Laboratoire d'écologie et biologie aquatiques
Département d'anthropologie et écologie
Université de Genève

BASES NECESSAIRES A LA GESTION DE LA BEINE LITTORALE DE LA RIVE SUD DU LAC DE NEUCHATEL

PERFETTA, J., BÄNZIGER, R., JUGE, R., LACHAVANNE, J.-B. & B. LODS-CROZET

Genève

mai 1993

Laboratoire d'écologie et biologie aquatiques
Département d'anthropologie et écologie
Université de Genève

BASES NECESSAIRES A LA GESTION DE LA BEINE LITTORALE DE LA RIVE SUD DU LAC DE NEUCHATEL

mandataire : Prof. J.-B. LACHAVANNE

auteurs : PERFETTA, J., BÄNZIGER, R., JUGE, R., &
J.-B. LODS-CROZET

Genève
mai 1993

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION : LE MANDAT

2. ECOLOGIE GENERALE DE LA BEINE LITTORALE

2.1. STRUCTURE

2.1.1. VÉGÉTATION AQUATIQUE

2.1.2. FAUNE

2.2. FONCTIONNEMENT

2.3. ÉVOLUTION

3. LA BEINE LITTORALE DE LA RIVE SUD DU LAC DE NEUCHATEL

3.1. GÉOMORPHOLOGIE

3.1.1. BASSIN VERSANT

3.1.2. GÉOLOGIE ET SÉDIMENTS

3.1.3. ÉROSION

3.1.4. BATHYMÉTRIE

3.1.5. MORPHOLOGIE

3.1.6. SURFACES

3.1.7. AMÉNAGEMENT DES RIVES

3.2. PHYSICO-CHIMIE

3.2.1. LE LAC DE NEUCHÂTEL

3.2.2. LA ZONE LITTORALE

3.3. VEGETATION

3.3.1. PHYTOPLANCTON

3.3.2. ALGUES FILAMENTEUSES

3.3.3. MACROPHYTES

3.4. FAUNE

4. VALEUR ECOLOGIQUE DE LA BEINE LITTORALE ET PRINCIPAUX PROBLEMES

4.1. VALEUR ACTUELLE

4.2. ÉVOLUTION PREVISIBLE

4.3. PROBLÈMES ACTUELS OU PRÉVISIBLES

5. PROPOSITIONS DE GESTION ET STRATEGIE D'ETUDE DE LA BEINE LITTORALE

5.1. PRINCIPES DE GESTION

5.2. MESURES DE GESTION

5.2.1. MAINTIEN DE LA DIMENSION DE LA BEINE LITTORALE

5.2.2. MAINTIEN DE LA DIVERSITÉ DES HABITATS

5.2.3. QUALITÉ DES CONDITIONS DU MILIEU

5.2.4. CONSERVATION DES ROSELIÈRES LACUSTRES

5.2.5. MAINTIEN, RÉTABLISSEMENT OU CRÉATION DE VOIES DE COMMUNICATION ENTRE LA BEINE LACUSTRE ET LE MARAIS CÔTIER

5.3. STRATÉGIE D'ÉTUDE DE LA BEINE LITTORALE

LISTE DES FIGURES

Fig. 1	Les principales zones du rivage et du littoral lacustre. Dessin réalisé d'après les données de Hutchinson (1967). In: Lachavanne & Juge (1993).
Fig. 2	Formation des rives lacustres. In: Lachavanne & al. (1987).
Fig. 3	Evolution des teneurs du lac de Neuchâtel en Phosphore total entre 1982 et 1991.
Fig. 4	Répartition de la surface colonisée par unité cartographique (600 à 800 m. de rive). D'après Lachavanne & al. (1983).

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 1	Formations et groupements végétaux palustres et aquatiques des lacs en région tempérée (selon le système de Luther, 1949).
Tab. 2	Principales caractéristiques limnologiques du lac de Neuchâtel et de quelques autres lacs du Plateau suisse.
Tab. 3	Surfaces de zone littorale du lac de Neuchâtel.
Tab. 4	Liste floristique du lac de Neuchâtel (Lachavanne & al., 1983) avec indication du degré de menace selon Landolt (1991).
Tab. 5	Richesse floristique du lac de Neuchâtel en 1979.
Tab. 6	Richesse floristique des principaux lacs suisses.
Tab. 7	Evolution de la richesse floristique du lac de Neuchâtel.
Tab. 8	Variation spécifique (%) de la flore de 4 lacs du Plateau suisse.
Tab. 9	Liste des espèces de poissons du lac de Neuchâtel (D'après Kirchhofer & al., 1990).

1. INTRODUCTION : LE MANDAT

La zone riveraine (bas-marais, ripisylve, etc.) de la rive sud du lac de Neuchâtel fait l'objet d'études attentives depuis de nombreuses années (voir dans Rollier & al., 1981; Rollier et Roulier, 1984; Groupe d'étude et de gestion, 1992). En revanche, les connaissances actuelles concernant la beine littorale lacustre sont insuffisantes pour assurer une gestion compatible avec les objectifs de protection des milieux naturels.

En décembre 1991, le Groupe d'étude et de gestion de la rive sud du lac de Neuchâtel mandatait le laboratoire d'écologie et biologie aquatiques de l'Université de Genève pour établir un programme d'études permettant une gestion appropriée de la beine littorale. Cette approche, complémentaire aux travaux entrepris depuis plusieurs années sur les milieux humides, devrait permettre de maintenir la beine littorale lacustre dans un état correspondant à la politique de gestion définie pour l'ensemble de la rive sud du lac de Neuchâtel (Rollier & al. 1981). Les études à entreprendre ou à poursuivre, de même que leur étendue et leur durée, doivent être choisies de manière à ne comprendre que des investigations directement utiles pour la gestion de ce biotope.

La gestion de la beine lacustre s'articule autour d'un certain nombre de connaissances indispensables en relation avec la structure, le fonctionnement et l'évolution de l'écosystème littoral :

◊ la dynamique des phénomènes géomorphologiques (érosion / atterrissement)

◊ l'évolution physico-chimique des eaux et du substrat (niveau trophique).

◊ la structure, le fonctionnement et la dynamique des biocénoses

◊ les échanges entre les compartiments de l'écosystème côtier, avec le bas-marais ainsi qu'avec les zones limnétique et profonde.

Les objectifs du présent mandat consistent donc à :

- inventorier et synthétiser les données existantes sur la zone littorale du lac de Neuchâtel, en particulier de sa rive sud.
- définir la valeur écologique de la beine littorale de la rive sud par rapport à l'ensemble du lac, voire par rapport aux autres lacs du Plateau suisse.
- relever d'éventuelles particularités physiques ou biologiques de la beine lacustre de la rive sud
- signaler les problèmes actuels ou prévisibles liés à la beine littorale
- définir un programme de gestion permettant de maintenir ou de modifier la valeur actuelle de la beine.
- proposer une stratégie d'étude pour l'acquisition des données nécessaires à l'application du programme de gestion.

L'approche utilisée est essentiellement basée sur les données existantes. Il faut relever d'emblée que ces informations sont dispersées, présentent souvent un caractère incomplet et fragmentaire, et que de nombreuses données sont relativement anciennes, et donc souvent obsolètes.

2. ECOLOGIE GENERALE DE LA BEINE LITTORALE

2.1. STRUCTURE

La structure de la beine littorale lacustre est essentiellement déterminée par la combinaison de paramètres géologiques (géomorphologie, sédiments) hydrologiques (courants, variations de niveau) et biologiques (colonisation par la végétation aquatique). Suivant Hutchinson (1967), la limnologie moderne subdivise le littoral lacustre en plusieurs zones schématisées dans la figure 1.

Le rivage (ou supra littoral) comprend la zone terrestre qui est directement influencée par le lac (aspersion par les vagues, présence d'une nappe souterraine).

La **zone littorale** est comprise entre la limite des hautes eaux (côté terre) et la limite de la colonisation des fonds par la végétation (côté lac). On distingue généralement un **eulittoral** entre la limite des hautes eaux et celle des basses eaux et un **infralittoral** entre la limite des basses eaux et celle de la colonisation par la végétation. Le type de végétation aquatique permet de distinguer un infra littoral supérieur (plantes émergentes), moyen, (plantes enracinée à feuilles flottantes) et inférieur (plantes submergées).

Une **zone littorale effective** peut être définie pour chaque lac en fonction de la profondeur réellement atteinte par la végétation macrophytique. Celle-ci dépend principalement de la transparence de l'eau (degré d'eutrophisation ou concentration de matières en suspension).

Au vu des observations effectuées sur plus de 70 lacs suisses, la limite de colonisation atteint au maximum la profondeur de 20 m, qui peut donc être considérée comme limite de la **zone littorale théorique** (Lachavanne & al. 1986).

2.1.1. VEGETATION AQUATIQUE

La végétation de la zone littorale lacustre est composée de deux grandes catégories d'organismes : les algues, unicellulaires ou filamenteuses, regroupées sous la dénomination générale de microphytes, et les plantes vasculaires, connues sous la dénomination de macrophytes[1].

Parmi les communautés algales, on différencie les algues épipéliques sur les substrats fins, épilithiques sur les substrats durs, épiphytiques sur les macrophytes et épizooïques sur les animaux.

Les communautés macrophytiques comprennent des spermaphytes, ou plantes à fleurs, des ptéridophytes, des bryophytes et une classe de thallophytes, les characées. Ces dernières sont rattachées aux macrophytes en raison de leur taille et de leur mode de vie proches de ceux des plantes supérieures.

De la terre ferme en direction du domaine des eaux, en fonction du gradient d'humidité croissant, les groupements de répartissent selon leur degré d'hygrophilie en ceintures plus ou moins concentriques dans les secteurs où la morphométrie de la rive et les conditions édaphiques le permettent (figure 1). L'écosystème côtier lacustre comprend diverses formations et groupements végétaux que l'on classe d'après le système de Luther (1949) en deux grands ensembles :

- **la végétation riveraine** (palustre) englobe tous les groupements de plantes influencés par la présence de la nappe depuis la grève inondable jusque dans les endroits où la nappe d'eau se trouve à une profondeur inférieure à environ 2 mètres dans le sol,

- **la végétation littorale** (aquatique) comprend tous les groupements de plantes qui vivent dans l'eau ou dont au moins une partie de l'appareil végétatif baigne dans l'eau.

---

[1] Certains auteurs rattachent toutefois les macroalgues filamenteuses aux macrophytes.

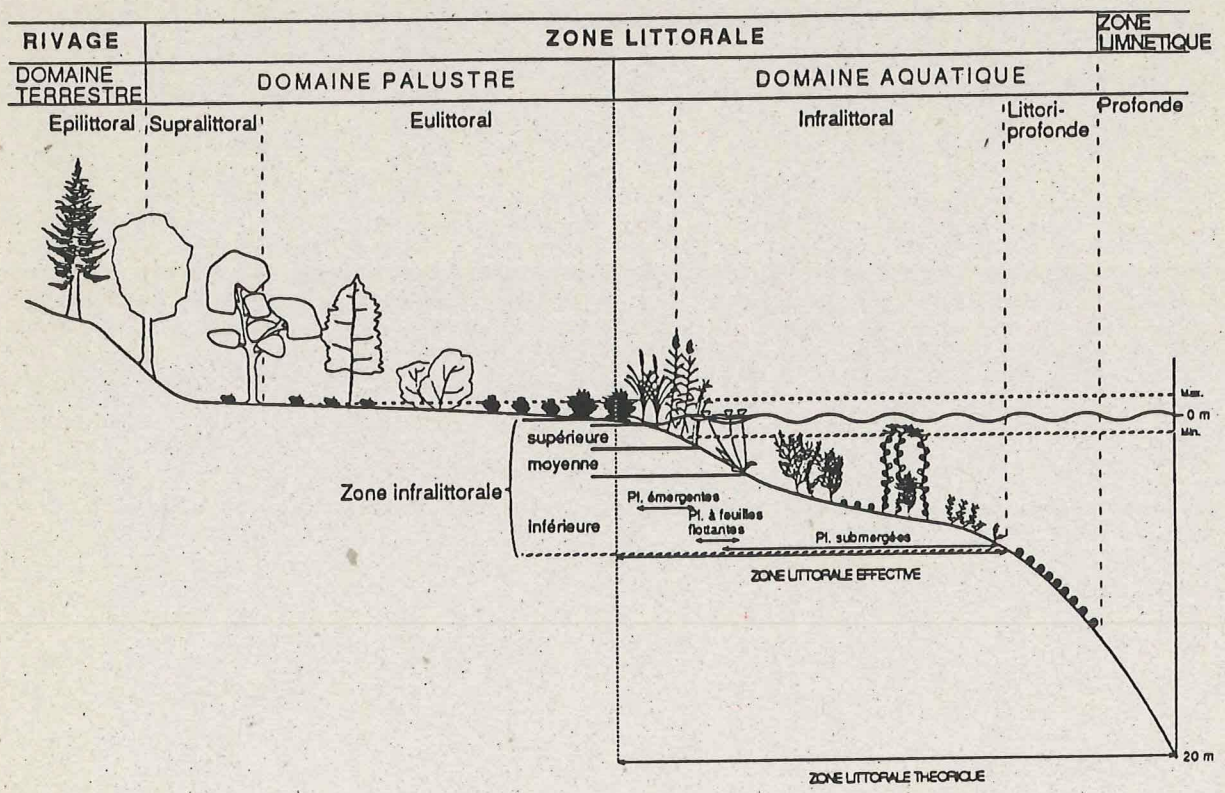


FIGURE 1: LES PRINCIPALES ZONES DU RIVAGE ET DU LITTORAL LACUSTRE. DESSIN RÉALISÉ D'APRÈS LES DONNÉES DE HUTCHINSON (1967) IN LACHAVANNE & JUGE, (1993).

Il est classique de distinguer 5 formations :

- les plantes enracinées émergentes, (feuilles et inflorescences dressées au-dessus de l'eau),
- les plantes enracinées à feuilles flottantes (à la surface de l'eau),
- les plantes enracinées submergées,
- les plantes libres flottant à la surface de l'eau
- les plantes libres intraaquatiques

La limite entre ces deux ensembles de végétation n'est pas nette à cause des variations du niveau de la nappe d'eau. Ainsi les plantes de la zone eulittorale appartiennent-elles tantôt au rivage, tantôt au littoral. Les principales formations et groupements végétaux des écosystèmes d'eau stagnante en région tempérée sont présentés par ordre croissant d'humidité dans la figure 1 (selon le système de Luther, 1949) et le tableau 1.

