CAHIER DE L'ENVIRONNEMENT N° 372

Nature et paysage

Lutte contre l'érosion sur la Rive sud du lac de Neuchâtel

Bilan de mesures

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP

CAHIER DE L'ENVIRONNEMENT N° 372

Nature et paysage

Lutte contre l'érosion sur la Rive sud du lac de Neuchâtel

Bilan de mesures

Tronçon pilote de Cheseaux-Noréaz

Publié par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP
Berne, 2004

Editeur
Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)
L'OFEFP est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)

Auteurs
François Matthey et René Pradervand
Service des eaux, sols et assainissement, Valentin 10, CH-1014 Lausanne
Daniel Burri et Jean-Pierre Jotterand
Bureau d'ingénieurs Burri&Pavid S.A., CH-1400 Yverdon-les-Bains
Catherine Strehler Perrin, Christian Clerc et Michel Antoniazza,
Groupe d'étude et de gestion de la Grande Cariçaie, CH-1400 Cheseaux-Noréaz
Patrick Durand, Frédéric Hofmann, Sophie Meylan et Sébastien Beuchat
Bureau Ecotec Environnement S.A., CH-1203 Genève
Paul Kulling
Service des forêts, de la faune et de la nature, CH-1025 St.–Sulpice

Référence
MATTHEY F. et al. 2004 : *Lutte contre l'érosion sur la Rive sud du lac de Neuchâtel. Bilan de mesures. Tronçon pilote de Cheseaux-Noréaz*. Cahier de l'environnement Nr. 372. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 70 pp.

Accompagnement OFEFP
Raymond Pierre Lebeau, Section compensation écologique

Traduction
Service de traduction de l'OFEFP

Graphisme, mise en page
Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Photo couverture
B. Renevey/collection Grande Cariçaie

Commande
BUWAL
Dokumentation
CH-3003 Bern
Fax + 41 (0) 31 324 02 16
docu@buwal.admin.ch
www.buwalshop.ch

Numéro de commande et prix :
SRU-372-F / CHF 15.– (TVA inclue)

© OFEFP 2004

Table des matières

Abstracts **5**

Avant-propos **7**

Résumé **9**

Introduction **11**

1 L'érosion de la Rive sud **13**
1.1 Les causes de l'érosion 13
1.2 L'ampleur du phénomène 15
1.3 Les mesures de lutte contre l'érosion 16

2 Objectifs du tronçon pilote **17**

3 Organisation, coût et financement **19**
3.1 Organisation 19
3.2 Coût et financement 20

4 Ouvrages réalisés **21**
4.1 Localisation des ouvrages 21
4.2 Ouvrages en enrochements 22
4.3 Ouvrages en béton 24
4.4 Ouvrages en bois 24
4.5 Exécution des travaux 26

5 Suivis du tronçon pilote **29**
5.1 Suivi mécanique 29
5.2 Suivi bathymétrique 29
5.3 Suivi de la ligne de rive 30
5.4 Suivi sédimentologique 31
5.5 Suivis biologiques 32

6 Stabilité et effets des ouvrages **35**
6.1 Stabilité des ouvrages 35
6.2 Effets des ouvrages sur la topographie de la beine 35
6.3 Effets des ouvrages sur la ligne de rive 37
6.4 Effets des ouvrages sur la sédimentation 39
6.5 Effets des ouvrages sur la faune et la flore 40
6.6 Intégration paysagère et cohabitation avec

7 Synthèse et conclusions **55**
7.1 Efficacité technique des ouvrages 55
7.2 Effets des ouvrages sur la faune et la flore 55
7.3 Incidences des ouvrages sur l'exercice de la pêche et le tourisme lacustre 57
7.4 Bilan du tronçon pilote 58
7.5 Perspectives 60

Annexe **61**
Plan1 Situation des ouvrages de lutte contre l'érosion 61
Plan2 Situation des suivis réalisés 61

Index **65**
1 Figures 65
2 Tableaux 67
3 Littérature 68
4 Glossaire 69

Abstracts

E

Keywords:
engineering structures, erosion, fauna, flora, Lake Neuchâtel, recreation, marshes, protection, nature reserves, shore, scientific monitoring.

Since the first regulation of the Jura waters, the southern shore of Lake Neuchâtel has been subject to active erosion. Each year, more than a hectare of marshes and alluvial zones of national importance disappear as a result of wave action. Although the mechanism of erosion is known, prevention remains a technically complex and costly matter. The present report reviews the results of efforts to combat erosion on a 4 km pilot section with the aid of a wide variety of structures. The technical, bathymetric and biological monitoring carried out permits a comparative evaluation of the efficacy of the various structures tested, together with their costs and their effects on benthic and lakeside habitats. They also demonstrate that it is necessary for a combination of different structures to be used if shoreline erosion is to be effectively controlled.

D

Stichwörter:
Erosion, Fauna, Flora, Freizeit, Gestaltung, Naturreservate, Neuenburgersee, Schutz, Sumpfgebiet, Ufer, wissenschaftliche Überwachung.

Seit der ersten Jura-Gewässerkorrektion ist das Südufer des Neuenburgersees einer starken Erosion ausgesetzt. Jährlich geht dort wegen des Wellenschlags eine Hektare Sumpf- und Schwemmland von nationaler Bedeutung verloren. Der Erosionsmechanismus ist zwar hinlänglich bekannt, die Prävention aber ist nach wie vor technisch komplex und kostspielig. Der vorliegende Bericht zieht Bilanz über einen Pilotversuch, die Erosion auf einem Abschnitt von 4 km Länge mit sehr unterschiedlichen baulichen Massnahmen zu bekämpfen. Anhand der in technischer, bathymetrischer und biologischer Hinsicht durchgeführten Erfolgskontrollen lassen sich die Wirksamkeit der jeweiligen Versuchsmassnahmen sowie ihre Kosten und Auswirkungen auf die benthischen und die angrenzenden natürlichen Lebensräume vergleichend beurteilen. Zudem machen sie deutlich, dass die Ufererosion nur durch eine Kombination verschiedener baulicher Massnahmen erfolgreich bekämpft werden kann.

F

Mots-clés:
Aménagements, érosion, faune, flore, lac de Neuchâtel, loisirs, marais, protection, réserves naturelles, rive, suivi scientifique.

