station n° 5 est située à l'aval immédiat des queues de retenue du Gouet et de la Maudouve qui sont particulièrement bien exposées aux vents d'ouest et de sud-ouest. Les sédiments en suspension, collectés en amont sur une vaste surface, se déposent dans un méandre du lac qui n'est plus soumis à l'influence du courant des rivières. Au niveau de la station n° 7, c'est le tablier inférieur du viaduc S.N.C.F. qui forme un obstacle au transit des sédiments en suspension et favorise ainsi la sédimentation. C'est au niveau des stations 3 et 4 situées respectivement à la confluence Gouet-Maudouve et sur le bras de la Maudouve que la sédimentation est la moins importante. Les quantités de sédiments déposés sont voisines de 10 kg/m², ce qui correspond à une hauteur d'envasement de 5 cm. La diminution relative de la sédimentation sur le bras de la Maudouve peut être attribuée au rôle du courant de la rivière qui entraîne vers l'aval le phytoplancton et les sédiments d'origine terrigène les plus fins.

Contrairement aux idées très répandues, c'est beaucoup plus la richesse en nutriments des eaux du lac que l'érosion des sols qui est à l'origine de l'envasement de la retenue. En l'état actuel, cet envasement est généralisé et les épaisseurs de vases accumulées chaque année approchent ou dépassent 10 centimètres dans de vastes secteurs. Il est le résultat de la prolifération des diatomées favorisée par la fertilisation excessive des eaux du lac.

Le phénomène mis en évidence contribue à entretenir, voire à accélérer le processus d'eutrophisation du lac. Les sédiments sont en effet des réservoirs importants de fertilisants, notamment de phosphates (le phosphore représente 0,3 % du poids sec des sédi-



- Débits moyens mensuels du Gouet à la station de jaugeage de Saint-Julien.
- ▼ Quantités de sédiments exprimées en kg/m² de poids sec et recueillies dans les cinq sédimentomètres posés dans la partie amont du lac pour la figure 9 ; dans la totalité des sédimentomètres pour la figure 10.
- ↓ Premier épandage de sulfate de cuivre destiné à inhiber la croissance algale.

Fig. 9 et 10. Évolution des quantités de sédiments recueillies dans la retenue du Gouet en 1988 et 1989.

ments). Dans les conditions d'anaérobiose, qui règnent partout où la réoxygénation de l'hypolimnion n'est pas effectuée, les phosphates sont relargués et contribuent donc par cycles successifs au développement du phytoplancton. Du fait des apports continus des tributaires, le phénomène s'amplifie globalement chaque année.

Comment améliorer la qualité de l'eau ?

L'envasement de la retenue a donc un double effet : diminution progressive du volume utile de la retenue, et accélération du processus d'eutrophisation qui entraîne une dégradation progressive de la qualité de l'eau.

A moyen terme, l'amélioration de la qualité de l'eau du lac ne peut résulter que d'une diminution importante des apports de nutriments par les rivières du bassin versant. Pour limiter les effets des apports actuels, il peut être envisagé de compléter les mesures prises jusqu'alors sur le lac par l'aménagement d'une queue de retenue Gouet-Maudouve. Tous les apports terrigènes du Gouet et de la Maudouve seraient ainsi piégés dans la queue de retenue. De même les nutriments apportés par les rivières seraient éliminés par bioassimilation et pourraient être fixés d'une manière stable dans les sédiments par un traitement adapté. Il est difficile de prévoir dans quelle proportion un tel aménagement pourrait améliorer d'une manière directe la qualité de l'eau. Il est toutefois évident qu'il permettrait de protéger le lac proprement dit dans le cas d'une pollution accidentelle des rivières (Gouet et Maudouve) et d'envisager à long terme un curage limité à la queue de retenue. La mise en œuvre de mesures préventives visant à diminuer d'une manière significative les apports de nutriments dans le lac ne peuvent avoir d'effets bénéfiques qu'à moyen terme, car les quantités énormes de vases accumulées constituent un réservoir de fertilisants, et notamment de phosphates, largement suffisant pour maintenir à son niveau actuel le degré d'eutrophisation du lac pendant de nombreuses années. Les mesures

de prévention demeurent malgré tout les seules efficaces et la restauration de la qualité des eaux du lac exige souvent de longs délais.

L'envasement progressif d'un étang, d'un lac ou d'une rivière peut être considéré comme un phénomène naturel. Depuis très longtemps, l'homme a procédé à la vidange et au curage des étangs, au dévasement des biefs des moulins, au nettoyage des berges des rivières... Le fait nouveau est l'accélération du phénomène consécutif au processus d'eutrophisation des milieux aquatiques. L'étude de la sédimentation dans la retenue du Gouet a montré que les hauteurs annuelles d'envasement avoisinent ou dépassent 10 cm dans de vastes secteurs. Cette situation, loin d'être exceptionnelle, a tendance à devenir la règle dans de nombreuses retenues naturelles ou artificielles de Bretagne. Tout au plus observe-t-on un léger décalage dans le temps de l'accélération du phénomène, en fonction de la présence d'activités plus ou moins polluantes dans les bassins versants. L'envasement de nos lacs et rivières est la conséquence directe de l'activité humaine. Les révolutions agricole et industrielle engagées dès les années 1960, associées à de profonds changements de nos modes de vies (urbanisation, utilisation croissante de produits lessiviels...) ont engendré de nouvelles formes de pollution qui se trouvent fortement concentrées. Le milieu aquatique, qui est un système vivant, a réagi et s'est adapté à ces nouvelles contraintes.