Contrairement à la végétation terrestre, les peuplements aquatiques présentent rarement plusieurs strates à cause de la faible pénétration de la lumière dans l'eau.

La structure des peuplements macrophytiques est déterminée par la composition spécifique, l'importance relative des espèces et leur forme de croissance. La physionomie générale permet d'effectuer une typologie basée sur la forme, le mode de propagation et d'occupation de l'espace des peuplements et d'intégrer ce descripteur comme élément structural de la végétation aquatique (Lachavanne & al. 1993).

L'intégrité structurale des peuplements végétaux riverains des lacs, selon un gradient d'humidité croissant dépend de la pente des rives et des nature et texture du sol. En effet, une zonation végétale continue, telle qu'elle est présentée sur la figure 1, n'est possible que sur des rives plates ou peu inclinées et sur un sol non rocheux. En outre, tout aménagement et activité humaine modifiant la forme et la nature de la rive entraîne des changements plus ou moins importants dans la structure des peuplements végétaux. Dragages, remblayages et construction de murs et enrochements sont autant d'interventions responsables de la raréfaction de ces peuplements complexes qui jouent pourtant un rôle non négligeable dans l'écologie des écosystèmes côtiers : zone tampon et filtre des flux écologiques entre écosystèmes terrestre et aquatique (matière, énergie et organismes ainsi que polluants d'origine diffuse), protection contre l'érosion, habitats diversifiés pour la faune, etc...

2.1.2. FAUNE

La zone littorale est sous l'influence de nombreux facteurs abiotiques fluctuants (lumière, température, oxygène, vagues, courant, géomorphologie, apports allochtones...) qui conditionnent la répartition, la diversité et l'abondance de la faune.

Dans les écosystèmes aquatiques littoraux, on distingue habituellement une faune benthique et une faune sestonique

Le zoobenthos comprend les animaux vivant sur le fond ou à l'intérieur du sédiment. On distingue généralement quatre types de communautés sur la base des substrats colonisés : fonds meubles (sable, limons), fonds graveleux ou de galets, substrats durs (blocs, grosses pierres, etc.) et végétation aquatique.

Dans les eaux douces, les invertébrés représentent la quasi totalité du zoo benthos. Seules quelques espèces de poissons, comme le chabot ou la lotte, font également partie de la faune benthique.

Le zoobenthos peut être divisé en plusieurs catégories selon la taille des organismes qui le constituent (micro-, meio- ou macrozoobenthos).

La répartition des invertébrés benthiques dans la zone littorale est fonction de leur régime alimentaire (herbivores, détritivores, prédateurs), de leur type de locomotion (fixes, marcheurs, rampants, fouisseurs, nageurs) et de leur capacité à s'adapter aux conditions particulières de cette zone d'interface entre l'eau et la terre qui leur sert d'habitat.

Contrairement à la faune benthique, la faune sestonique de la zone littorale lacustre comprend essentiellement des poissons et des crustacés planctoniques. Ces organismes sont toutefois moins dépendants de la zone littorale en raison de leur mobilité.

La zone littorale est également fréquentée par plusieurs espèces d'oiseaux aquatiques auxquelles elle sert de source de nourriture, de lieu de repos, d'abri ou de reproduction.

2.2. FONCTIONNEMENT

Les écosystèmes côtiers jouent un rôle essentiel dans l'écologie lacustre :

- c'est dans cette zone que se concentre la plus grande diversité d'un lac. Elle se caractérise par une richesse biologique et biotopique beaucoup plus importante que dans les autres compartiments de l'écosystème lacustre.

- de nombreuses espèces animales et végétales sont confinées dans cette zone ou en dépendent pour certaines fonctions biologiques essentielles (nourriture, reproduction, refuge, etc.).

- ils jouent un rôle tampon entre la terre (source de pollution) et le lac (récepteur). C'est une zone auto-épuratrice grâce à la bonne oxygénation et à la température élevée des eaux, favorable à l'activité microbienne; c'est également une zone auto-purificatrice grâce aux macrophytes qui favorisent la sédimentation des particules en suspension.

Végétation riveraine

Forêts riveraines (ripisylves)
Arbres à bois tendre : bouleaux, peupliers, aulnes, saules

Prairies à petites laîches
- **prairies à choin** (Orchio-Schoenetum nigricans)
- **prairies à canche bleue** (divers groupements du Molinion)
- **prairies à petites laîches** (Ranunculo-Caricetum hostianae, etc.).

Prairies à grandes laîches
- **prairies à laîches élevées** (Carex elata)
- **prairies à marisques** (Cladietum marisci et roselières à Cladium mariscus)
- **pseudoroselières** (Phalaris arundinacea)

Végétation littorale

Amphiphytes
- **hélophytes**, plantes enracinées, dont la base est dans l'eau et les feuilles et inflorescences sont dressées au-dessus de l'eau (Phragmites australis, Typha sp.; Scirpus lacustris)

- **pseudohydrophytes**, plantes souvent entièrement immergées mais ne pouvant assurer leur reproduction que lorsque les parties végétatives sont exondées (Sagittaria sagittifolia, Juncus bulbosus)

- **pleustohélophytes**, plantes fixées à l'état jeune, se détachant et poussant librement ensuite en surface où elles forment des plaques flottantes (Glyceria fluitans)

Hydrophytes
- **rhizophytes**, plantes fixées au substrat (sol)
  * **à feuilles flottantes**, avec présence ou non de feuilles submergées (Nuphar, Nymphaea, Potamogeton natans, etc.)
  * **infraaquatiques** (divers Potamogeton, Myriophyllum, Najas, etc.)

- **pleustophytes**, plantes libres non enracinées
  * **flottantes** à la surface de l'eau (Lemna, Spirodella, Hydrocharis morsus ranae)
  * **intra-aquatiques** (Utricularia, Ceratophyllum)

TABLEAU 1 : FORMATIONS ET GROUPEMENTS VÉGÉTAUX PALUSTRES ET AQUATIQUES DES LACS EN RÉGION TEMPÉRÉE (SELON LE SYSTÈME DE LUTHER, 1949)

L'existence d'une distribution spatio-temporelle de la végétation joue un rôle essentiel dans la vie de la communauté littorale puisqu'elle structure l'écosystème (Pieczynska, 1976). Elle conditionne l'utilisation de l'espace par les organismes animaux. Cette structure est dynamique et se modifie en fonction des conditions du milieu environnant (saisons) et de la succession des biocénoses.

Il est reconnu depuis longtemps déjà que la végétation aquatique participe au fonctionnement de l'écosystème limnique global, mais surtout que son rôle est essentiel dans les écosystèmes littoraux, dont l'activité biologique est particulièrement intense.

Les principaux rôles écologiques des macrophytes dans les écosystèmes aquatiques ont été résumés par Barbe (1984) et Lachavanne & al. (1985) :

ROLE PHYSIQUE

Des roselières en bonne santé forment sous certaines conditions une protection efficace de la rive en empêchant son érosion. De plus, une végétation dense favorise la sédimentation des particules. Les racines des plantes consolident les sédiments et participent ainsi à la stabilisation du rivage.

L'écran que constituent les plantes libres flottantes (lentilles d'eau) ou les plantes fixées à feuilles flottantes (nénuphars) limite la pénétration du rayonnement lumineux et le développement de la végétation sous-jacente (plantes immergées, algues macroscopiques, phytoplancton). Simultanément, cette couverture végétale joue un rôle de barrière entre l'eau et l'atmosphère. En limitant les échanges de chaleur, elle engendre ainsi une stratification thermique estivale peu marquée (Juget & Rostand, 1973) et empêche le réchauffement excessif des couches d'eau supérieures.

Les échanges entre le milieu aquatique et l'atmosphère se font directement au niveau de leur surface de contact. L'évapo-transpiration des végétaux à feuilles flottantes est supérieure à l'évaporation de la surface libre. Cette évapo-transpiration revêt une importance particulière dans les écosystèmes à faible taux de renouvellement des eaux.

ROLE CHIMIQUE

Les macrophytes influencent avant tout le cycle de l'oxygène dans l'eau à travers la photosynthèse. L'oxygène ainsi libéré dans la zone littorale, outre de permettre la respiration des animaux, a pour rôle essentiel de favoriser la minéralisation de la matière organique par oxydation (nitrification). Ces processus complexes ont une influence sur les cycles journaliers de l'oxygène, du pH, des bicarbonates et carbonates (formation de craie lacustre).

La nutrition azotée et phosphorée des plantes s'effectue par absorption directe des substances nutritives dans l'eau ou dans les sédiments. Les macrophytes enracinés participent ainsi à la remobilisation de ces éléments à partir des sédiments et donc indirectement à l'enrichissement des eaux. Dans le cas des macrophytes, la consommation des nutriments a lieu essentiellement au cours de la période végétative (mai-octobre).

Enfin, les végétaux libèrent dans l'eau des substances organiques selon deux processus:

- l'un est continu, il s'agit de produits d'excrétion sous forme de matières organiques dissoutes.
- l'autre est lié à la décomposition de la matière organique des tissus végétaux. Il peut se produire naturellement au cours d'un cycle annuel ou être le résultat de certaines actions anthropogènes (faucardage, traitement chimique). A terme, ces produits viennent s'ajouter aux sédiments superficiels et entrent dans le cycle de la matière par l'intermédiaire des décomposeurs.

ROLE BIOLOGIQUE

Les végétaux constituent l'élément de base des chaînes alimentaires des biocénoses aquatiques. Ils sont à l'origine d'une production de matière organique dont l'importance dépend du degré d'eutrophisation des eaux. La matière produite est utilisée directement (consommation des herbivores) ou indirectement (consommation des carnivores) par les animaux aquatiques. Ensuite, les déchets végétaux et animaux (cadavres, produits d'excrétion) sont dégradés et minéralisés par les bactéries et les microchampignons qui recyclent ainsi la matière et la rendent à nouveau disponible pour les plantes. Dans les lacs eutrophes, la production nette en plantes aquatiques supérieures peut atteindre 4 à 7 tonnes par hectare alors que dans les lacs oligotrophes, elle n'est que de 1 à 3 t/ha. La participation des macrophytes à la production primaire générale d'un lac dépend du pourcentage de sa surface occupée par la zone littorale.

L'augmentation de la concentration en fertilisants peut entraîner des développements importants d'algues et de plantes aquatiques supérieures. Le maximum de végétation macrophytique est observé dans les stades entrophes (Lachavanne, 1985).

La production d'oxygène par les plantes, pouvant varier de 0.13 à 7.36 g/m^2/jour (Sculthorpe, 1976), permet le développement dans l'environnement immédiat des macrophytes d'espèces animales très exigeantes vis-à-vis de ce paramètre.

Les principaux consommateurs de végétaux aquatiques, macrophytes et phytoplancton, sont les petits invertébrés tels que crustacés, sangsues, aselles, coléoptères aquatiques ainsi que des larves d'insectes (éphémères, libellules, trichoptères) et des mollusques (anodontes, limnées). Certaines espèces de poissons (cyprinidés) sont également herbivores et consomment les feuilles et les tiges de certains macrophytes. Les plantes et les animaux ne sont pas seulement liés entre eux à travers la chaîne alimentaire; les peuplements de

macrophytes fournissent aussi un milieu de vie varié (habitats). Ils procurent support et abri pour de nombreuses espèces, ainsi que le montrent les quelques exemples qui suivent.

Les plantes aquatiques contribuent à l'augmentation de la surface d'accueil potentielle du milieu: un mètre carré de sédiment peut offrir, selon la nature de la végétation présente, jusqu'à 20 m^2 de surface foliaire pour la faune et la flore épiphytiques. La densité des peuplements de macroinvertébrés augmente ainsi considérablement en présence de végétation.

Les macrophytes jouent un rôle dans la reproduction de nombreuses espèces de macroinvertébrés et de poissons (sites de ponte, frayères, abris, matériaux de construction pour fourreaux larvaires ou cocons de nymphose).

Les peuplements macrophytiques littoraux sont également utilisés pour la reproduction et la nutrition des oiseaux aquatiques.

La dégradation ou la disparition de ces biotopes peut entraîner de profondes perturbations des équilibres biologiques et être fatales à des espèces animales qui leur sont liées. Les peuplements macrophytiques sont indispensables à la reproduction de certaines espèces de poissons. C'est le cas notamment du brochet, dont les alevins passent les premiers jours après l'éclosion fixés sur des plantes aquatiques par des papilles adhésives. Ils ne se détachent qu'après résorbtion de leur vésicule vitelline. D'autres poissons des lacs dépendent de la zone littorale, comme la perche ou les cyprinidés (vengeron, rotengle, ablette, carpe, tanche, brême et loche).

Les macrophytes interviennent en effet soit directement par leur activité métabolique (échanges gazeux avec le milieu, piégeage/relargage de nutriments, production primaire, etc.), soit indirectement en servant de support, de source de nourriture, de lieu de reproduction ou de refuge pour de nombreux organismes aquatiques ou aériens. Les herbiers aquatiques peuvent constituer un frein à la dispersion de certaines substances anthropogènes comme le phosphore ou l'azote. Ils peuvent d'autre part accélérer la sédimentation de matières en suspension par la création de zones d'eau plus calmes. Les plantes aquatiques participent ainsi qux processus naturels d'atterrissement des milieux aquatiques.

Les communautés benthiques littorales sont beaucoup plus diversifiées que celles des zones plus profondes; ceci est dû en particulier au nombre élevé de microhabitats (végétation aquatique, nature du substrat, etc).

Suivant les conditions rencontrées, il est possible de décrire plusieurs écotopes, possédant chacun des caractéristiques particulières. Ce sont, par exemple, les grèves inondables et inondées, les murailles, les lagunes et roselières, les estuaires de rivières, les beines caillouteuses, sablonneuses et vaseuses, les herbiers à macrophytes ou le talus du mont.

Les invertébrés benthiques sont un maillon important dans letransfert d'énergie entre les producteurs primaires (phytoplancton, phyto benthos, macrophytes) et les prédateurs vertébrés comme les poissons et les oiseaux aquatiques. De nombreux groupes d'invertébrés (mollusques, crustacés, larves d'insectes) constituent la nourriture de base des poissons vivant dans la zone littorale ainsi que de certains oiseaux aquatiques.