Depuis la 1ère correction des eaux du Jura, la Rive sud du lac de Neuchâtel est exposée à une érosion active. Chaque année, plus d'un hectare de marais et de zones alluviales d'importance nationale disparaissent par l'action des vagues. Si le mécanisme de l'érosion est connu, sa prévention reste techniquement complexe et coûteuse. Le présent rapport dresse le bilan d'un essai de lutte contre l'érosion sur un tronçon pilote de 4 km composé d'ouvrages de natures très différentes. Les suivis techniques, bathymétriques et biologiques réalisés permettent une évaluation comparative de l'efficacité respective des ouvrages testés, de leurs coûts et de leurs incidences sur les milieux benthiques et naturels riverains. Ils mettent également en évidence la nécessité d'une combinaison d'ouvrages pour une lutte efficace contre l'érosion de la rive.

I

Parole chiave:
sistemazioni, erosione, fauna, flora, lago di Neuchâtel, ricreazione, paludi, protezione, riserve naturali, riva, accompagnamento scientifico

Sin dalla 1a correzione delle acque del Giura, la riva sud del lago di Neuchâtel è soggetta ad un'erosione attiva. Ogni anno, oltre un ettaro di paludi e di zone golenali d'importanza nazionale scompare nelle onde. Se il meccanismo dell'erosione è conosciuto, la sua prevenzione resta tecnicamente complessa e costosa. Il presente rapporto fa il bilancio di un progetto pilota contro l'erosione, attuato lungo un tratto di 4 km e dotato di opere di natura molto diverse. Le analisi tecniche, batimetriche e biologiche eseguite permettono di confrontare l'efficienza delle opere esaminate, i loro costi e l'incidenza sugli ambienti bentonici e naturali presenti a riva. Evidenziano inoltre la necessità di creare un insieme di opere che con la loro azione combinata contribuiscono a promuovere una lotta efficace contro l'erosione della riva.

Avant-propos

De tout temps, les niveaux des lacs subissent des fluctuations naturelles plus ou moins importantes, engendrant des phénomènes successifs d'inondation et d'érosion. La maîtrise de ces facteurs par l'homme a changé la situation. Au 19ème siècle, afin de pallier aux inconvénients des débordements et des crues des lacs et cours d'eau, la correction des eaux du Jura a été réalisée, avec pour conséquences simultanées la régulation des eaux des lacs concernés et la création d'une vaste étendue palustre et de hauts-fonds sur la Rive sud du lac de Neuchâtel.

Un rivage naturel exceptionnel a été ainsi constitué, la « Grande Cariçaie », qui est protégé pour la richesse de sa diversité biologique et paysagère, tant au niveau international (Convention de Ramsar, réserve biogénétique du Conseil de l'Europe) qu'aux niveaux national et cantonal.

Mais la seule protection légale d'un site ne suffit souvent pas à assurer sa conservation à long terme: exposés à la bise et aux courants lacustres, la beine et le rivage naturel subissent chaque année les effets marquants de l'érosion, allant parfois jusqu'au recul annuel de deux mètres de rives.

Beaucoup de lacs en Europe présentent les mêmes phénomènes ; pourtant, à ce jour, aucun dispositif pilote mettant en parallèle différents ouvrages contre l'érosion n'a été testé.

Le présent document décrit précisément les différents types d'ouvrages de lutte contre l'érosion mis en place concrètement sur un « tronçon pilote » de la Rive sud du lac de Neuchâtel. Il dresse un aperçu des mesures réalisées par l'Entreprise de correction fluviale instituée par le Conseil d'Etat vaudois et subventionnées par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Il traite également de l'efficacité des techniques utilisées, des avantages et des limites des différents ouvrages, ainsi que leurs coûts respectifs. Ce bilan devra sans doute être réitéré d'ici une dizaine d'années pour permettre des conclusions définitives, mais, précurseur dans sa conception, cette opération anti-érosion sur le tronçon pilote du lac de Neuchâtel pourra servir de référence pour d'autres actions de lutte contre l'érosion ailleurs dans le pays ou à l'étranger.

Office fédéral de l'environnement,
des forêts et du paysage (OFEFP)

Franz-Sepp Stulz
Chef de la Division NATURE

Résumé

Les marais de la Grande Cariçaie, sur la Rive sud du lac de Neuchâtel, ont une valeur naturelle reconnue à l'échelle nationale et internationale. Ils sont soumis à l'action des courants lacustres, générés par les vents, qui arrachent et transportent les sables molassiques, modifiant sans cesse la forme du rivage. Certains secteurs de rive subissent des reculs de rive atteignant 2 mètres par année.

Alertés par ce phénomène, les organes en charge de la gestion des marais ont mandaté, en 1987, le Laboratoire de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques (VAW) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich (ETH) pour étudier ce phénomène. L'analyse devait permettre de prévoir l'évolution future de la Grande Cariçaie et de définir les mesures à prendre pour en assurer la conservation. Le rapport final de cette étude concluait à la nécessité de combattre l'érosion (HUBER A. et al. 1993). Il suggérait de commencer cette lutte par un tronçon pilote à réaliser dans un secteur d'érosion active, sur le territoire communal de Cheseaux-Noréaz (VD). Un tel projet devait permettre d'apprécier l'efficacité spécifique de différents types d'ouvrages.

En réponse aux conclusions du VAW, une Entreprise de correction fluviale (ECF-RSLN) a été instituée en avril 1995 par décision du Conseil d'Etat du canton de Vaud. Sa commission exécutive, composée de représentants de la fonction publique et d'entreprises privées, avait pour mission de diriger la planification et l'exécution des travaux de lutte contre l'érosion sur le tronçon pilote de Cheseaux-Noréaz.

Les travaux comprenaient la mise en place d'ouvrages de protection différenciés par leurs dimensions, leurs matériaux et leurs positions sur la beine. Ils débutèrent en novembre 1997 et s'achevèrent en mai 2003. Le coût du projet, y compris les mesures d'accompagnement (études, suivis), s'est finalement élevé à environ 7'560'000.– pour 3 km de rive.

Des suivis scientifiques, devant permettre d'évaluer l'efficacité des ouvrages, ont été mis en place dès 1996. Ils étudiaient l'évolution de la mécanique des ouvrages, de la bathymétrie de la beine, de la ligne de rive, de la sédimentologie et de la biologie (avifaune, macrofaune benthique, faune piscicole, végétation).