L'envasement accéléré des lacs et rivières est le résultat visible de cette adaptation. Aussi lorsqu'on évoque, pour expliquer l'envasement des rivières, l'abandon de leur entretien, c'est retenir l'une des causes, mais sans aucun doute oublier l'essentiel : le milieu aquatique a profondément évolué depuis cinquante ans. Les taux de nitrates et de phosphates se sont accrus dans des proportions considérables, favorisant ainsi le développement du phytoplancton dans l'eau. La productivité des plans d'eau a augmenté dans des proportions encore plus importantes que celle de l'agriculture, mais dans un lac, à l'inverse de ce qui se passe dans un champ cultivé, le phytoplancton produit d'une manière



Curage d'une mare dans la réserve de Bois-Joubert.

intensive n'est pas récolté, et se dépose sur le fond et les berges sous forme de vase. Un envasement important ne fait donc que traduire une forte productivité du plan d'eau.

Des méthodes curatives

L'homme qui a profondément détérioré le milieu aquatique peut-il, par son action, le restaurer ? Outre les méthodes préventives qui seront à terme les seules efficaces, il faut bien souvent aujourd'hui faire appel à des méthodes curatives. Le dévasement des rivières et des lacs fait partie des méthodes qui permettent de restaurer un milieu aquatique et d'améliorer la qualité de l'eau. Les demandes de dévasement se multiplient et dans les années à venir, le marché sera énorme. Les procédés proposés sont variés et vont certainement beaucoup évoluer, grâce notamment au développement des biotechnologies. Dès aujourd'hui il faut ajouter, aux procédés mécaniques traditionnels, des procédés chimiques et biologiques. Nous disposons de peu de références pour juger du degré d'effi-

cacité de ces dernières, aussi avant de préconiser une méthode miracle, il conviendra d'effectuer des essais préalables et surtout de réaliser un suivi du milieu pendant et après un traitement éventuel destiné à assurer le dévasement d'un plan d'eau.

Les mesures prises pour assurer le dévasement des rivières sont le plus souvent traditionnelles : débroussaillage des berges, enlèvement des souches tombées dans le lit, faucardage et arrachage des macrophytes qui envahissent le lit et les berges... Toutes ces actions visent à améliorer l'écoulement de l'eau, car un ralentissement important du courant a pour conséquence le dépôt des débris organiques transportés par la rivière et des apports terrigènes dus à l'érosion des sols. Ces mesures, qui sont utiles et indispensables pour restaurer la qualité des rivières, sont-elles suffisantes ?

Dans les rivières, comme dans les lacs, la vase est formée d'éléments provenant de l'érosion des sols, de matières organiques diverses, mais également d'algues microscopiques du phytoplancton et en particulier de diatomées. Ces dernières prolifèrent d'autant mieux que les vitesses de courant sont plus faibles. En été, les rivières à très

faibles débits, établies sur bassin versant schisteux, constituent un milieu semblable à un lac peu profond et s'ensavent selon le même processus. Dans ce cas, l'ensablement de la rivière est le résultat d'une transformation par bioassimilation des nutriments de l'eau. L'ensablement sera donc d'autant plus important que les teneurs en nitrates et phosphates seront plus élevées. L'érosion des sols n'est pas la seule cause de l'ensablement et avant de décider du choix d'un aménagement coûteux, il convient donc de faire un diagnostic complet des divers phénomènes observés. Ainsi les mesures à prendre pour éviter des apports terrigènes dans un plan d'eau ne sont pas les mêmes que celles à envisager pour tenter de stopper un ensablement d'origine phytoplanctonique. Dans le premier cas, il sera intéressant de dériver le lit du tributaire qui ne déposera plus ses sédiments dans le lac. Dans le second cas, au contraire, il sera important de maintenir le courant de la rivière dans la retenue, car celui-ci sera un facteur limitant du développement des algues phytoplanctoniques. Le renouvellement de l'eau de la retenue en période estivale empêchera de plus une élévation trop importante de la température, facteur très favorable pour l'apparition du "bloom" algal. Si les rivières à bas-

sin versant granitique s'ensavent nettement moins que celles établies sur bassin versant schisteux, c'est essentiellement parce que les premières bénéficient de courants même en été, car ceux-ci sont maintenus par de bons débits d'étiage. Le maintien d'un courant permanent empêche toute prolifération excessive du phytoplancton en période estivale. La création de barrages destinés à soutenir les débits d'étiage et la pose de déflecteurs destinés à réguler la vitesse de l'eau sont donc des solutions intéressantes pour limiter l'ensablement des rivières.