Les invertébrés benthiques, et plus spécialement les insectes aquatiques peuvent causer des dommages importants, aux plantes palustres et aquatiques. Par exemple, les coléoptères chrysomelidés s'attaquent à *Phragmites, Typha, Potamogeton* et certaines larves de lépidoptères causent des ravages aux *Nymphaea, Nuphar, Potamogeton.*

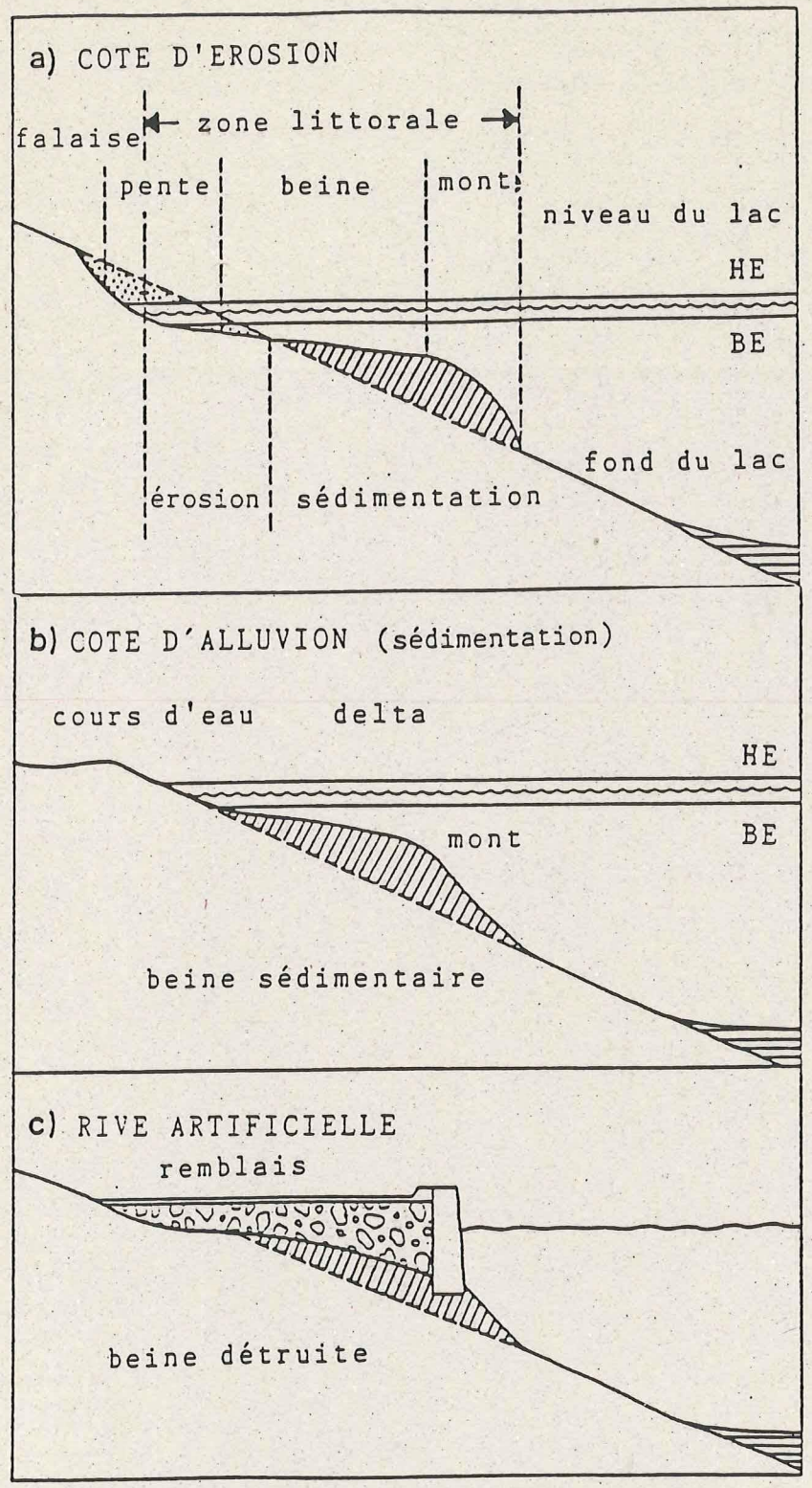
Comme dans tout écosystème, les différentes composantes biotiques et abiotiques de la zone littorale lacustre sont interdépendantes et leurs relations sont complexes.

2.3. EVOLUTION

Au cours du temps, les rives subissent des modifications plus ou moins grandes selon l'origine et la forme de la cuvette lacustre, la nature du substrat et l'exposition aux vents dominants. On distingue ainsi schématiquement des rives d'érosion et des rives d'alluvions (Figure 2).

Les rives lacustres en pente douce sont le siège de phénomènes d'atterrissement. Ces processus naturels plus ou moins lents sont le résultat de l'action conjuguée des phénomènes d'érosion/sédimentation et de la succession végétale. Ces phénomènes ne se réalisent toutefois pas dans les sites exposés à l'érosion, les rives abruptes ou rocheuses. La vitesse de l'atterrissement dépend du taux de sédimentation et de la production primaire, liée au degré d'eutrophisation des eaux. Cette évolution naturelle peut toutefois être fortement perturbée par les activités humaines. (aménagement des rives). Certains lacs du Plateau ont actuellement plus de 80 % de leur rives dans un état plus ou moins artificiel, et des surfaces importantes de zone littorale ont été remblayées.

FIGURE 2 : FORMATION DES RIVES LACUSTRES (D'APRRÈS STADELMANN, 1984, IN LACHAVANNE & AL. 1985)



3. LA BEINE LITTORALE DE LA RIVE SUD DU LAC DE NEUCHÂTEL

Ce chapitre tente de faire la synthèse des connaissances actuelles relatives aux différentes composantes biotiques et abiotiques de la beine littorale de la rive sud du lac de Neuchâtel.

Pour chacune de ces composantes, la valeur écologique actuelle est décrite et discutée par rapport à l'ensemble du lac et par rapport aux autres principaux lacs du Plateau suisse.

3.1. GEOMORPHOLOGIE

Les principales caractéristiques limnologiques du lac de Neuchâtel sont présentées dans le tableau 2, avec les valeurs correspondantes pour quelques autres lacs du Plateau suisse.

3.1.1. BASSIN VERSANT

Avec 2672 km^2 (Sollberger, 1974), le bassin versant du lac de Neuchâtel est parmi les plus importants des lacs suisses. Il se classe en effet derrière le Léman (7400 km^2), mais devant les lacs de Thoune (2490 km^2), des Quatre Cantons (2135 km^2) et de Zurich (1740 km^2).

La rive sud du lac est en revanche caractérisée par un bassin versant relativement restreint, essentiellement constitué d'une bande de terres agricoles et de forêts de 4 km de large en moyenne. En dehors de la Menthue dont le bassin versant est de 1433 km^2, celui-ci ne possède pas d'affluents importants, et seulement deux localités de quelque envergure, Estavayer et, dans une moindre mesure, Yverdon (Sollberger op. cit.).

La compréhension des relations entre le bassin versant et la zone littorale et la gestion des flux de nutriments et de polluants, devrait être facilitée par la taille réduite du bassin versant. Les foyers diffus (pollutions d'origine agricole), difficiles à appréhender, pourraient représenter une part importante des apports à l'écosystème littoral en raison de l'importance des activités agricoles.

3.1.2. GEOLOGIE ET SEDIMENTS

Les informations existantes sur la nature du substrat du lac de Neuchâtel sont rares et difficilement comparables, que ce soit au niveau du lac ou au niveau suisse.

Selon Sollberger (op. cit.), la nature géologique et l'origine du lac sont complexes et difficiles à décrire.

Selon Pedroli (1981), la beine littorale du lac de Neuchâtel est constituée pour 87 % de sables et de limons, et pour 13 % de galets et graviers. La proportion de sables et de limons est probablement encore plus élevée pour la rive sud prise isolément.

Bien que les proportions précises ne soient pas connues pour les autres lacs, les observations réalisées lors de différentes campagnes de terrain sur les principaux autres lacs du Plateau semblent indiquer que **la proportion de sables et limons de la zone littorale de la rive sud du lac de Neuchâtel est particulièrement importante.**

D'un point de vue quantitatif, la surface de beine sableuse de la rive sud est probablement unique en Suisse.

TABLEAU 2 : PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES LIMNOLOGIQUES DU LAC DE NEUCHÂTEL ET DE QUELQUES AUTRES LACS DU PLATEAU SUISSE

Lac	Neuchâtel	Rive sud	4 Cantons	ZH-Usee	Greifensee	Pfäffikersee	Sempach	Hallwil	Thoune	Brienz
Année étude	1979	1979	1982(-83)	1987-88	1987	1987	1987	1987	1984	1984
Bassin restreint	Orbe / Thielle	Menthue	Reuss	Limmat	Glatt	Glatt	Suhre	Aabach	Aar	Aar
Bassin étendu	Aar	-	Aar (->Rhin)	Aar (->Rhin)	Rhin	Rhin	Aar (->Rhin)	Aar (->Rhin)	Rhin	Rhin
Altitude (m)	429	429	434	406	435	537	504	449	558	564
Longueur rives (km)	95,0	42,0	169,0	97,6	17,3	8,6	20,4	19,2	61,0	37,1
Rives naturelles (%)	?	env. 65 %	22	17	76	80	33	37	19	32
Surface du lac (km2)	217,9	-	115,2	67,5	8,6	3,3	14,5	10,3	48,4	29,8
Surface de la zone littorale (km2)	61,49	37,9	12,44	23,22	4,82	1,47	1,5	2,48	4,63	2,17
Surface littorale/Surface du lac (%)	28,2	17,4	10,8	34,4	56,04	44,5	10,3	24,07	9,56	7,28
Surface colonisée (km2)	19,30	14,60	1,41	1,42	0,17	0,08	0,20	0,31	1,56	0,13
Surface colonisée/Surface littorale (%)	31,40	38,50	11,33	6,12	3,53	5,44	13,33	12,50	33,69	5,99
Profondeur maximale (m)	153	-	214	143	34	35	87	47	217	261
Temps de renouvellement des eaux (j)	3000	-	1241	401	409	730	6205	1423	694	973
Amplitude annuelle variations niveaux (cm)	84	-	67,6	43	54	66	49	49	65	116

La rive sud est naturellement exposée à l'érosion de par sa situation (Dufour & Robin, 1982). L'origine de la beine actuelle est consécutive à l'érosion des falaises molassiques dans les conditions antérieures à la première correction des eaux du Jura.

D'un point de vue géologique, la rive sud est caractérisée par un substratum molassique (grès et marnes bigarrés) recouvert de moraine würmienne avec blocs erratiques (Zurwerra, 1989).

Dans certains secteurs, la moraine est elle-même recouverte d'une épaisse couche (Estavayer-Chevroux : jusqu'à 7 m) de sédiments sableux fluvio-lacustres bien triés formant localement des dunes sous lacustres. (Zurwerra, op. cit.), alors que dans d'autres, comme entre Autavaux et Forel, la molasse est sub-affleurante à la plage de galets.

A la hauteur d'Yvonand, la beine présente une des trois plus importantes zones de galets du lac (avec Vaumarcus et le Bas-Lac) (Pedroli, 1981).

Les informations fragmentaires disponibles parlent en faveur d'une hétérogénéité du substrat de la zone littorale, constitué principalement de dépôts de sables alluvionnaires, mais aussi de zones de galets et d'affleurements de molasse. Cette hétérogénéité est aussi confirmée localement par l'interprétation des photographies aériennes, qui montrent des textures d'image différentes pour la beine lacustre.

3.1.3. EROSION

Comme le montrent les publications de Ritter (1882, 1889, 1909), les phénomènes d'érosion et de modification de la rive actuels ont débuté avec les nouvelles conditions hydriques créées par la première correction des eaux du Jura.

Chaque lac présente des phénomènes d'érosion qui lui sont spécifiques et doit donc être considéré comme un cas particulier. Il n'est pas possible d'extrapoler simplement les données d'un lac à l'autre (VAW, 1990).

Plusieurs sources d'informations concernent les phénomènes d'érosion sur la rive sud.

La principale est constituée par le rapport du Laboratoire de recherches hydrauliques de l'EPFZ (VAW, 1990). Cette étude a, entre autre mis en évidence les faits suivants :

- Les mouvements de sédiments sont principalement causés par les courants de retour perpendiculaires ou longitudinaux, qui entraînent les matériaux en suspension vers les zones calmes en profondeur.

- En raison de l'orientation de la rive sud, le transport de matériaux se fait essentiellement dans le sens longitudinal, (courant de déferlement) sous l'effet de la bise.

- Après la première correction des eaux, l'évolution a probablement débuté par une phase de tassement de la rive exondée, suivi d'un abaissement de la zone peu profonde par transport de matériel sableux, qui a permis l'augmentation de la force de déferlement des vagues sur la rive.

- Le sable prélevé en eaux peu profondes est continuellement remplacé par l'apport de l'érosion du front de rive.

- Les observations récentes montrent que la rive sud n'a toujours pas atteint son point d'équilibre et que les phénomènes d'érosion se poursuivent, en tous cas localement. L'évolution naturelle aboutirait à une restauration de la rive originelle au pied des falaises.

- Des ouvrages de protection de la rive ne sont pas satisfaisants dans la mesure où ils n'empêchent pas l'érosion de la beine peu profonde par transport de sable vers le large, et donc l'abaissement à terme de la beine littorale (VAW, 1990).

Trois autres publications récentes traitent de problèmes locaux d'érosion sur la beine de la rive sud :

- Le "suivi de l'incidence des dragages et des travaux d'assainissement sur les réserves du Bas-Lac" a fait l'objet d'un rapport concernant les années 1983 et 1984 (Schwab 1984) et d'un projet d'étude du bureau Bio-Conseils S.A (1988). Aucune information utile à la gestion de la beine lacustre ne peut toutefois être extraite de ces documents.

- La "reconstitution de nouveaux bancs de sable à l'extrémité sud du lac de Neuchâtel" a fait l'objet d'une étude et d'un rapport de la part du bureau Econat (1984). Il ressort de ce travail que la formation de nouveaux bancs de sable ne peut être obtenue que par des barrages compacts massifs, ou éventuellement par des barrages perméables ralentissant le flux des vagues.

- L'étude de la "Zone des Tuileries" (Aquarius, 1992) dont l'objet principal est l'analyse des conditons hydrobiologiques et piscicoles.

Enfin, l'existence de plusieurs séries de photographies aériennes dans le secteur de Font (FR) a permis une estimation grossière de l'évolution de la beine littorale par comparaison de prises de vue datant de juillet 1979 et août 1992. L'absence de géoréférences dans le domaine aquatique pour le redressement des images, ainsi que le caractère local de la comparaison (≈ 750 m de longueur) implique toutefois une interprétation très prudente de ces estimations.