Un bilan définitif des effets des ouvrages ne pourra être établi qu'à l'horizon d'une dizaine d'années. Quelques conclusions peuvent cependant déjà être formulées. L'établissement d'une zone d'eaux plus calmes à l'arrière des ouvrages est confirmé par l'accumulation de sédiments fins et de matière organique ainsi que par la colonisation des fonds lacustres par les macrophytes. Un ralentissement localisé du recul de la rive est également constaté. Bien qu'il soit difficile de pouvoir décrire les effets spécifiques de chaque ouvrage, certains d'entre eux semblent toutefois inadaptés pour le lac de Neuchâtel, comme les palissades à claire-voie qui ont été rapidement détruites par les courants lacustres. Les ouvrages en enrochements, stables, ont permis un piégeage localisé des sédiments, alors que les récifs artificiels n'ont montré que peu d'effet.

Introduction

La Rive sud du lac de Neuchâtel constitue la plus grande rive naturelle et l'un des ensembles palustres les plus précieux subsistant encore à l'heure actuelle en Suisse.

Le site jouit d'un intérêt national et international incontesté. Au titre de biotope d'importance nationale et internationale, il bénéficie d'un soutien particulier de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). Selon une étude, commandée en 1987 au Laboratoire de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques (VAW) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich (ETH), le site est soumis, sur plus d'un quart de sa rive, à une érosion dépassant localement 2 m par année. Il pourrait perdre, à l'échelle d'un siècle, d'importantes surfaces de milieux marécageux si aucune mesure constructive de protection n'était prise.

Sur la base de ce constat, les départements concernés des cantons de Vaud et de Fribourg constituaient, en décembre 1991, le groupe d'étude des problèmes de lutte contre l'érosion de la Rive sud du lac de Neuchâtel (groupe érosion). Ce groupe intercantonal, constitué de représentants des Services eaux, forêts et nature ainsi que du Groupe d'étude et de gestion de la Grande Cariçaie (GEG), a dressé un bilan de l'érosion et chiffré, en 1991, à environ 37 millions de francs suisses le coût des mesures nécessaires à la protection de 12,5 km de rives (22 millions sur territoire vaudois et 15 millions sur territoire fribourgeois). Afin de tester différents types d'ouvrages, de procéder à la mise au point de leurs méthodes constructives et de vérifier leurs coûts effectifs, le groupe érosion a proposé la réalisation d'un tronçon pilote de 4 km à proximité du rivage de la commune vaudoise de Cheseaux-Noréaz (Fig. 1).

Les associations faîtières de protection de la nature et les autorités publiques et privées compétentes en la matière, consultées sur le projet, se sont prononcées favorablement sur le principe de procéder à des travaux lourds de protection de la rive.

En avril 1995, le Conseil d'Etat vaudois instituait une Entreprise de correction fluviale pour la réalisation des travaux contre l'érosion de la Rive sud du lac de Neuchâtel (ECF-RSLN). La commission exécutive de ce groupe vaudois était formée de représentants du Service des eaux, sols et assainissement (SESA), du Service des forêts, de la faune et de la nature (SFFN) et du GEG. Simultanément il accordait les crédits nécessaires à la réalisation des ouvrages, subventionnés par l'OFEFP. Les routes nationales fournissaient quelque 31'000 m³ de matériaux rocheux issus des chantiers autoroutiers de la Rive nord du lac (A5-NE), alors que 11'000 m³ étaient achetés par l'ECF-RSLN sur le marché.

Le présent rapport situe d'abord le tronçon pilote dans la problématique globale de l'érosion de la Rive sud. Il présente ensuite les travaux commencés en 1994, achevés en 1999 pour les ouvrages à l'intérieur de la zone OROEM, puis poursuivis au sud-ouest par la construction de palissades en pieux jointifs, PJc, en mars 2002 et, PJb, en mai 2003. Il tire les principales conclusions sur les ouvrages mis en place,

leur rapport efficacité/coût ainsi que leurs suivis et leurs effets sur les milieux naturels. Il propose enfin des axes de réflexion sur la manière de poursuivre la lutte contre l'érosion et d'assurer la préservation des milieux naturels riverains.

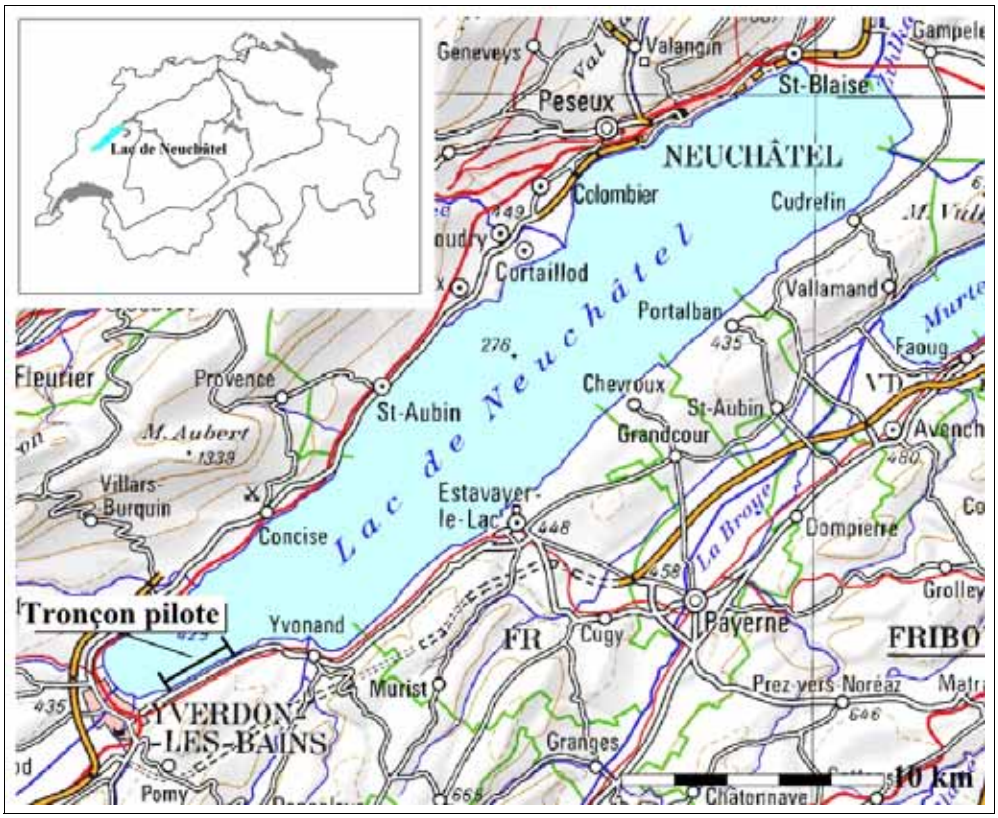


Figure 1:
Plan de situation du tronçon pilote,
Reproduit avec l'autorisation swisstopo (BA046499).