Suivis biologiques indispensables

Les méthodes traditionnelles pour dévaser une rivière sont efficaces, mais nécessitent beaucoup de main-d'œuvre, aussi il leur est parfois associé ou préféré un traitement chimique de la vase; l'épandage de craie finement broyée ou de chaux favorise une "digestion" sur place de la vase. Un tel apport permet d'améliorer le pH des fonds ensavés des lacs et rivières qui ont une tendance à l'acidification et favorise la minéralisation des matières organiques. L'ion calcium provoque



A. Jigorel

Dragage suceuse spécialement conçue pour le dévasement des retenues.



Refoulement des vases et sédiments dans une lagune de décantation.

une floculation des éléments en suspension dans l'eau ainsi qu'à la partie supérieure du dépôt de vase. Ces éléments floculés sont plus facilement remis en suspension sous l'action de courants forts et sont donc évacués vers l'aval lors des crues ; le traitement d'une vase au carbonate de calcium permet d'améliorer sa structure, favorisant ainsi la dégradation naturelle des matières organiques. Après traitement, on observe un développement de l'activité microbienne aérobie, ainsi que des bactéries qui accélèrent la minéralisation des matières organiques.

Dans un lac, les effets bénéfiques d'un traitement au carbonate de calcium se limitent à l'amélioration de la structure des vases. En l'absence de courant important, les particules floculées ne peuvent être évacuées vers l'aval comme pour les rivières. Seules des études spécifiques pourraient permettre d'apprécier le rôle d'un tel traitement sur la fixation d'une manière stable des phosphates contenus dans la vase.

Les techniques les plus récentes de traitement de la vase consistent dans un traitement mixte, chimique et biologique. Le carbonate de calcium ou le

sulfate de calcium finement broyés sont enrichis en bactéries avant leur épandage. L'enrichissement du milieu en bactéries sélectionnées pour leur activité enzymatique et leur puissance de dégradation accélère le processus naturel de minéralisation des vases. De telles techniques, qui ont fait leurs preuves notamment pour des hydrocarbures, sont désormais appliquées pour le dévasement des lacs et rivières. Si le résultat est souvent spectaculaire en apparence, il est difficile, en l'absence de références et d'études précises, de juger de leur efficacité réelle et de leur incidence sur le milieu. Dans tous les cas, il conviendra lors d'expériences de ce type, de faire des suivis biologiques et sédimentologiques indispensables avant de généraliser l'emploi de telles méthodes.

Actuellement, le dévasement des lacs est surtout effectué à l'aide de dragues suceuses. Les vases sont refoulées dans des bassins de décantation. Après séchage naturel, les boues peuvent si nécessaire être reprises à la pelle mécanique et utilisées comme amendement en agriculture. Toutes ces opérations sont longues et coûteuses. Le stockage puis l'élimination des boues ne sont pas toujours aisés. Aussi

lorsque le lac est dévasé, on peut se retrouver avec des déchets encombrants et difficiles à éliminer.

Un phénomène durable

Les études récentes effectuées sur les retenues départementales des Côtes-d'Armor montrent que l'on assiste à un envasement généralisé et accéléré des milieux aquatiques de notre région. Les épaisseurs de vase molle déposée chaque année dans les lacs sont impressionnantes, souvent comprises entre 5 et 10 cm. S'il est vrai que les hauteurs réelles d'envasement sont légèrement moins importantes, à la fois en raison de la compaction naturelle des sédiments et de la dégradation d'une partie de la matière organique qu'ils contiennent, il n'en demeure pas moins que l'on a assisté en une dizaine d'années au remplissage total de retenues qui n'avaient jamais jusqu'alors nécessité de curage. Le phénomène d'envasement s'est nettement accéléré pendant les vingt ou trente dernières années. Il est la conséquence directe des pollutions engendrées par l'évolution récente de nos modes de vie et du développement des activités agricoles et industrielles. La vase de nos étangs, lacs et rivières, est le produit de la transformation par bioassimilation de

tous les nutriments apportés par l'homme dans l'eau. Les actions préventives ou curatives engagées jusqu'alors ne peuvent suffire à maintenir et encore moins à restaurer une qualité des eaux suffisante pour empêcher cet envasement excessif dû aux proliférations planctoniques. Le phénomène mis en évidence sera durable, même si l'on prend dès aujourd'hui des mesures draconiennes pour enrayer l'augmentation des apports d'éléments nutritifs dans les milieux aquatiques. Il apparaît donc nécessaire de prendre en compte dans notre région ce phénomène nouveau, et de prévoir dès la conception des ouvrages que toute retenue à créer devra subir un dévasement à plus ou moins longue échéance. Pour en limiter l'envasement, il paraît intéressant d'effectuer des aménagements en queue de retenue. Ainsi la présence d'une digue permet de piéger tous les apports dus à l'érosion des sols et peut assurer la sauvegarde de la qualité de l'eau dans le cas d'une pollution accidentelle des rivières. En piégeant par bioassimilation une part des éléments nutritifs apportés par les rivières, la queue de retenue aménagée contribuerait également à améliorer la qualité de l'eau du lac. Enfin, les opérations de curage nécessaires à terme seraient grandement facilitées, car elles pourraient le plus souvent être limitées à la queue de retenue proprement dite. Mai 1990.