En ce qui concerne la morphologie de la beine, la comparaison semble indiquer une avance du mont vers le large de plusieurs mètres, ce qui confirmerait les conclusions du VAW (1990) concernant le dépôt des sédiments vers le large.

En revanche, la structure de la beine, notamment les zones de substrat compact (affleurements molassiques ou galets) semble relativement stable.

La présence de grandes dunes sous-lacustres orientées est-ouest persiste également.

3.1.4. BATHYMETRIE

Une étude récente, effectuée par le bureau P. Martin (à paraître) fournit des données précises sur la bathymétrie de la beine littorale de la rive sud du lac de Neuchâtel.

3.1.5. MORPHOLOGIE

Selon le rapport du bureau Zurwerra (1989), la beine du secteur Estavayer - Chevroux comprend 2 paliers: d'abord une zone d'environ 1 km de large, jusqu'à 2 m de profondeur, avec un bref talus de 30-40 % de pente, puis un second palier d'environ 300 m de large, descendant jusqu'à 8-10 m et se terminant par le mont.

Selon Dufour et Robin (1982), deux types de beine sont observés sur la rive sud en fonction de l'exposition aux vents dominants :

1) sur les sites exposés (p. ex. Cheyres et Champittet), les premières dizaines de mètres forment une **beine d'érosion** avec les anciens sédiments carbonatés, directement en contact avec des vases riches en matières organiques, suivie par une **beine d'alluvions** avec dépôts de sable s'épaississant jusqu'au mont. La pente moyenne est faible, de l'ordre de 1.5 %.

2) D'autres régions toutefois, comme la baie d'Yvonand, ne comprennent pas de beine d'érosion, mais seulement une baie d'alluvions sableuses jusqu'à la rive, (à l'exception d'une zone de cailloux molassiques à env. 1000 m. de la rive).

Les observations publiées semblent indiquer que la beine ne présente pas une pente uniforme, et que les ruptures de pente et la nature des sédiments sont de bons indicateurs pour la description des phénomènes d'érosion/alluvionnement.

Des informations plus précises seront prochainement disponibles dans le rapport du bureau P. Martin (à paraître) effectué à la demande des cantons de Vaud et Fribourg.

3.1.6. SURFACES

Troisième lac de Suisse par l'étendue de son plan d'eau, le lac de Neuchâtel est le plus grand lac entièrement suisse.

Selon des mesures effectuées à l'aide d'un planimètre électronique sur les cartes nationales au 1: 25'000 (Tabl. 3), la surface de la zone littorale entre 0 et 19 m de profondeur (isobathe 410 msm) représente 61.49 km^2 pour l'ensemble du lac, et 37.9 km^2, soit 61.6 %, pour la rive sud, considérée entre Yverdon et le canal de la Thielle.

La surface de la zone littorale du lac de Neuchâtel est donc également la plus importante des principaux lacs suisses, avec toutefois une réserve pour le lac de Constance, dont la valeur n'est pas connue pour ce paramètre.

Avec 37.9 km^2, la rive sud présente à elle seule une beine littorale plus importante que celle des lacs de Zurich (34.7 km^2), des Quatre cantons (12.4 km^2) ou de Thoune (4.6 km^2).

La largeur de la beine littorale atteint également des valeurs exceptionnelles pour les lacs suisses avec 1.5 km de large sur la rive sud et même 4 km dans le Bas-Lac.

TABLEAU 3 : SURFACES DE ZONE LITTORALE DU LAC DE NEUCHÂTEL

Secteur	0 -9m (km^2)	9 - 19m (km^2)	0 - 19m (km^2)
Grandson - Yverdon	2.12	0.75	2.87
Yverdon - Canal de la Thielle	33.84	4.06	37.90
Canal de la Thielle - Neuchâtel	7.61	3.05	10.66
Neuchâtel - Grandson	7.82	2.24	10.06
Total :	**51.39**	**10.10**	**61.49**

Quatre vingt neuf pourcents de la surface de la zone littorale de la rive sud s'étend à des profondeurs inférieures à 9 m. Les 11 % restants représentent la zone comprise entre 9 et 19 m. de profondeur.

3.1.7. AMENAGEMENT DES RIVES

Selon le rapport "Rives des lacs" (OFJP 1975), la proportion de rives fortement aménagées ou artificielles du lac de Neuchâtel est de 32 %, alors que celle des autres principaux lacs du Plateau suisse dépasse les 75 %, comme le Léman (78 %), le lac de Zurich (77 %) ou celui de Thoune (76 %). La rive sud du lac explique en grande partie la proportion élevée de rives naturelles du lac de Neuchâtel.

La forte proportion de rives naturelles constitue à elle seule une raison suffisante pour qualifier la rive sud du lac de Neuchâtel de zone littorale de valeur exceptionnelle pour la Suisse.

3.2. PHYSICO-CHIMIE

3.2.1 LE LAC DE NEUCHÂTEL

La circulation hivernale des eaux du lac de Neuchâtel est régulièrement complète (lac holomictique).

Sollberger (1974) donne une liste des travaux limnologiques effectués sur le lac de Neuchâtel avant 1957. Ces études concernent la limnimétrie, la thermique, la chimie de l'eau et le plancton, mais aucune ne concerne directement la rive sud, ni même la zone littorale.

Les seules informations récentes proviennent des campagnes de surveillance des eaux de surface effectuées par le Service de la protection de l'environnement du Canton de Neuchâtel. Les mesures et prélèvements d'eau sont effectués au droit du point le plus profond du lac, soit entre Forel et Bevaix, mais à quelque 4 km au large de la rive sud et ne peuvent donc être considérées comme représentatives des conditions de la zone littorale.

Selon le rapport de gestion 1991 du Département des travaux publics du canton de Neuchâtel (Figure 3), le lac est "**en reconquête de sa santé d'antan**" : augmentation du stock d'oxygène, transparence toujours supérieure à 4 m, baisse spectaculaire de 99 tonnes du stock en phosphore total, conformité avec objectifs de la législation fédérale. Des problèmes subsistent toutefois pour les nitrates (+ 7 % en 1990) et dans une moindre mesure pour les chlorures (+ 2 %).

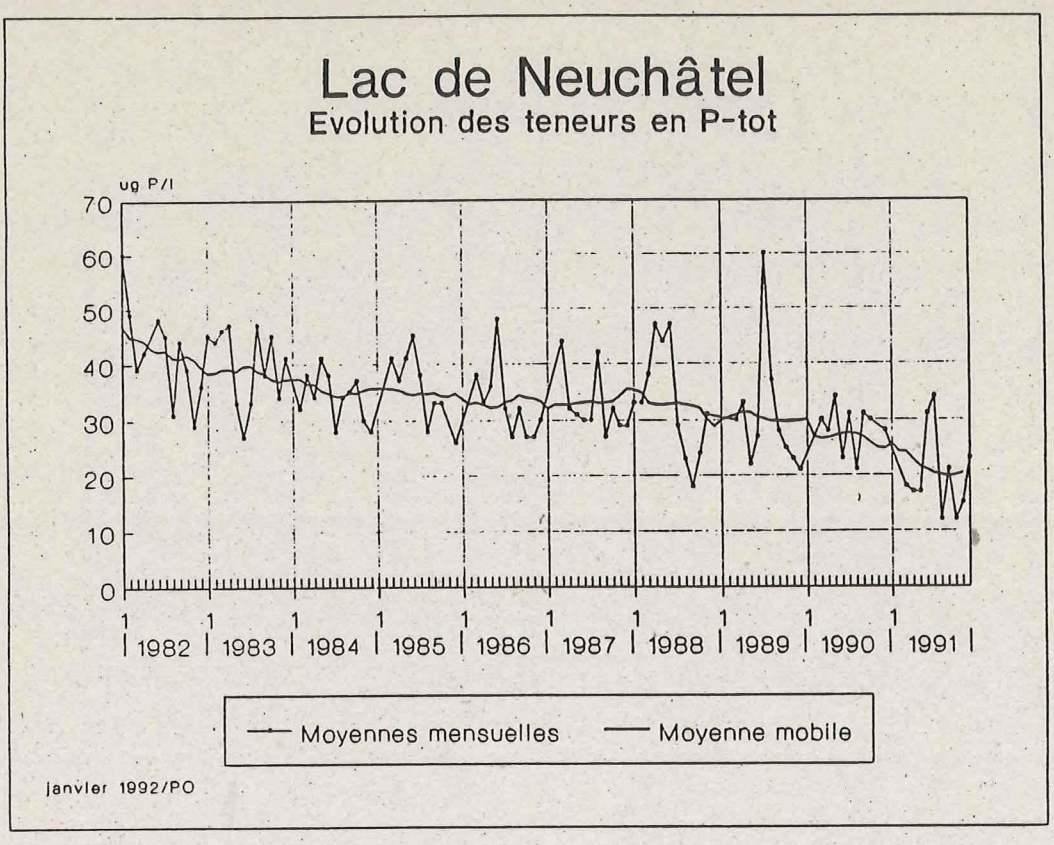


FIGURE 3 : EVOLUTION DES TENEURS DU LAC DE NEUCHÂTEL EN PHOSPHORE TOTAL ENTRE 1982 ET 1991 (SERVICE NEUCHÂTELOIS DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT)

Avec une amplitude moyenne des variations de niveau de 84 cm, **le lac de Neuchâtel est l'un des lacs régulés les moins stables, puisque seuls les lacs de Brienz et Majeur présentent une valeur supérieure pour ce critère.**

Malgré sa taille, le lac peut subir des crues rapides et importantes. La cause de ces fluctuations est à rechercher dans l'importance de son bassin versant. Ainsi, lors de la crue de mi-févier 1990, le niveau du lac est monté de 84 cm en trois jours; en décembre 1991, la hausse a été de 44 cm en sept jours (VAW 1990).

Bien que le niveau soit réglé artificiellement, les fluctuations suivent globalement une évolution comparable aux variations du régime hydrologique naturel (Journal des Grèves N° 26, déc. 1992).

3.2.2 LA ZONE LITTORALE

Dans son étude du lac de Neuchâtel, Sollberger (1974) a effectué certaines mesures et prélèvements dans la zone littorale de la rive sud. Certaines informations peuvent ainsi être extrapolées pour décrire la beine de cette partie du lac.

Ainsi, l'amplitude des variations de température de l'eau superficielle est plus grande dans la zone littorale que dans la zone limnétique : par rapport à celle du large, l'eau littorale est plus froide en hiver et plus chaude en été.

L'analyse de la répartition de la transparence de l'eau (39 mesures réparties sur l'ensemble du lac, y compris la zone littorale) lors de sept campagnes de mesures entre avril et octobre 1961 a montré que :

- Dans 4 situations sur 7, la zone littorale présente des caractéristiques différentes de la zone pélagique (1 x mieux, 3 x pire).

- la rive sud n'est pas uniforme : un gradient de transparence peut être mis en évidence dans 5 situations sur 7; il montre une amélioration globale de la transparence entre le canal de la Broye et Yvonand dans 4 cas et un gradient inverse dans 1 cas.

- la région d'Estavayer a une transparence plus faible dans 4 cas sur 7.

Ces différences sont probablement à mettre en relation avec des épisodes de vent. Toutefois, l'absence d'indications sur les vents lors de ces campagnes ne permet pas de démontrer une telle corrélation.

Selon des mesures effectuées au large de Portalban, en dehors de la zone littorale, les vitesses des courants sont généralement plus élevées entre 3 et 6 m de fond qu'en surface (Sollberger, 1974).

La présence de sept stations d'épuration (Yverdon, Cheseaux-Noréaz, Yvonand, Estavayer, Chevroux, Delley et Cudrefin) déversant leurs effluents sur la rive sud du lac, ainsi que la charge en phosphore provenant des affluents (75 %, dont 25 % par le seul canal de la Broye) (OFPE 1987), montrent que la zone littorale peut localement présenter des conditions trophiques différentes de celles exprimées par les analyses d'eau pélagique.

Ces résultats fragmentaires confirment toutefois le caractère particulier de la zone littorale des grands lacs profonds et l'impossibilité de décrire directement la qualité des eaux littorales par les données récoltées au centre du lac.

A notre connaissance, il n'existe pas de données physico-chimiques récentes relatives à la zone littorale du lac de Neuchâtel.

3.3. VEGETATION

3.3.1. PHYTOPLANCTON

Les connaissances sur le plancton de la zone littorale sont généralement peu nombreuses en raison des relations complexes de ces peuplements avec la zone limnétique.

Aucun travail concernant le phytoplancton du lac de Neuchâtel n'a pu être répertorié. Des informations fragmentaires existent probablement dans des publications à caractère plus général. La thèse de Maurer (1992) contient par exemple des données sur la production primaire et la biomasse algale.

3.3.2. ALGUES FILAMENTEUSES

Malgré leur importance dans l'écosystème littoral lacustre, les algues filamenteuses ou unicellulaires ne font l'objet que de trop rares travaux en Suisse. Cette situation est essentiellement liée aux difficultés d'étude, en particulier taxonomiques, de ce type de végétaux.

En ce qui concerne le lac de Neuchâtel, et plus particulièrement sa rive sud, aucune publication sur les algues microphytiques n'a pu être répertoriée.

3.3.3. MACROPHYTES

Le seul recensement exhaustif de la végétation aquatique du lac de Neuchâtel date de 1979. Il a été effectué par l'Unité de biologie aquatique de l'Université de Genève dans le cadre de recherches écologiques et chorologiques sur les macrophytes des lacs suisses financées par le Fonds national de la recherche scientifique (Lachavanne & al., 1983, Lachavanne & al., 1986). Ces données, qualitatives et quantitatives, établies à l'aide d'une couverture photographique aérienne des rives et de relevés exhaustifs sur le terrain, n'ont toutefois pas fait l'objet de rapport ou publication particulière à ce jour. Les étangs côtiers et les zones marécageuses de la rive sud n'ont pas fait l'objet de prospection systématique à l'exception des étangs de Champitet et Châble Perron (Oihénart & al., 1988) et du suivi de la végétation aquatique des étangs de Font (1988-1992). Rapport intermédiaire 1990 (Oihénart, Ch. & Perfetta, J., 1991). Des informations existent également dans le rapport de C. Le Nédic concernant les effets de l'entretien sur la végétation (Rapport de synthèse des résultats de 1988 - 1992, à paraître).

TABLEAU 4 : LISTE FLORISTIQUE DU LAC DE NEUCHÂTEL (LACHAVANNE & AL. 1983) AVEC INDICATION DU DEGRÉ DE MENACE SELON LANDOLT (1991).