1 L'érosion de la Rive sud

1.1 Les causes de l'érosion

Une rive exposée aux vents

Les vents jouent un rôle majeur dans l'érosion de la Rive sud du lac de Neuchâtel (HUBER A. et al. 1990). Parallèle à la chaîne du Jura, cette rive est en effet très exposée à la bise qui souffle du nord-est, au vent qui souffle du sud-ouest et au joran qui souffle du nord, nord-ouest. D'octobre à mars, le vent du sud-ouest domine. D'avril à septembre, la bise est plus fréquente. Les vitesses de ces vents en cas de tempête peuvent atteindre des pointes supérieures à 100 km/h, en particulier pour la bise, et cela pendant plusieurs heures. Suivant la longueur du fetch, des vagues d'une hauteur supérieure à 2 m peuvent se former. En eau peu profonde, ces vagues s'amplifient encore et, par effet de réfraction, s'orientent parallèlement à la rive lorsque le courant atteint le fond du lac. Même plus petites, sous l'effet de vitesses modérées de vent et à des longueurs de fetch de quelques km, des vagues de 2 m à 6 m de longueur d'onde suffisent déjà à induire sur la beine un courant en profondeur de 0,1 à 0,2 m/s ($U_{x\ max}$) capable de mettre le sable en mouvement[1]. Ces courants se créent en effet dès que la longueur d'onde des vagues est supérieure au double de la profondeur d'eau.

La bise engendre notamment un transport longitudinal de sédiment dans le secteur compris entre Yverdon-les-Bains et Cheyres. Les plus grands déplacements de matériau se produisent sur les barres de lévigation et dans la zone de déferlement. A ces endroits, les vagues perdent le plus d'énergie. Leur vitesse diminue et le sable en suspension forme des dépôts.

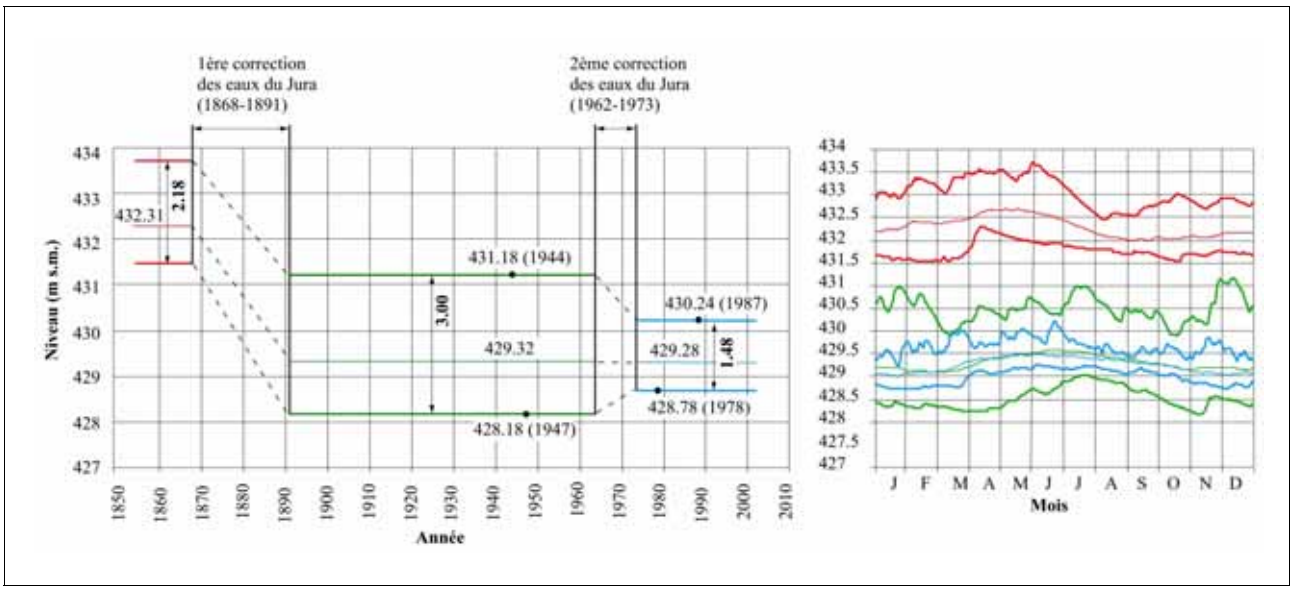
Des hauts-fonds meubles

Le lac de Neuchâtel se différencie des autres lacs du Plateau par sa longueur et l'étendue de ses zones littorales. Les zones de profondeur inférieure à 9 m couvrent à elles seules 51,4 km², soit 83,5% de la zone littorale. Ces zones peu profondes, souvent inférieures à 2 m, sont principalement situées sur la Rive sud (33,8 km²) et à ses extrémités (haut-lac : 2,1 km², bas-lac : 7,8 km²). Elles sont constituées en majorité de sable fin arraché par les vagues aux falaises de molasse au cours des derniers millénaires. Ce sable n'est en effet pas à même de résister aux fortes sollicitations provoquées par les courants lacustres; il est soulevé et mis en suspension jusqu'à des profondeurs d'eau de plusieurs mètres. Son transport est provoqué d'une part par les courants de retour au large perpendiculaires à la rive, d'autre part par les courants longitudinaux de déferlement induits par l'impact latéral des vagues contre la rive.