Légende : 1) pas de recherches en herbier 2) signalé par Roulier (1980) 3) signalé par Girardet (1926)
U : non menacé, A : attractif, V: menacé, E : très menacé, Ex : éteint.
a) Suisse; b) Ouest du Plateau

Espèces	liste rouge	observations anciennes	obs. récentes
Plantes émergentes			
Alisma lanceolatum With.	a) V/V b)	+	-
Alisma plantago-aquatica L.	U/U	+	+
Butomus umbellatus L.	V/V	+	+ 2)
Carex elata All.	U/U	+ 1) 3)	+ 2)
C. gracilis Curtis	U/U	+	+
C. lasiocarpa Ehrh.	U/V	-	+
C. pseudocyperus L.	V/E	+ 1)	+ 2)
C. vesicaria L.	U/U	+ 1)	+ 2)
Cicuta virosa L	E/E		
Cladium mariscus (L.) Pohl	U/U	+	+
Eleocharis acicularis (L.) Roem. & Schult.	V/V	+	+
E. palustris L.	U/U	+	+ 2)
Equisetum fluviatile L.	U/U	+	+ 2)
Hippuris vulgaris L.	U/V	+	+
Iris pseudacorus L.	U/A	+	+
Littorella uniflora (L.) Ascherson	E/E	+	-
Nasturtium officinale R. Br.	U/U	+ 3)	-
Phalaris arundinacea L.	U/U	+	+
Phragmites australis (Cav.) Trin.	U/U	+	+
Ranunculus lingua L.	V/V	+	+ 2)
Sagittaria sagittifolia L.	E/E	+	+ 2)
Scirpus americanus L.	E/E	+	-
S. lacustris L.	U/U	+	+
S. lacustris ssp. *tabernaemontani* (Gmel.) Syme	V/V	+	+
S. maritimus L.	E/E	+	-
Sparganium emersum Rehm.	V/E	+	+
S. erectum ssp. *erectum* L.	U/U	+	+ 2)
S. erectum ssp. *microcarpum* (Neumann) Domin.	E/Ex	-	+
S. erectum ssp. *neglectum* L. (Beeby) Schinz & Thell.	E/Ex	+	+
Typha angustifolia L.	U/U	+	+
T. latifolia L.	U/U	+	+
Veronica beccabunga L.	U/U		+
Plantes flottantes libres			
Lemna gibba L.	Ex/Ex	+ 3)	-
L. minor L.	U/U	+ 3)	+
L. trisulca L.	V/V	+	+
Riccia fluitans L.	-/-	- 1)	+
Spirodela polyrrhiza (L.) Schleiden	V/V	+ 3)	+
Plantes enracinées à f. flottantes			
Callitriche sp.	-/-	+	+
Hydrocharis morsus-ranae L.	E/E	+	-
Nuphar lutea (L.) Sibth.	A/A	+	+
Nymphaea alba L.	A/A	+	+
Polygonum amphibium L.	U/V	+	+
Potamogeton coloratus Vahl	E/E	+	+

P. natans L.	U/U	+ 3)	+
Ranunculus aquatilis L.	E/Ex	+	-
Sparganium minimum Wallr.	V/E	-	+ 2)
Plantes ordinairement submergées			
Charophytes			
Chara aspera Willd.	-/-	+ 3)	+
Ch. ad *contraria* Kützing	-/-	- 1)	+
Ch. hispida L.	-/-	- 1)	+
Ch. tomentosa L.	-/-	+ 3)	-
Ch. vulgaris L.	-/-	- 1)	+
Nitella syncarpa (Thuill.) Chev.	-/-	+ 3)	-
Bryophytes			
Drepanocladus aduncus (Hedw.) Warnst.	-/-	- 1)	+
Fontinalis antipyretica L.	-/-	+ 3)	+
Platyhypnidium viparioïdes (Hedw.) Dix.	-/-	- 1)	+
Spermatophytes			
Ceratophyllum demersum L.	U/U	+	+
Elodea canadensis Michx.	U/U	+	+
Groenlandia densa (L.) Fourr.	U/U	+	-
Hottonia palustris L.	V/V	+	+
Myriophyllum spicatum L.	U/V	+	+
M. verticillatum L.	U/V	+	+
Najas marina L.	V/Ex	+	+
N. marina ssp. *intermedia* (Wolfg.) Casper	E/-	+	-
Potamogeton crispus L.	U/U	+	+
P. filiformis Pers.	U/E	+	+
P. gramineus L.	V/V	+	+
P. lucens L.	U/U	+	+
P. pectinatus L.	U/U	+	+
P. perfoliatus L.	U/U	+	+
P. gr. *pusillus* L.	U/V	+	+
P. x *decipiens* Nolte	-/-	-	+
P. x *nitens* Weber	V/E	+	+
Ranunculus circinatus Sibth.	V/V	+	+
R. fluitans L.	U/U	+	-
R. trichophyllus Chaix	U/U	+	-
Utricularia australis R. Br.	U/V	+	-
U. intermedia Haynes	E/E	-	+
U. minor L.	U/V	-	+
U. ochroleuca Hartm.	E/-	-	+
U. vulgaris L	V/V	+	+
Zannichellia palustris L.	V/V	+	+

D'autres informations existent dans des publications spécialisées (p. ex Berset, 1951, Hürlimannn, 1951), ainsi que dans les collections d'herbier des différents instituts botaniques de Suisse. Ces données sont toutefois très fragmentaires et souvent obsolètes. Elles permettent néanmoins une estimation grossière de l'évolution de la flore aquatique du lac.

Bien que les conditions, en particulier trophiques, aient probablement changé depuis 13 ans, les caractéristiques de la végétation macrophytique permettent de situer le lac de Neuchâtel, et plus particulièrement sa rive sud, par rapport aux autres grands lacs du Plateau suisse.

En 1979, la richesse floristique de la végétation du lac de Neuchâtel se présentait comme suit (Tableau 5 :

On remarque que parmi les 59 espèces recensées sur la rive sud, 30 sont absentes dans le reste du lac.

TABLEAU 5 RICHESSE FLORISTIQUE DU LAC DE NEUCHÂTEL EN 1979 (LACHAVANNE & AL., 1983)

Type de plantes	lac de Neuchâtel total des espèces	Rive sud total	Rive sud exclusivement
émergentes *:	27	26	15
flottantes libres	4	4	2
enracinées à f.flottantes	7	7	5
généralement submergées	21	19	6
characées	4	3	2
Total:	**63**	**59**	**30**

* = sans prospection systématique des marais côtiers

La comparaison avec les données des principaux autres lacs du Plateau suisse (Tableau 6) montre que **le lac de Neuchâtel présente la plus grande richesse spécifique globale parmi les lacs étudiés, avec 63 taxons.**

En ce qui concerne les plantes émergentes et flottantes, la richesse spécifique du lac de Neuchâtel est également supérieure à celle des autres lacs étudiés.

Seul le nombre d'espèces submergées (25) est plus important dans les lacs de Thoune et de Zurich (29) et comparable à celui du Léman et du lac des 4 Cantons (26).

TABLEAU 6 : RICHESSE FLORISTIQUE DES PRINCIPAUX LACS SUISSES (LACHAVANNE & AL., 1986)

Lac	Espèces submergées	flottantes	émergentes	total
Neuchâtel (1979)	25	11	27	63
rive sud	21	11	26	59
Quatre cantons (1983)	26	8	22	56
Zurich (1988)	29	5	20	54
Thoune (1984)	29	4	10	43
Léman (1975)	26	4	8	38
Greifensee (1987)	14	5	17	36
Hallwil (1987)	9	4	14	27
Brienz (1984)	23	0	2	25
Sempach (1987)	8	3	7	18

Avec un total de 59 taxons, la flore de la rive sud est très riche. Sa richesse floristique est comparable à celle de l'ensemble du lac. On constate que, dans toutes les catégories, certaines espèces ne sont présentes que sur la rive sud.

C'est bien sûr particulièrement vrai pour la végétation émergente (15 taxons présents uniquement sur la rive sud !), mais également pour les macrophytes submergés (8 taxons) et les plantes à feuilles flottantes (7 espèces).

La rive sud présente la particularité rare de fournir un large éventail de biotopes aquatiques de bonne qualité, allant de la beine lacustre exposée à de petits milieux humides temporairement submergés. Cette diversité biotopique se traduit par une richesse floristique exceptionnelle comparée à celle des autres lacs suisses.

Considérée à l'échelle du lac, la surface colonisée toutes densités de peuplement confondues (Figure 4) est beaucoup plus importante sur la rive sud, mais le taux de colonisation (surface colonisée / surface colonisable) est également plus élevé que sur la rive nord.

Une évaluation grossière de l'évolution récente de la végétation submergée a été tentée sur un secteur restreint de la beine, dans la région de Font. Trois séries de prises de vue orthogonales sont en effet disponibles pour cette région: 1979 et 1987 (photographies couleur) et 1992 (noir/blanc).

Des modifications liées à la fois l'oligotrophisation des eaux et à l'érosion de la rive semblent pouvoir être mises en évidence par la photo-interprétation :

- entre 1979 et 1987, l'emplacement, l'étendue et la forme des zones de végétation submergée ont changé. Le long de la rive, une bande de 100 à 200 m de large, qui était colonisée par *Potamogeton pectinatus* en 1979 semble dépourvue de végétation en 1987.

- entre 1987 et 1992, la moitié de la beine la plus proche de la rive semble être a nouveau colonisée par des zones de végétation submergée, alors que la moitié extérieure voit les peuplements macrophytiques diminuer encore, aussi bien en étendue qu'en densité. Bien que la photo-interprétation ne permette pas une description qualitative des peuplements végétaux, la texture de ceux-ci sur les clichés semble également indiquer des changements dans la composition spécifique.

La comparaison de la liste floristique de 1979 avec les données plus anciennes (échantillons d'herbier ou publications) doit être interprétée avec prudence, étant donné le caractère fragmentaire des informations anciennes (Tableau 7).

TABLEAU 7 : EVOLUTION DE LA RICHESSE FLORISTIQUE DU LAC DE NEUCHÂTEL (LACHAVANNE & AL., 1983)

	nombre total de taxons	observations 1979	observations anciennes	taxons non retrouvés	taxons nouveaux
plantes émergentes	32	26	28	5	2
flottantes libres	5	4	4	1	1
enracinées à f. flottantes	9	7	8	2	1
ord. submergées	35	28	26	7	9
Charophytes	*6*	*4*	*3*	*2*	*3*
Bryophytes	*3*	*3*	*1*	*0*	*2*
Spermatophytes	*26*	*21*	*22*	*5*	*4*
TOTAL	**81**	**65**	**66**	**15**	**13**

La comparaison des données disponibles montre que, sur un total de 32 espèces émergentes, 5 espèces n'ont pas été retrouvées en 1979, mais 2 espèces étaient nouvelles pour le lac. Pour la catégorie des plantes submergées (bryophytes et characées non comprises), 5 espèces n'ont pas été retrouvées et 4 étaient nouvelles sur un total de 26 taxons.

Si on prend en considération la variation spécifique[2], la comparaison des valeurs obtenues pour le lac de Neuchâtel avec celles de quelques autres lacs suisses montre que sa flore a relativement peu évolué (Tableau 8), notamment par rapport à des lacs qui ont subi une eutrophisation accélérée, comme les lacs de Pfäffikon ou de Hallwil.

---

[2] rapport du total des espèces nouvelles et non retrouvées sur le total général des espèces répertoriées (en %)

La flore aquatique du lac de Neuchâtel présente des caractéristiques uniques pour le Plateau suisse. Cette richesse exceptionnelle est liée à la diversité des biotopes d'une part, aux conditions trophiques favorables d'autre part.

TABLEAU 8: VARIATION SPÉCIFIQUE (%) DE LA FLORE DE 4 LACS DU PLATEAU SUISSE(LACHAVANNE & AL., 1986)

lac / Plantes	Neuchâtel	4 Cantons	Hallwil	Pfäffikon
émergentes	24	31	53	71
submergées	37	12	61	93

Si le risque d'eutrophisation accélérée ne semble plus à craindre dans un proche avenir, le maintien de la diversité des biotopes littoraux constitue en revanche une priorité pour la conservation de la richesse macrophytique.

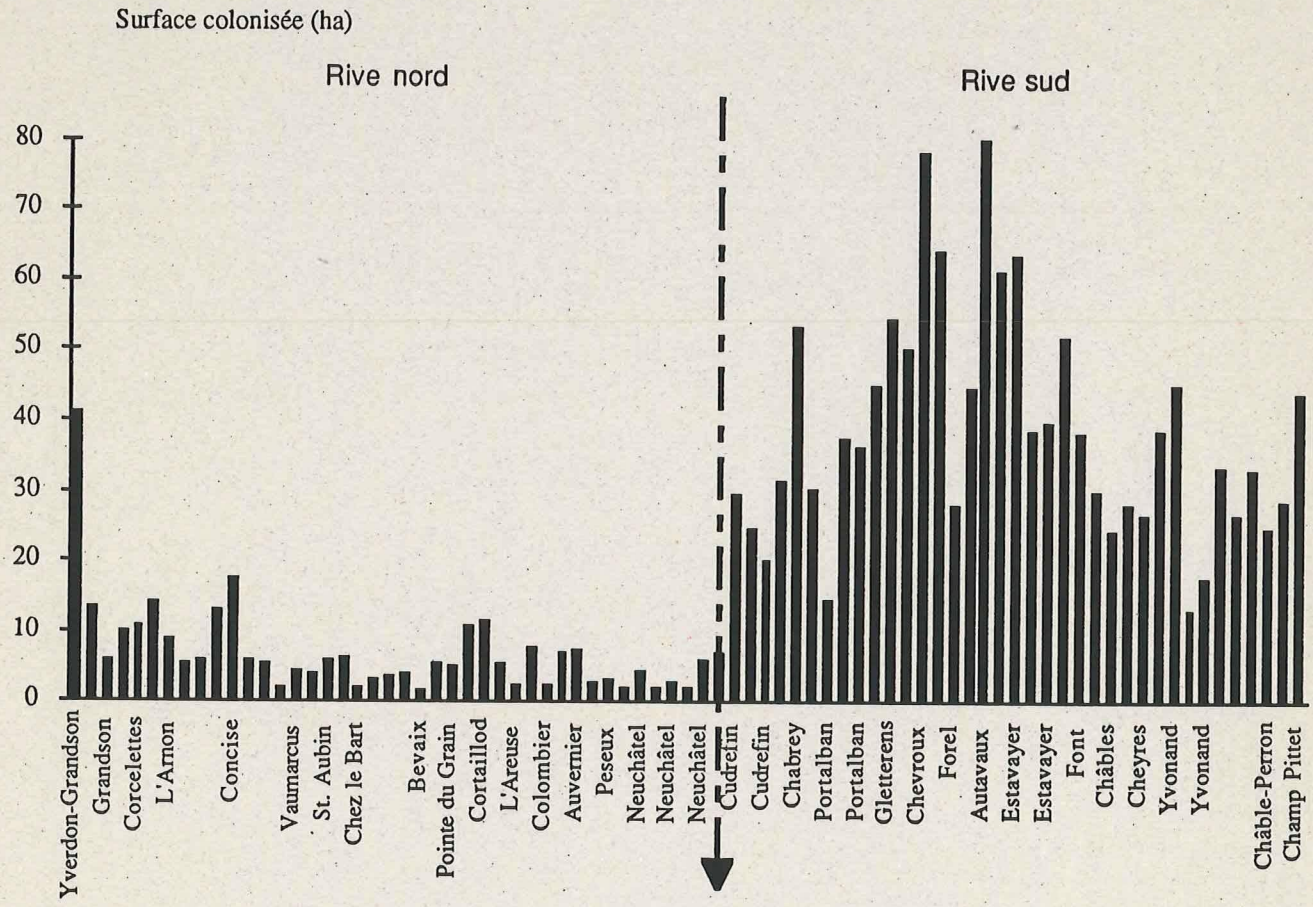


FIGURE 4: RÉPARTITION DE LA SURFACE COLONISÉE PAR UNITÉ CARTOGRAPHIQUE (600 À 800 M. DE RIVE). D'APRÈS LACHAVANNE & AL., 1983.

3.4. FAUNE

ZOOPLANCTON

Comme pour le phytoplancton, le zooplancton de la zone littorale lacustre ne fait l'objet que de trop rares études en Suisse. Aucun travail de ce type concernant le lac de Neuchâtel n'a pu être répertorié. Seule la thèse de Maurer (1992) traite, entre autres, de crustacés pélagiques.

INVERTEBRES BENTHIQUES

Excepté les travaux de Mauvais (1926) sur la faune littorale du lac de Neuchâtel, aucune étude globale n'existe sur les invertébrés benthiques de la beine lacustre. Seules quelques études sectorielles ont été effectuées ces dernières années. Ainsi Haenni (1975) a étudié les insectes liés à la nupharaie et Pedroli (1981) a mené une recherche sur les relations entre la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*) et diverses espèces d'oiseaux aquatiques. De plus, des recensements existent pour les coléoptères dytiscidés (Brancucci, 1976) et les odonates (Mülhauser, 1990). Ces derniers travaux concernent toutefois essentiellement les milieux humides et petits plans d'eau annexes de la rive sud.

POISSONS

Selon l'Atlas de distribution des poissons et cyclostomes de Suisse (Pedroli & al. 1991), le lac de Neuchâtel n'héberge pas moins de 30 espèces de poissons, soit plus de la moitié de la faune ichtyologique suisse, qui comprend actuellement 58 taxons.

Parmi ces 30 espèces (Tableau 9), 9 sont considérées comme potentiellement menacées, 5 comme menacées et 2 comme fortement menacées en Suisse (Kirchofer & al. 1990).

Il est frappant de constater que, **bien que le lac de Neuchâtel abrite plusieurs espèces rares ou menacées, les études sur la biologie et l'écologie de la faune piscicole du lac sont pratiquement inexistantes.** En effet, sur les 285 références bibliographiques relatives à la faune piscicole suisse publiées entre 1960 et 1990 (Pedroli & al., 1991), seuls huit travaux concernent le lac de Neuchâtel. Parmi ceux-ci, trois concernent des problèmes de pêche, deux autres la reproduction de l'omble chevalier, une étude est consacrée à la systématique des brèmes et finalement un travail aborde la dynamique des populations et la biologie du gardon.

Sur la rive sud, la présence d'étangs côtiers en relation avec le lac offre des sites de frai ou de grossissement fonctionnels pour plusieurs espèces de poissons lacustres, dont certaines sont considérées comme rares ou menacées en Suisse. Il n'existe toutefois que des informations très fragmentaires sur la distribution et la taille des populations des différentes espèces. Les lacunes sont particulièrement importantes pour les espèces sans valeur commerciale.

Selon l'étude du bureau Zurwerra (1989), la morphologie de la beine lacustre joue un rôle dans la distribution de la faune piscicole. Ainsi, le premier palier de la beine littorale est important pour certains poissons comme le brochet ou la bouvière, alors que le second, plus riche en moules zébrées, est favorable à la perche et aux corégones.

Une seule étude piscicole a été menée sur la rive sud (Dufour & Dufour-Fallot, 1988), avec comme objectif le suivi de la migration et du frai, en particulier du brochet, dans cinq étangs en liaison avec le lac. Cette étude a mis en évidence l'importance de l'entretien (creusement et maintien de chenaux de communication avec le lac) et l'effet des fluctuations de niveau du plan d'eau.

Pour ce qui est des espèces recherchées par les pêcheurs, les informations sont également lacunaires. Selon le bureau Zurwerra (1989), le secteur Estavayer - Chevroux est particulièrement important pour la pêche professionnelle. La valeur de la rive sud pour la pêche, qui reflète la distribution des peuplements piscicoles, ne semble donc pas uniforme.

L'extension de la beine littorale dans la rive sud est un élément favorable à la perche, qui se reproduit dans ce type de milieu (Pattay, 1978).

Quelques autres travaux en cours ou non publiés, notamment sur la perche et la truite, concernent partiellement la rive sud (C. Lang, Cons. faune VD, comm. pers).

TABLEAU 9: LISTE DES ESPÈCES DE POISSONS DU LAC DE NEUCHÂTEL (D'APRÈS KIRCHOFER & AL. 1990)

ESPECE	NOM LATIN	STATUT EN SUISSE
anguille	*Anguilla anguilla*	**potentiellement menacé**
omble chevalier	*Salvelinus alpinus*	menacé
truite lacustre	*Salmo trutta lacustris*	**fortement menacé**
truite arc en ciel	*Onchorhynchus mykiss*	introduit
corégone	*Coregonus* sp.	**potentiellement menacé**
ombre	*Thymallus thymallus*	menacé
brochet	*Esox lucius*	non menacé
carpe	*Cyprinus carpio*	**potentiellement menacé**
brème franche	*Abramis brama*	non menacé
ablette	*Alburnus alburnus*	**potentiellement menacé**
barbeau	*Barbus barbus*	**potentiellement menacé**
brème bordelière	*Blicca bjoerkna*	non menacé
nase	*Chondrostoma nasus*	menacé
goujon	*Gobio gobio*	**potentiellement menacé**
vandoise	*Leuciscus leuciscus*	non menacé
Able de stymphale	*Leucaspius delineatus*	menacé
chevaine	*Leuciscus cephalus*	non menacé
vairon	*Phoxinus phoxinus*	**potentiellement menacé**
bouvière	*Rhodeus sericeus amarus*	**fortement menacé**
gardon	*Rutilus rutilus*	non menacé
rotengle	*Scardinius erythrophtalmus*	non menacé
tanche	*Tincta tincta*	non menacé
loche de rivière	*Cobitis taenia*	menacé
loche franche	*Noemachelius barbatulus*	non menacé
silure	*Silurus glanis*	**potentiellement menacé**
lotte	*Lota lota*	non menacé
perche	*Perca fluviatilis*	non menacé
sandre	*Stizostedion lucioperca*	introduit
chabot	*Cottus gobio*	**potentiellement menacé**
perche soleil	*Lepomis gibbosus*	introduit

AVIFAUNE

Comme sur la plupart des lacs du Plateau, les populations d'oiseaux aquatiques font l'objet de comptages depuis de nombreuses années et les données sont centralisées à la Station ornithologique de Sempach.

L'évolution récente semble indiquer un regain d'intérêt des oiseaux d'eau pour le lac de Neuchâtel, en particulier de la part des anatidés hivernants. Cette évolution n'est toutefois expliquée que par d'hypothétiques variations des ressources alimentaires (moules zébrées, charophytes). En fait, il n'existe aucune donnée scientifique pour étayer ces hypothèses.

La rive sud comprend quatre objets d'importance internationale pour les oiseaux d'eau sur les 12 répertoriés en Suisse dans l'ordonnance OROEM du 21 janvier 1991 :

L'objet N° 4 comprend les zones du Fanel et du Chablais de Cudrefin. La partie lacustre a pour objectif d'offrir un lieu de repos et de nidification pour les oiseaux d'eau. La navigation et la pêche sont réglementés, la chasse est interdite.

L'objet N° 5 s'étend de Chevroux à Portalban. L'objectif de la réserve lacustre est la conservation de la zone de repos et d'alimentation pour les oiseaux migrateurs. La chasse et la navigation sont interdites, le cheminement est règlementé.

L'objet N° 6 s'étend entre Cheyres et Yvonand. L'objectif est d'offir aux oiseaux d'eau un site d'hivernage abrité du vent, plus généralement un lieu de repos et de nidification pour les oiseaux d'eau. La chasse est interdite, la pêche, la navigation et le cheminement sont règlementés.

L'objet Nº 7 est compris entre Grandson et Champittet. L'objectif est le maintien de la zone d'hivernage pour les oiseaux d'eau. La chasse est interdite, la pêche, la navigation et le cheminement sont réglementés.

Diverses études concernant l'avifaune du lac de Neuchâtel dans son ensemble, ou de la rive sud en particulier, ont été réalisées.

On citera les travaux de :

- Antoniazza (1979/1988) sur l'avifaune des marais
- Pedroli (1981) sur les relations entre la moule zébrée et les oiseaux aquatiques
- Marti & Schifferli (1987) sur les problèmes du dérangement des colonies d'oiseaux d'eau
- Zurwerra (1989) sur ce même problème
- Renévey (1989) sur le grèbe huppé
- Aebischer (1991) sur l'effet des variations du niveau de l'eau sur le succès de la reproduction des oiseaux dans les roselières.

Malgré les diverses études entreprises, des informations sur l'avifaune aquatique de la rive sud restent relativement lacunaires et devraient être complétées.

Ces travaux mettent toutefois en évidence l'importance de la beine lacustre pour de nombreuses espèces (essentiellement réserve de nourriture).

En ce qui concerne le problème du dérangement des colonies d'oiseaux aquatiques, les travaux réalisés permettent déjà de tirer quelques conclusions importantes.

A partir d'observations hivernales par avion, il a été possible de mettre en évidence que les aires de repos diurne des hivernants sont soit très au large, soit près de la rive, d'où l'importance de préserver les rives naturelles de tout dérangement.

- la navigation des chalands de transport de gravier ne semble pas provoquer de dérangement important
- la navigation de plaisance pose des problèmes en été, en raison de la concentration de bvateaux et de la fréquentation de la zone littorale
- bien que moins nombreux en hiver, les bateaux de pêcheurs ou de chasseurs provoquent un dérangement important en raison du grand nombre d'oiseaux d'eau hivernants
- les activités militaires constituent, avec la chasse, l'un des 2 importants facteurs de dérangement pour l'avifaune aquatique.

La modulation du niveau du lac induite par la régulation artificielle constitue l'un des problèmes essentiels pour la réussite de la reproduction de plusieurs espèces nichant sur le rivage. Cette problématique fait l'objet de recherches sur la rive sud du lac de Neuchâtel (Institut de zoologie de l'Université de Fribourg, en préparation).

A noter que les recensements réguliers et l'étude des dérangements effectuée depuis cette année par le GEG dans les zones OROEM devraient permettre d'apporter des informations complémentaires à ce sujet.

Par ses dimensions, son potentiel nutritif et la qualité de son rivage, la zone littorale de la rive sud est donc d'une importance exceptionnelle pour l'hivernage des oiseaux d'eau migrateurs, ainsi que pour plusieurs espèces nicheuses exigeantes quant à la taille de leur espace vital.

4. VALEUR ECOLOGIQUE DE LA BEINE LITTORALE ET PRINCIPAUX PROBLEMES

A partir des connaissances actuelles sur les différentes composantes biotiques et abiotiques, ce chapitre tente de préciser la valeur actuelle de la beine littorale de la rive sud du lac de Neuchâtel et, compte tenu de son évolution, de prévoir des mesures ou des interventions visant à maintenir ou à améliorer la situation actuelle.

4.1. VALEUR ACTUELLE

Globalement, la valeur actuelle de la rive sud du lac de Neuchâtel doit être considérée comme très élevée, en particulier en comparaison avec les rives des autres lacs du Plateau suisse.

Par sa taille, la proportion de fonds sableux et le fait d'être d'un seul tenant, la beine littorale de la rive sud présente des caractéristiques uniques en Suisse, notamment en tant que biotope pour plusieurs espèces exigeantes quant à la taille de leur espace vital.

Alors que toutes les études écologiques entreprises sur les autres lacs du Plateau suisse ont mis en évidence des effets néfastes, voire catastrophiques des activités humaines (destruction des rives naturelles, eutrophisation accélérée, banalisation des biocénoses, etc.), les données disponibles montrent que la rive sud du lac de Neuchâtel a globalement échappé à cette évolution.

Ce domaine lacustre est en effet remarquable par la proportion de rives naturelles et par la richesse de ses biocénoses, tant animales que végétales. Pour certaines espèces, on peut même penser que la rive sud constitue le dernier ou l'un des derniers refuges en Suisse.

Les efforts doivent donc tendre en priorité à maintenir les caractéristiques actuelles de l'écosystème et à restaurer les sites déjà dégradés.

4.2. EVOLUTION PREVISIBLE

La morphologie générale de la zone littorale devrait continuer à évoluer. Les spécialistes prévoient en effet la poursuite des phénomènes d'érosion /alluvionnement engendrés par la première correction des eaux du Jura. Observés principalement au niveau de la rive jusqu'à aujourd'hui, ces phénomènes se manifestent toutefois sur l'ensemble de la zone littorale.

Selon les études effectuées récemment (VAW 1990), l'érosion actuelle de la rive ne devrait ralentir que lorsqu'elle aura à nouveau atteint le pied des falaises molassiques qui formaient la rive avant l'abaissement du niveau du lac. Pour la beine lacustre (infralittoral et partie de l'eulittoral), l'évolution semble plus difficile à préciser. L'érosion des zones peu profondes devrait normalement conduire à des modifications de la bathymétrie.

Comme pour les zones humides riveraines, un choix doit donc être fait entre la poursuite de l'évolution des phénomènes d'érosion / sédimentation jusqu'à l'équilibre naturel, ou le blocage de cette évolution à un stade déterminé. Un tel blocage nécessite toutefois des interventions techniques lourdes et expérimentales.