[1] Ux max = $\pi H/T(1/(\sinh 2\pi d/L))$ où H est la hauteur des vagues, T la période, d la profondeur d'eau et L la longueur d'onde des vagues

Un niveau du lac fluctuant

Le niveau du lac a, au cours de son histoire, présenté des variations naturelles importantes. Avant la première correction des eaux du Jura, le niveau moyen du lac se situait à 432 mètres sur mer (m s. mer), soit environ 3 m plus haut qu'actuellement. La ligne de rive suivait alors le pied des falaises. L'érosion s'exerçait sur la molasse, emportant le sable au large. Les inondations des plaines agricoles étaient fréquentes, la variation maximale du niveau du lac pouvant atteindre 2,15 m. Pour remédier à ces problèmes récurrents, d'importants travaux de régulation du niveau des trois lacs ont été entrepris (1ère correction des eaux du Jura de 1868 à 1891). La construction des canaux de Hagneck, de la Broye, de la Thielle et de Nidau-Büren permit d'abaisser le niveau des lacs de Neuchâtel, Bienne et Morat de 2,7 m. Ces travaux modifièrent considérablement la dynamique érosive de la Rive sud. Selon HUBER A. et al (1990), la quantité de sable prélevée à la rive, respectivement à la zone de faible profondeur par érosion, puis transportée vers le large, représenterait plusieurs millions de m³ depuis la 1ère correction des eaux du Jura.



Fugure 2: Impact des 2 corrections des eaux du Jura sur le niveau des eaux du lac de Neuchâtel.
A gauche : moyenne, maxima et minima du niveau du lac pour les périodes d'avant et après correction.
A droite : moyenne, maxima et minima journaliers pour les mêmes périodes.
En rouge : période précédant la 1ère correction.
En vert : période séparant les 2 corrections.
En bleu : période suivant la 2ème correction.

1.2 L'ampleur du phénomène

L'érosion de la Rive sud a été évaluée, pour la période de 1880 à 1979, par comparaison des cartes de l'Atlas Siegfried et des éditions successives des cartes nationales de la Suisse au 1 : 25'000 (HUBER A. et al. 1993). Bien qu'entachés de certaines imprécisions, les résultats de cette analyse ont permis d'estimer la perte globale de marais et de roselières par érosion d'Yverdon-les-Bains au canal de la Broye à un peu moins de 8 km² en 100 ans. De 1880 à 1894, l'érosion aurait concerné l'ensemble de la rive. A partir de 1894 et jusqu'en 1979, cette érosion se serait concentrée sur 11 à 18 km de rive en fonction de la période considérée avec une perte annuelle variant entre 0,4 et 3,2 ha (HUBER A. et al. 1993).

Depuis 1979, le suivi de l'érosion est effectué par photogrammétrie. Associé à une carte de végétation, il offre l'avantage d'apporter des résultats complémentaires qualitatifs sur la nature des surfaces érodées (roselières lacustres, prairies à grandes laiches ou dunes boisées). L'analyse comparative de photographies permet de dire aujourd'hui avec précision quels secteurs de rive s'érodent, se maintiennent ou progressent. Entre 1979 et 1994, 11 km de rive ont enregistré un recul annuel supérieur à 0.5 m/an (Fig. 3). Entre Yverdon et Yvonand, ce recul a dépassé 0.9 m/an, ce qui a motivé le choix de ce secteur pour la mise en place du tronçon pilote.

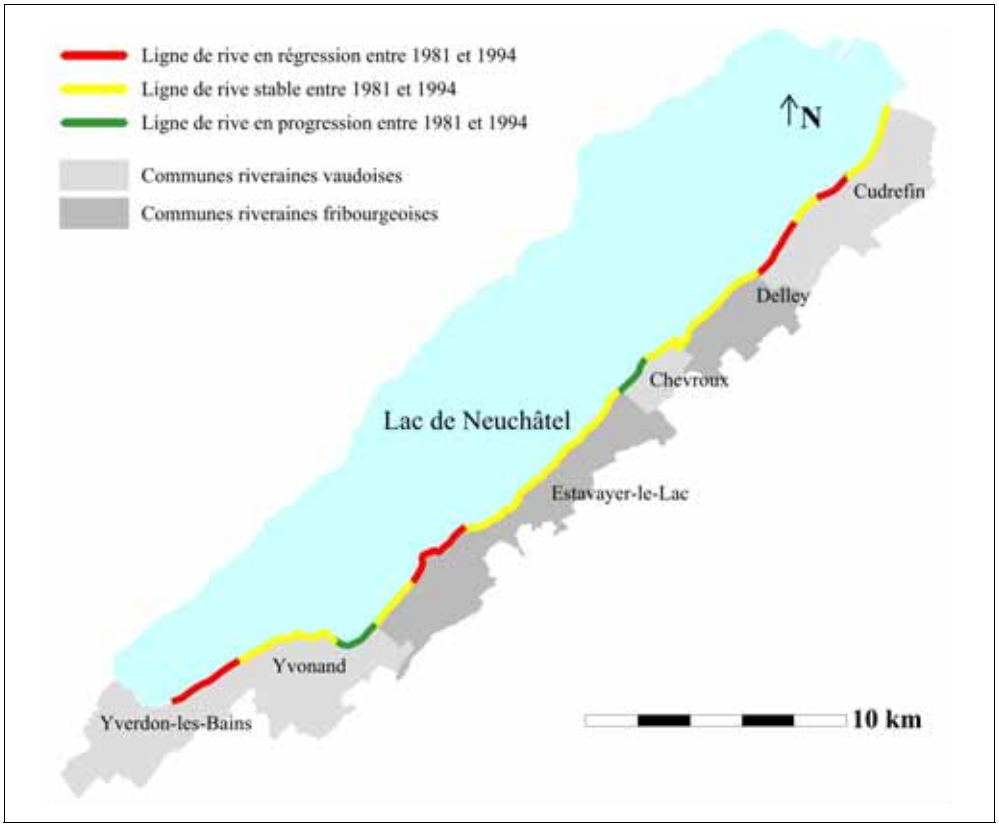


Figure 3:
Erosion sur la Rive sud du lac de Neuchâtel.

1.3 Les mesures de lutte contre l'érosion

Avant 1990, seuls des aménagements ponctuels avaient été réalisés par des collectivités privées et publiques. Ces actions reposaient essentiellement sur la stabilisation de la berge sans prendre en compte les phénomènes au large. Plusieurs mesures douces de génie biologique avaient notamment été testées par le GEG à la fin des années huitante, dans l'attente des résultats de l'étude commandée au VAW en 1987. Certains de ces essais, réalisés parallèlement à la rive avec des palissades de fascines et de pieux entremêlés, s'étaient révélés peu concluants en termes de solidité et d'efficacité (rupture et démantèlement des ouvrages après une année, absence de piégeage de matériaux à l'arrière des ouvrages …). L'enrochement de la berge et la pose d'épis ou de gabions perpendiculaires à celle-ci donnaient de meilleurs résultats. Ces aménagements ne constituaient cependant pas une solution à long terme contre l'érosion. Ils accentuaient la réflexion des vagues, entraînant un affouillement du pied de la rive et le transport de sédiments au large. De plus, ils constituaient un obstacle entre le lac et le marais et empêchaient le développement d'une ceinture de végétation naturelle. La conservation de la beine, comme celle des communautés végétales et animales littorales, n'étaient de fait pas garanties. Le recours à des mesures différentes de lutte contre l'érosion, notamment en plaçant des ouvrages au large, était nécessaire et devait être testé pour la conservation à long terme des écosystèmes riverains naturels.

2 Objectifs du tronçon pilote

L'objectif principal du tronçon pilote est de tester simultanément différents ouvrages de lutte contre l'érosion dans un secteur de valeur écologique élevée, protégé[2], utilisé par des pêcheurs professionnels et limitrophe de zones ouvertes à la navigation et à la baignade.

Aucune étude comparative de telle envergure n'avait été conduite précédemment sur la Rive sud. Les conditions cadres du site, typiques de nombreux secteurs de la Rive sud et d'autres lacs européens, ont dicté la recherche de solutions pour :

- Conserver, voire accroître la valeur naturelle et paysagère de l'écosystème riverain en :
  - freinant le recul de la rive et en créant des conditions favorables au maintien voire au développement des biocénoses animales et végétales en place (zones d'eaux calmes ou dormantes, vasières, frayères, roselières…) ;
  - aménageant de nouveaux milieux en zone interdite à la navigation offrant des fonctions de sites d'escale ou de nidification pour l'avifaune (îles, digues…) ;
  - maintenant le fonctionnement écologique de la beine, et en particulier les échanges lac-beine-marais ;
  - testant des ouvrages discrets ou invisibles dans le paysage (ouvrages immergés ou subaffleurants) ;
  - prenant en compte la courantologie locale afin d'éviter des effets érosifs secondaires sur la beine ou sur la rive (réflexion accrue des vagues contre les ouvrages).
- Permettre la poursuite des activités de pêche en :
  - intégrant les contraintes liées à l'exercice de la pêche professionnelle.
- Concilier navigation et baignade en fonction des prescriptions en vigueur.
- Optimiser les coûts, l'efficacité et la durabilité des ouvrages en :
  - privilégiant des constructions faciles à ériger et à entretenir ;
  - testant des ouvrages préfabriqués.

[2] site protégé par Décision de classement (VD, 2001), site Ramsar, site marécageux d'importance nationale (objet n° 206), site paysager et naturel d'importance nationale (objet IFP N°1208), site OROEM N°7: Grandson-Champ-Pittet

3 Organisation, coût et financement

3.1 Organisation

Les travaux de protection du tronçon pilote de Cheseaux-Noréaz ont été réalisés sous la direction de l'ECF-RSLN (Fig. 4). Une ECF permet de conduire un projet d'intérêt public dans le domaine des lacs et cours d'eau, tel que prévu par la loi vaudoise sur la police des eaux (Lvpol du 03.12.1957). Adaptée à chaque cas particulier, l'ECF permet de résoudre plusieurs difficultés majeures, dont les flux financiers et la coordination. Elle est constituée par décision du Conseil d'Etat qui nomme une commission exécutive chargée de diriger le projet selon une mission dont les principes sont énoncés dans un arrêté constitutif. L'ECF est une personnalité morale indépendante de l'Etat. Présidée par le SESA qui en assume aussi le secrétariat, elle est composée de représentants des autorités locales et d'instances directement concernées. Elle a le droit d'expropriation, d'emprunt auprès d'une banque sous la garantie de l'Etat et tient sa propre comptabilité. Elle répond directement au Conseil d'Etat pour tous ses actes administratifs. Une fois sa mission remplie, les opérations immobilières terminées et la comptabilité approuvée, l'ECF est liquidée par le Conseil d'Etat et sa commission exécutive dissoute.