Un deuxième domaine d'évolution concerne le niveau trophique des eaux. Déjà relativement épargné comparativement aux autres lacs suisses, le lac de Neuchâtel ne devrait pas voir d'évolution négative de la qualité de ces eaux au cours des prochaines années. Si la tendance actuelle se maintient, on devrait même retrouver des conditions oligotrophes dans un futur proche.

Enfin, un troisième domaine d'évolution concerne les aménagements de la zone littorale aux fins d'activités de loisirs. Liés à une demande toujours plus forte venant des milieux touristiques et économiques, ces développements potentiels constituent une sérieuse menace qu'il faudra maîtriser.

4.3. PROBLEMES ACTUELS OU PREVISIBLES

Le principal problème s'avère être lié à la poursuite des phénomènes d'érosion de la rive et de la beine littorale. A terme, cette évolution fera perdre à la rive sud l'une de ses caractéristiques les plus importantes, soit l'étendue de sa beine littorale, et en particulier les grandes surfaces de fonds sableux.

Il apparaît en effet que la majorité des autres problèmes soulevés concernant la beine littorale dépendent de l'évolution de ces phénomènes. Ainsi, le maintien sur la rive sud des espèces menacées au niveau régional ou national, en particulier de plusieurs espèces de poissons, est lié à la conservation des biotopes favorables.

De même, la capacité d'accueil pour l'avifaune aquatique doit être assurée par le maintien de conditions favorables, à savoir une offre alimentaire suffisante et l'absence de dérangement excessif. Ces conditions ne peuvent être garanties que par la conservation des caractéristiques actuelles.

L'étude approfondie et le suivi de la beine lacustre apparaît donc comme un préalable indispensable à la protection des milieux et des composants biotiques qu'ils hébergent.

Même si en théorie, les composants biotiques jouent un rôle dans l'évolution de la morphologie riveraine, les biocénoses aquatiques dépendent d'avantage de cette morphologie qu'elles ne l'influencent. Cette dépendance est d'autant plus grande que le niveau trophique des eaux, dont dépend la productivité végétale, est faible.

Une relation directe existe donc entre la conservation des biocénoses, qui font actuellement la richesse de la rive sud, et le maintien, voire l'amélioration des caractéristiques actuelles de la beine. Ces objectifs ne pourront être atteints que par des mesures et interventions techniques visant à stopper les processus d'érosion aussi bien au niveau de la beine que de la rive.

Dufour et Robin (1982) concluent leur étude sur le recul de la rive par une série de propositions de mesures de protection contre l'érosion. Ils proposent l'implantation d'une série de digues submergées perpendiculaires à l'axe du vent dominant, mais évitant l'effet de lagon préjudiciable à la qualité biologique et physico-chimique du milieu et, éventuellement, la création d'îles artificielles. Ces auteurs soulignent que les aménagements doivent retenir les vagues importantes et atténuer leur énergie avant leur déferlement sur la beine peu profonde. Il doivent être constitués de matériaux résistants et situés le plus près possible de la barre de lévigation extérieure. Des cloisonnements par épis perpendiculaires à la rive seraient également souhaitables pour éviter la formation de vagues importantes parallèles à la rive.

Bien que relativement épargnée par l'artificialisation, la rive sud devra faire l'objet d'une application stricte des mesures de conservation et de restauration de l'état naturel, aussi bien en ce qui concerne le rivage et l'interface que la beine submergée.

5. PROPOSITIONS DE GESTION ET STRATEGIE D'ETUDE DE LA BEINE LITTORALE

5.1. PRINCIPES DE GESTION

La gestion de la beine littorale de la rive sud du lac de Neuchâtel doit permettre la conservation qualitative et quantitative des milieux lacustres qui garantissent le maintien des biocénoses et donnent à ce site sa valeur exceptionnelle.

La rive lacustre est composée de différentes parties, supra-, eu- et infralittoral dont les limites sont fixées par les conditions hygriques (humidité) côté terre et hydriques (profondeur de l'eau) côté lac qui déterminent l'extension des divers groupements végétaux : groupements de marais, plantes émergentes, plantes à feuilles flottantes et plantes submergées.

Si toutes les parties de la rive lacustre sont présentes, elles constituent une zone de transition - ou écotone - entre les milieux terrestre et limnétique, caractérisée par le gradient d'humidité puis d'inondation croissantes qu'elle forme entre les deux écosystèmes.

Les différentes parties de la rive lacustre entretiennent des relations plus ou moins étroites grâce aux flux écologiques (matière, énergie, organismes). Aussi, les propositions de gestion de la beine littorale (partie infralittorale de la rive) doivent-elles s'inscrire dans un cadre plus large et être en harmonie avec les mesures de gestion déjà définies pour les marais (eu-et supralittoral).

Si certaines parties de la rive lacustre ont été dégradées, alors que la pente naturelle est suffisamment faible pour permettre en principe l'intégrité structurale de la rive, sa fonction de zone de transition s'en trouve altérée et la diversité des habitats que présente normalement le gradient d'humidité et d'inondation diminue. En conséquence les potentialités de diversité biologique diminuent et la qualité du milieu peut être modifiée par perturbation du "fonctionnement" du système.

La notion d'intégrité structurale et fonctionnelle de l'écotone "rive lacustre", à savoir le marais + la zone littorale est donc importante à considérer pour une gestion adéquate de ces milieux.

L'objectif général qui devrait guider la politique de gestion de la beine littorale de la rive sud du lac de Neuchâtel est le maintien de l'intégrité structurale et fonctionnelle de l'écosystème littoral, composé du marais côtier et la beine lacustre.

Pour satisfaire à cet objectif, une attention particulière doit être portée :

- au maintien des dimensions de la beine littorale
- au maintien de la variété des habitats favorisant une diversité biologique élevée
- à la qualité des conditions du milieu (eau, sédiment)
- au maintien, de voies de communication pour la faune (poissons, oiseaux) entre le lac et les marais côtiers et à l'intérieur de ces différents milieux
- au contrôle des activités humaines

Le choix des mesures de gestion devra s'appuyer à la fois sur des connaissances scientifiques suffisantes quant aux exigences écologiques des espèces à protéger, en particulier les espèces menacées ou susceptibles d'être réintroduites et sur des données techniques (génie hydraulique) fiables, permettant d'atteindre les objectifs fixés.

5.2. MESURES DE GESTION

Les diverses mesures proposées ici sont établies à partir des connaissances scientifiques générales sur la structure et le fonctionnement de la beine littorale lacustre mais en l'absence de données précises et récentes concernant tous les composants de la beine de la rive sud du lac de Neuchâtel. Nous avons vu en effet, que la plupart des données à disposition concernant cette rive sont très lacunaires. Ces mesures constituent donc des voies à explorer mais leur mise en place nécessitera la réalisation d'un programme d'études préliminaires interdisciplinaire pour établir un état de référence dans lesquelles devraient collaborer des hydrauliciens, sédimentologues, hydrobiologistes notamment.

Le phénomène d'érosion active de la rive sud constitue le problème central autour duquel devront s'articuler les principales mesures de gestion. Tout doit en effet être entrepris pour enrayer ce phénomène qui constitue une grave menace pour le maintien de la structure et du fonctiionnement de l'écotone.

Les connaissances actuelles sur les phénomènes d'érosion montrent qu'ils sont complexes et agissent aussi bien sur la rive qu'au niveau de la beine, mais différemment selon l'orientation de la rive, la nature du substrat, la morphologie et la profondeur de la beine.

5.2.1. MAINTIEN DE LA DIMENSION DE LA BEINE LITTORALE

L'érosion active des rives, qui se manifeste actuellement, constitue une menace pour le maintien de la dimension des marais non boisés mais pas pour celle de la beine littorale. En effet, l'érosion de la rive exondée (marais) se traduit au contraire par une augmentation des dimensions de la beine littorale. L'érosion peut influencer toutefois les caractéristiques bathymétriques et sédimentaires de la beine.

5.2.2. MAINTIEN DE LA DIVERSITE DES HABITATS

La diversité des milieux naturels de la beine littorale lacustre est conditionnée par la combinaison de variables géomorphologiques (aire, pente), physiques (texture des sédiments, température et transparence de l'eau, courants, vagues, variations du niveau influençant les phénomènes d'érosion - alluvionnement des rives), chimiques (concentration et biodisponibilité en éléments nutritifs dans les sédiments et l'eau), et enfin biotiques (nature, abondance et localisation des macrophytes qui constituent, après les caractéristiques géomorphologiques et sédimentaires, un élément de structure important de la beine littorale : et contribuent à l' organisation spatiale de l'écosystème).

Ces variables sont plus ou moins liées les unes aux autres et fluctuent dans l'espace et au cours du temps (variations saisonnières et interannuelles) notamment en relation avec les conditions climatiques (insolation, précipitations, température de l'air) et trophiques, ainsi qu'avec les modifications physionomiques ± naturelles (érosion) ou détruites par l'homme (remblais, constructions) que subissent les rives.

Certaines des variables constituent des contraintes sur lesquelles il n'existe aucune possibilité d'action (par exemple les conditions climatiques). D'autres peuvent faire l'objet de mesures correctrices qui déploieront leurs effets à moyen ou long terme. D'autres, enfin devraient permettre de conserver voire promouvoir la diversification des milieux à court terme.

Les <u>phénomènes d'érosion</u> influencent négativement la diversité des milieux de la beine littorale en modifiant l'emplacement de la ligne de rive. Il a en effet été démontré, dans le cas de la rive sud du lac de Neuchâtel, que l'érosion active de certains secteurs avait tendance à modifier les contours de la rive qui devient rectiligne. L'érosion, dans ce cas, est un facteur banalisant des milieux littoraux qui perdent leurs composantes "milieux abrités" des vents, courants et vagues, ceux-ci permettant normalement à une flore et une faune adaptées de se développer.

Dans le but de créer des zones de protection variées, différentes mesures peuvent être envisagées et généralisées après une étude pilote.

- création de digues implantées obliquement à la rive (en fonction des vents et courants dominants) favorisant la création de lagunes côtières abritées. Le fondement de ces digues devrait être soit submergé pour éviter les atteintes à la qualité du paysage soit recouvertes de matériaux permettant le développement d'une végétation arbustive et arborée naturelle

- création d'îles dans les zones peu profondes de la beine littorale.

A ces interventions, pourraient être couplées des mesures locales visant à diversifier les substrats de la beine littorale

1. - par apport de matériaux de granulométrie grossière (cailloux) sur les rives exposées ou

2. - par modification des profondeurs d'eau (dragage) dans les nouveaux sites abrités par les digues.

La conservation des biotopes actuels dépend également de l'application stricte des mesures prévues par le Plan directeur des rives, en particulier les restrictions de construction, d'accès ou de navigation.

Ainsi, le respect de périmètres de protection interdisant ou limitant à certaines périodes l'accès de l'homme permet-il la préservation des zones de végétation, évite le dérangement ou la destruction des sites de ponte pour certaines espèces de poissons et de nidification pour les oiseaux.

5.2.3. QUALITE DES CONDITIONS DU MILIEU

La qualité des conditions du milieu (eau, substrat) influence la diversité biologique de la beine littorale. Passé un certain stade, l'eutrophisation des eaux ou les pollutions toxiques conduisent à une banalisation des habitats avec disparition de nombreuses espèces végétales et animales.

La diminution du degré d'eutrophisation des eaux du lac de Neuchâtel, amorcée dès le premier tiers des années 1980, devrait concourir à la diversification des conditions de milieu de la beine littorale, en favorisant le développement d'espèces et de groupements végétaux submergés plus divers. En conséquence, toutes les mesures qui pourront être prises sur le bassin versant du lac de Neuchâtel afin de diminuer les apports de fertilisants (foyers ponctuels ou diffus) et maintenir le lac dans un stade mésotrophe pourront avoir des effets bénéfiques sur la diversité des milieux de la beine littorale.

Le maintien de la qualité du milieu passe également par une gestion efficace des activités humaines. Aussi, localement, veillera-t-on à limiter toute influence néfaste d'origine anthropique qui pourrait altérer la qualité des eaux ou du substrat.

5.2.4. CONSERVATION DES ROSELIERES LACUSTRES

Le développement des roselières lacustres est sous la dépendance de facteurs géomorphologiques (aire de la zone littorale dont la profondeur est inférieure à 1,5 m environ), édaphiques (nature et texture du substrat), mécaniques (vagues, courants) trophiques (concentration en éléments nutritifs, phosphore, azote et en matière organique d'origine autochtone et allochtone) toxiques (pesticides) et biotiques (compétition pour la lumière avec le phytoplancton lors des premiers stades de développement, envahissement et dégâts mécaniques par les masses de macroalgues filamenteuses rejetées par les vagues, etc.).

Dans le but de conserver les roselières aquatiques et les fonctions écologiques qu'elles jouent pour de nombreuses espèces animales, diverses mesures peuvent être envisagées.

Remarquons tout d'abord que la diminution du degré d'eutrophisation des eaux du lac de Neuchâtel devrait avoir une influence positive sur les roselières lacustres pour autant que l'on parvienne à des valeurs de concentration en phosphore suffisamment basses pour limiter la prolifération des algues et la quantité de matière organique autochtone. Cette évolution devrait également conduire à diminuer la fragilité des tiges de roseaux par augmentation du rapport carbone/azote (Stant, 1953; Klötzli & Zust, 1973).

Dès lors, les efforts devraient être concentrés prioritairement vers des mesures limitant les effets néfastes liés aux facteurs mécaniques (vagues, courants).

En plus de la définition de périmètres de protection évoqués au point précédent pour éviter les dégradations liées aux activités de loisirs (piétinement, bateaux) il y aurait lieu, dans les secteurs où les roselières sont en recul, de prévoir des ouvrages de protection à caractère naturel (voir explication donnée pour la création de digues anti-érosion).

On pourrait aussi envisager localement des plantations de roseaux en ayant préalablement pris soins de fixer le substrat (cf. expériences Bodensee).

5.2.5. MAINTIEN, RETABLISSEMENT OU CREATION DE VOIES DE COMMUNICATION ENTRE LA BEINE LACUSTRE ET LE MARAIS CÔTIER.

Plusieurs espèces animales migrent entre le marais et la beine littorale pour l'accomplissement de leurs fonctions vitales (recherche de nourriture, abri, zone de reproduction). C'est le cas principalement de certaines espèces de poissons et d'oiseaux.