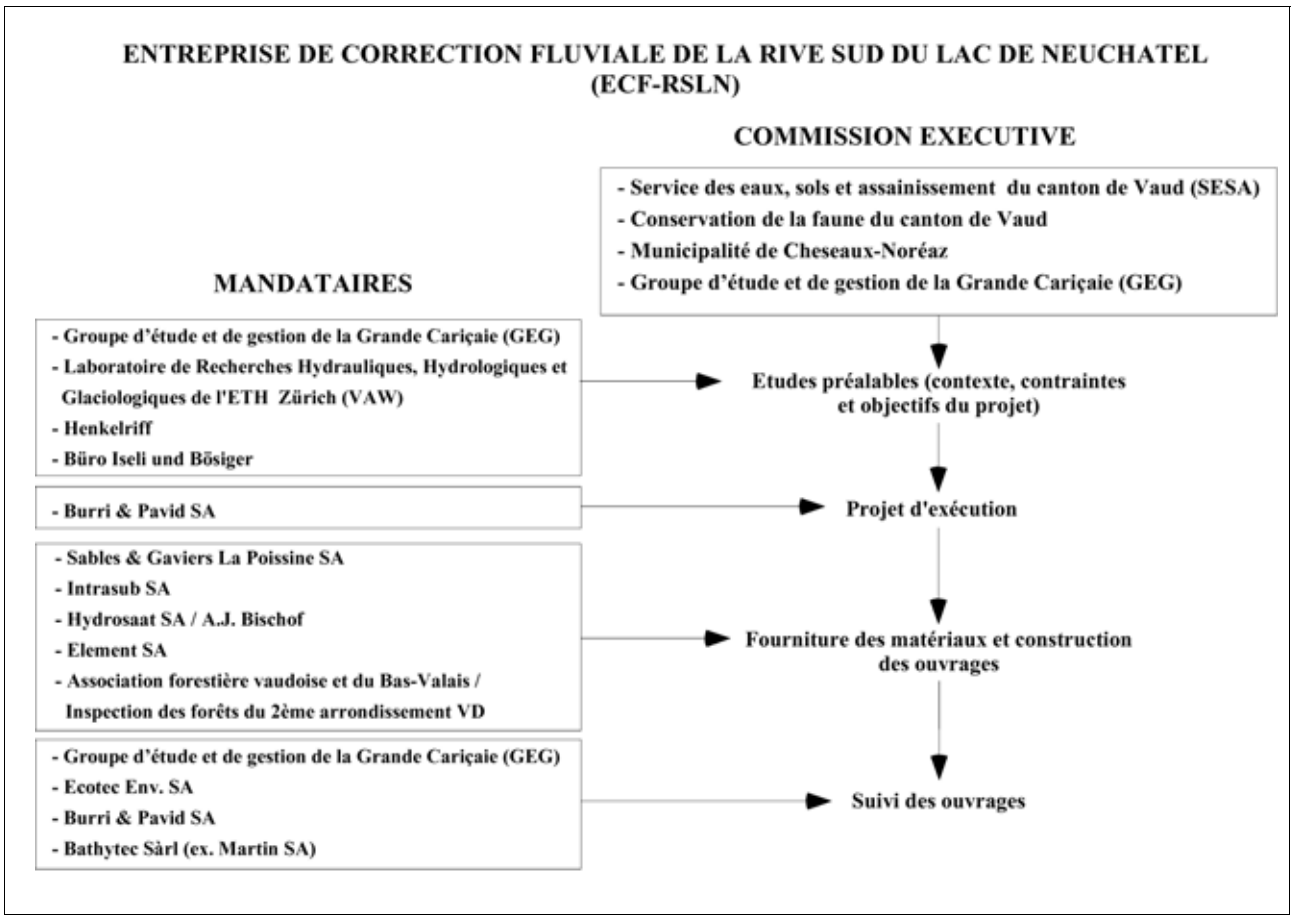


Figure 4: Organisation de l'ECF-RSLN.

3.2 Coût et financement

Le coût total des ouvrages et de leur suivi a été initialement estimé à 8,25 millions à la charge des cantons de Vaud (3,3 millions) et Fribourg (0,15 million) et de la Confédération (4,8 millions). Pour des raisons géologiques et de planification, seuls 31'000 m³ de roche, sur les 62'000 m³ prévus initialement pour la construction des ouvrages en enrochements, ont été fournis par les chantiers autoroutiers de la route nationale A5 (RNA5) sur la Rive nord du lac de Neuchâtel. L'ECF-RSN a partiellement comblé ce déficit en achetant 11'000 m³ de matériaux sur le marché, ce qui n'a finalement permis de protéger que 3 des 4 km de rive initialement prévus. Les coûts effectifs des travaux, y compris les études et les suivis, sont récapitulés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Récapitulatif des prestations et des coûts.

Nature des prestations	**Coûts** (Fr.)
Etudes préalables et frais administratifs	775'000.–
Projet général et direction	655'000.–
Frais administratifs et d'emprunt	120'000.–
Fourniture des matériaux et construction des ouvrages	6'265'000.–
Ouvrages en enrochements	4'555'000.–
Ouvrages en béton	690'000.–
Ouvrages en bois	1'020'000.–
Suivis	520'000.–
Mécanique	35'000.–
Bathymétriques	115'000.–
Biologiques	280'000.–
Suivi scientifique et phase suivante	90'000.–
Total	**7'560'000.–**

Le coût en Francs suisses des fournitures de matériaux et de la construction des ouvrages, par mètre linéaire de rive protégée et par type d'ouvrage, donne :

- Palissades à claire-voie et en pieux jointifs : 1'862.– / m' ;
- Récifs noyés en béton préfabriqué : 1'095.– / m' ;
- Ouvrages lourds en enrochements : 3'445.– / m'.

Ce prix reste indicatif, dans la mesure où la réalisation des ouvrages en pieux jointifs et celle des ouvrages en enrochements ont bénéficié de conditions particulières (fourniture gratuite d'une partie des matériaux). Le coût moyen des ouvrages en enrochements tient compte des prix effectifs des enrochements achetés.

4 Ouvrages réalisés

4.1 Localisation des ouvrages

Le plan de l'Annexe 1 localise les différents ouvrages du tronçon pilote. Leurs caractéristiques générales sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Caractéristiques des ouvrages du tronçon pilote.

Type d'ouvrage	**Nom**		**Longueur** [m]	**Couronnement** [msm]
Ouvrages en enrochements	Digue brise-lames	B2a	125	429.40
		B2b	105	429.95
		B2c	130	429.85
	Ile aux oiseaux	I1	130	431.35
		I2	130	431.35
	Epi	EP1	197	430.15/429.55
		EP2	190	430.15/429.55
Ouvrages en béton	Récif artificiel	R1	411	427.93/427.73
		R2	515	428.53/427.98
Ouvrages en bois	Palissade à claire-voie	P2a	101	429.30/430.20
		P2b	96	429.30/430.20
		P2c	97	429.30/430.20
		P3a	81	429.30/430.20
		P3b	81	429.30/430.20
	Epi en pieux jointifs	EB1	72	429.30/430.20
	Palissade en pieux jointifs	PJb	95	429.30/430.20
		PJc	90	429.30/430.20

Le choix et la disposition des ouvrages testés visent à interrompre ou du moins à diminuer fortement le transport du sable dans la zone proche de la rive.

Les ouvrages placés au large parallèlement à la rive ont pour but de retenir ou d'atténuer les vagues qui déferlent vers le rivage. Ces ouvrages massifs sont en enrochements (digues brise-lames B2a, B2b, B2c et îles aux oiseaux I1, I2) ou en béton (récifs artificiels R1, R2), en raison des sollicitations auxquelles ils sont soumis. Leur emplacement coïncide soit avec la ligne de brisant extérieure, soit avec une ligne parallèle plus rapprochée de la rive. Dans la mesure où ils modifient la disposition des vagues qui s'orientent parallèlement à la rive, trois ouvrages transversaux ont été construits pour atténuer cet effet (épi en pieux jointifs EB1 et épis EP1, EP2).

En bordure de rive, une deuxième série d'ouvrages en bois complète le dispositif de protection du secteur (palissades à claire-voie P2a, P2b, P2c, P3a, P3b, épi en pieux jointifs EB1 et palissades en pieux jointifs PJb, PJc).