Afin de permettre ou favoriser cette mobilité, la création et l'entretien régulier des chenaux constituent des mesures simples mais performantes. Le fonctionnement de tels chenaux est toutefois lié également à la régulation artificielle du niveau du lac.

5.3. STRATEGIE D'ETUDE DE LA BEINE LITTORALE

La synthèse des connaissances acquises sur la beine littorale de la rive sud du lac de Neuchâtel montre qu'il existe relativement peu d'informations et que la plupart d'entre elles sont anciennes et donc obsolètes. Elles constituent néanmoins une base utile aux fins de comparaison.

Il apparaît que les mesures préconisées au point précédent devraient être précédées d'études de base permettant de caractériser un état de référence afin de garantir leur bien-fondé et de pouvoir évaluer les impacts favorables ou non qu'elles pourraient avoir en relation avec les objectifs de conservation visés. Dans un deuxième temps, un programme de suivi devrait être prévu afin d'être en mesure de tenir compte de la dynamique des processus impliqués et d'apporter, le cas échéant, les modifications qui s'imposent.

Les études de base suivantes devraient être envisagées :

1. Géomorphologie

Caractérisation de la structure et de la dynamique de la beine lacustre sur l'ensemble de la rive sud (état de référence) : modifications de la ligne de rive, variations morphométriques et bathymétriques de la beine (photo-interprétation diachronique, levés in-situ, cartographie SIG). Une étude courantologique devrait être couplée à cette approche.

L'étude géomorphologique de la rive sud dans son ensemble devrait mettre en évidence les secteur de rives particulièrement menacés qui devront faire l'objet de mesures de protection prioritaires.

Par la suite, l'étude en continu de secteurs représentatifs devrait être prévue.

2. Substrat

Caractérisation de la nature et de la texture du substrat, fond rocheux ou meuble avec des caractéristiques sédimentaires dépendant à la fois de la nature du substratum géologique, des apports du bassin versant et des conditions hydrodynamiques induites par les recouvrements de l'eau (échantillonnage in-situ, analyses en laboratoire et cartographie SIG).

Par la suite, l'étude en continu de secteurs représentatifs devrait être prévue.

3. Macrophytes

Caractérisation de la couverture végétale actuelle : approche qualitative (composition floristique) et quantitative : abondance et distribution des types d'herbiers à végétation émergente, à feuilles flottantes et submergée (photo-interprétation, observations in-situ, cartographie SIG sur l'ensemble de la rive sud du lac de Neuchâtel. Mise en évidence de l'évolution récente des macrophytes sous la double influence de l'érosion et de l'oligotrophisation des eaux par comparaison avec les données de 1979 établies par Lachavanne & al. (non publiées).

Par la suite, l'étude en continu de transects représentatifs de la diversité des groupements végétaux et des conditions du milieu devrait être prévu ainsi qu'un suivi des roselières lacustres.

4. Macrofaune benthique

Caractérisation (approche qualitative) de la macrofaune benthique de certains biotopes de la rive sud du lac de Neuchâtel en fonction des types de substrat (sédiments meubles, fonds de cailloux, macrophytes).

Approche quantitative limitée aux groupes jouant un rôle important comme ressources alimentaires pour les poissons et les oiseaux.

5. Poissons

Approche qualitative et semi-quantitative des espèces liées par l'une, l'autre ou l'ensemble de leurs fonctions vitales à la beine littorale et au marais côtier.

Détermination des caractéristiques actuelles des peuplements des espèces menacées sur la rive sud (taille et structure des populations, reproduction, sites de frai, offre alimentaire, etc.) et comparaison avec les exigences écologiques connues pour ces espèces.

Etude approfondie de l'utilisation des voies de communication (chenaux) entre le lac d'une part, le marais et les étangs côtiers, d'autre part.

6. Oiseaux

Approche qualitative et semi-quantitative. Evaluation de l'importance de la beine littorale pour les oiseaux aquatiques (habitat, abri, ressources nutritives, reproduction).

En particulier, détermination de l'offre alimentaire : moules zébrées pour les malacophages, végétation macrophytique pour les phytophages.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aebischer, A., (1991): Einfluss der Wasserstandschwankungen des Neuenburgersees auf den Bruterfolg von schilfbewohnenden Singrägeln. Résultats 1990-1991. Institut de Zoologie, Fribourg.

Antoniazza, M., (1979): Les oiseaux nicheurs des marais non-boisés de la rive sud-est du Lac de Neuchâtel. Travail de licence, Université de Neuchâtel.

Antoniazza, M., (1988): Effets de l'entretien sur l'avifaune nicheuse du marais, résultats de 1985, 1986, 1987.

Antoniazza, M., (à paraître): Avifaune nicheuse des marais. Résultat des recensements de 1991-1992.

Aquarius (1992): La zone des Tuileries. Valeurs hydrobiologique et piscicole. Propositions d'aménagement.

Barbe, J., (1984): Les végétaux aquatiques. Données biologiques et écologiques. Bull. fr. pisciculture. No. spéc., 42 p.

Berset, J., (1951): La végétation de la réserve de Cheyres et des rivages avoisinants du lac de Neuchâtel. Bull. Soc. fribourgeoise sc. nat. 40:65-94.

Brancucci, M., (1976): La faune des Dytiscidés de la rive sud du lac de Neuchâtel. Etude faunistique, écologique et systématique. (Travail de licence). Université de Neuchâtel, Neuchâtel.

Département des travaux publics, Neuchâtel (1988): Rapport de gestion 1988. DTP.

Département des travaux publics, Neuchâtel (1991): Rapport de gestion 1991.

Dufour, B. & Dufour-Fallot, B., (1988): Gestion des zones naturelles, Rapport Nº 4 : Effets de l'entretien des étangs sur la faune piscicole en 1987. GEG Grande Cariçaie, Champittet.

Dufour, B. & Robin, P., (1982): Etude du recul d'une rive du lac de Neuchâtel (Secteur compris entre Yverdon et Cheyres). EPFL, IGE, Lausanne.

Département fédéral de justice et police, : Le délégué à l'aménagement du territoire (1975). Rives des lacs, partie A: Objectifs et contenu de l'aménagement des rives des lacs. éd. DFJP, 64 p.

ECONAT, (1984): Reconstitution de bancs de sable à l'extrémité sud du lac de Neuchâtel. Plan de protection des rives du lac de Neuchâtel: étude no 21. Pro Natura Helvetica.

Girardet, A., (1926): La végétation du lac de Neuchâtel dans sa partie sud-ouest, jusqu'à Vaumercus d'une part, et jusqu'à Estavayer d'autre part, Lausanne: Université de Lausanne, Concours de faculté, pp. 1-45.

Groupe d'étude et de gestion de la Grande Cariçaie (1992): Grande Cariçaie été 1991-1992. Chronique Journal des Grèves No. 26, Cheseaux-Noreaz.

Groupe d'étude et de gestion de la Grande Cariçaie (1992): Grande Cariçaie: 10ans de gestion. Réflexions et propositions.

Haenni, J.P., (1975): Biologie des pyralides (Lepidoptera) aquatiques sur la rive sud du lac de Neuchâtel. Mémoire de licence. Univ. de Neuchâtel, Neuchâtel.

Hürlimann, H., (1951): Zur Lebensgeschichte des Schilfs an den Ufern der Schweizer Seen. Beitr. geobot. Landes auf nd. Schweiz 30:1-232.

Hutchinson, G.E., (1967): A treatise on limnology. Vol. 2: Introduction to lake biology and the limnoplankton. John Wiley & Sons, New-York, USA.

Juget, J. & Rostand, J.-C., (1973): Influence des herbiers à Trapa natans sur la dynamique d'un étang en période estivale. Ann. Limnol. 9(1): 11-24.

Jungo Ingénieurs SA, (1987): Lac de Neuchâtel: étude des affluents. OFPE.

Kirchhofer, A., Zaugg, B. & Pedroli, J.-C., (1990): Liste rouge des Poissons et Cyclostomes de Suisse. Doc. Faun. Helvetiae 10:1-24.

Lachavanne, J.-B., (1985): The influence of accelerated eutrophication on the macrophytes of Swiss Lakes: abundance and distribution. Internat. Verein. Limnol. 22(2): 2950-2955.

Lachavanne, J.-B. , Jaquet, J.-M., Juge, R. & J. Perfetta, (1985): Etat des rives du lac des Quatre cantons. Qualification et conservation. Office fédéral des forêts et de la protection des paysages, Office fédéral de la protection de l'environnement, Commission de surveillance du lac des Quatre cantons, Université de Genève, 119 p. + 3 cartes.

Lachavanne, J.-B. & Juge, R., (1993): Multiscale and multicriteria approach to the vegetation of circumlacustrine ecotones. UNESCO-MAB Digest 11, 36 p. (à paraître).

Lachavanne, J.-B., Juge, R., Lods-Crozet, B. & Perfetta, J., (1983): Liste floristique et distribution des espèces de macrophytes du lac de Neuchâtel. Documentation interne Unité de biologie aquatique. Université de Genève (NE; VD; FR; BE).

Lachavanne, J.-B., Juge, R. & Perfetta, J., (1993): Structure des peuplements de macrophytes In: Traité de Limnologie. Collection Environnement aquatique, Lavoisier, 18 p. (à paraître).

Lachavanne, J.-B., Perfetta, J., Noetzlin, A., Juge, R., & B. Lods-Crozet, (1986): Etude chorologique et écologique des macrophytes des lacs suisses en fonction de leur altitude et de leur niveau trophique, 1976-1985; rapport final, rédaction J.-B. Lachavanne & R. Juge, Université de Genève et Fonds National Suisse pour la Recherche Scientifique, 115 p.

Landolt, E., (1991): Plantes vasculaires menacées en Suisse. Liste Rouge. OFEFP Berne.

Lecocq, A., : Les Charophytes comme ressource alimentaire pour les anatidés. Travail de diplôme, Laboratoire d'écologie et de biologie aquatiques, Université de Genève (en préparation).

Le Nédic, C., (à paraître): Effets de l'entretien sur la végétation. Rapport de synthèse des résultats de 1988-1992.

Leuzinger, Y., (1983): Rive nord du lac de Neuchâtel. Inventaire des données faunistiques. Plan de protection des rives du lac de Neuchâtel: étude no 19. Pro Natura Helvetica.

Liechti, P., (1982): Le lac de Neuchâtel est-il eutrophe ? OFPE.

Luther, H., (1949): Vorschlag zu einer ökologischen Grundeinteilung der Hydrophyten. Act. Bot. Fenn. 44, 1-15.

Marti, C. & Schifferli, L., (1987): Extraits de l'inventaire des zones d'importance internationale pour les oiseaux d'eau en Suisse - Première révision, 1986. Nos Oiseaux 39(4):145-158.

Maurer, V., (1992): Die Produktionsbiologie von Bieler- und Neuenburgersee 1987-1988. Beziehungen zwichen Nährstoffen, Algen und Crustaceen. Universität Bern, Zoologisches Institut, Bern.

Mauvais, G., (1927): La faune littorale du lac de Neuchâtel. Bulletin de la Société neuchâteloise des sciences naturelles 51:77-208.

Mülhauser, B., (1990): Les odonates de la Grande Cariçaie (rive sud du lac de Neuchâtel). Bull. romand Entomol. 8:1-54.

Oihénart, C. & Perfetta, J., (1990): Suivi de la végétation aquatique des étangs de Font (1988-1992). Rapport intermédiaire 1990. Gestion des zones naturelles de la rive sud du lac de Neuchâtel, rapport no. 17. Rapport UBA de l'Université de Genève no. 17:15.

Oihénart, C., Perfetta, J., Robert, J. & Lachavanne, J.-B., (1988): Etude de la végétation de deux étangs de la rive sud du lac de Neuchâtel: Champittet et Châble Perron. Sté. Vaud . Sci. Nat. 79(1):23-28.

Pattay, D., (1978): Contribution à l'aménagement de la pêche de la perche dans le lac de Neuchâtel. Comm. Intercant. de la pêche dans le lac de Neuchâtel.

Pedroli, J.-C., (1981): Les relations entre la moule zébrée Dreissena polymorpha (Pallas) et les oiseaux aquatiques. Université de Neuchâtel, Neuchâtel.

Pedroli, J.-C., Zaugg, B. & Kirchhofer, A., (1991): Atlas de distribution des poissons et cyclostomes de Suisse. Doc. Faun. Helvetiae 11:1-205.

Pieczynska, E., (1976): Some regularities in the functionning of lake littoral. In: Selected problems of lake littoral Ecology. Univ. of Warsaw: 211-226.

Renevey, B., (1989): Ecologie de la reproduction du grèbe huppé sur la rive sud du lac de Neuchâtel. Thèse de Doctorat. Université de Berne, Berne.

Ritter, G., (1882): De l'action des vagues sur les sables des bords du lac. Bulletin de la Société neuchâteloise des sciences naturelles 12: 286-287.

Ritter, G., (1889): Notice sur la formation des lacs du Jura et sur quelques phénomènes d'érosion des rives de ces lacs. Bulletin de la Société neuchâteloise des sciences naturelles 17:87-107.

Ritter, G., (1902): Sur la disparition des falaises de la rive sud du lac de Neuchâtel. Bulletin de la Société neuchâteloise des sciences naturelles 30:362-367 + 500-501.

Rollier, M., Antoniazza, M. & Roulier, C., (1981): Plan de protection de la rive sud-est du lac de Neuchâtel. Pro Natura Helvetica.

Rollier, M. & Roulier, C., (1984): Plan de protection de la rive Neuchâteloise.

Roulier, C., (1980): Etude phytosociologique et dynamique des groupements végétaux de la rive Sud du lac de Neuchâtel. Université de Neuchâtel, Neuchâtel.

Schwab, A., (1984): Contrôle de l'incidence des dragages et des taux d'assainissement sur les réserves du Bas-Lac. Université de Neuchâtel. Neuchâtel.

Sculthorpe, C.D., (1967): The biology of aquatic vascular plants. Arnold, London XVIII + 610 p.

Sollberger, H., (1974): Le lac de Neuchâtel (Suisse). Ses eaux, ses sédiments, ses courants sous-lacustres. Université de Neuchâtel, Neuchâtel.

VAW (1990): Erosion de la rive sud du lac de Neuchâtel, examen des causes prévision de l'évolution future, recommandations sur les mesures à prendre. Rapport pour le GEG. EPFZ, Zürich.

Wütrich, M., (1964): L'évolution biologique du lac de Neuchâtel. Bull. ARPEA 5:35-37.

Zurwerra, S.A., (1989): Etude complémentaire pour l'extraction de sables du lac de Neuchâtel à Estavayer-le-Lac. Rapport SIPOREX SA.