4.2 Ouvrages en enrochements

Digues brise-lames (B2a, B2b, B2c)

- Chaque digue brise-lames est constituée d'un géotextile de fond, amarré par des pieux, sur lequel reposent deux digues d'appui, rectilignes et parallèles, formées de blocs de 200 à 400 litres. L'espace entre les digues est rempli d'un noyau de matériaux relativement fin recouvert d'un couronnement de blocs de 250 à 1000 litres (Fig. 5).
- Les digues agissent par dissipation de l'énergie et diffraction des vagues. Elles sont alignées parallèlement à la rive, à une distance de 80 à 120 m de celle-ci, l'écartement entre 2 ouvrages étant de 60 à 90 m. Ce positionnement doit permettre la formation de tombolos (dépôts de sable fin) entre elles et la rive. Elles sont protégées par des enrochements dimensionnés pour résister aux vagues. La plus faible pente du talus exposé au large doit permettre d'amortir les vagues déferlantes et d'empêcher leur réflexion. Le niveau de la crête de chaque digue correspond à une valeur caractéristique du niveau du lac de Neuchâtel (basses eaux (BE), moyennes eaux (ME), hautes eaux (HE)).

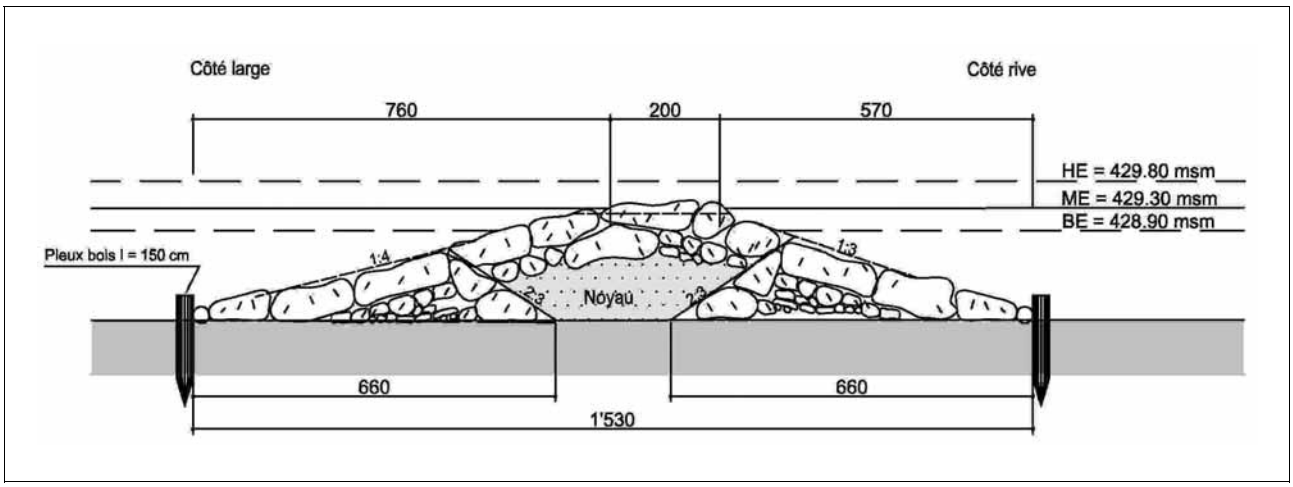


Figure 5: Schéma type d'une digue brise-lames (les cotes sont données en centimètres).

Iles aux oiseaux (I1, I2)

- La structure générale des îles aux oiseaux est semblable à celle des digues brise-lames, à l'exception de leur largeur, de la forme arquée de leurs digues protectrices côté large et de l'absence de couronnement sur le plateau côté rive (Fig. 6).
- Les îles aux oiseaux permettent, comme les digues, de briser les vagues, mais offrent aussi aux canards, laridés (mouettes et sternes) et limicoles, des surfaces d'escale, d'alimentation et de nidification. Cette originalité fonctionnelle a fait privilégier des ouvrages à la forme massive et dont la cote particulièrement élevée des crêtes côté large (431.35 m s. mer) empêche tout déferlement de vagues

susceptible de perturber la nidification. Côté rive, l'aménagement d'un vaste plateau de matériaux fins, que la douceur de la pente rend particulièrement sensible aux battements des eaux du lac, favorise l'escale des laridés et des limicoles.

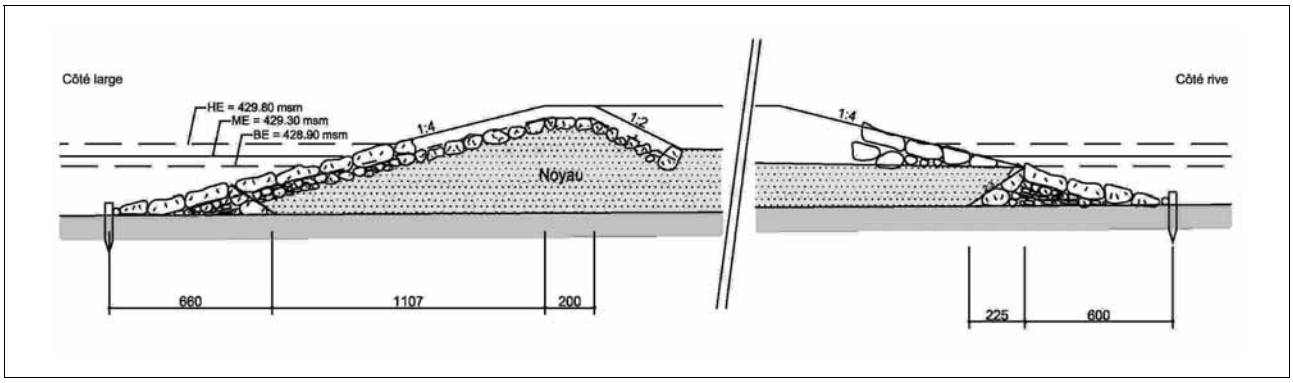


Figure 6: Schéma type d'une île aux oiseaux (les cotes sont données en centimètres).

Epis (EP1, EP2)

- La structure des épis est semblable à celle des digues brise-lames (Fig. 7).
- Leur crête (émergente par eaux moyennes), leur orientation (perpendiculaire à la rive) et leur longueur (environ 200 m) permettent de soustraire d'importantes portions de rive aux effets de la bise et de stopper la migration des sédiments le long du littoral.

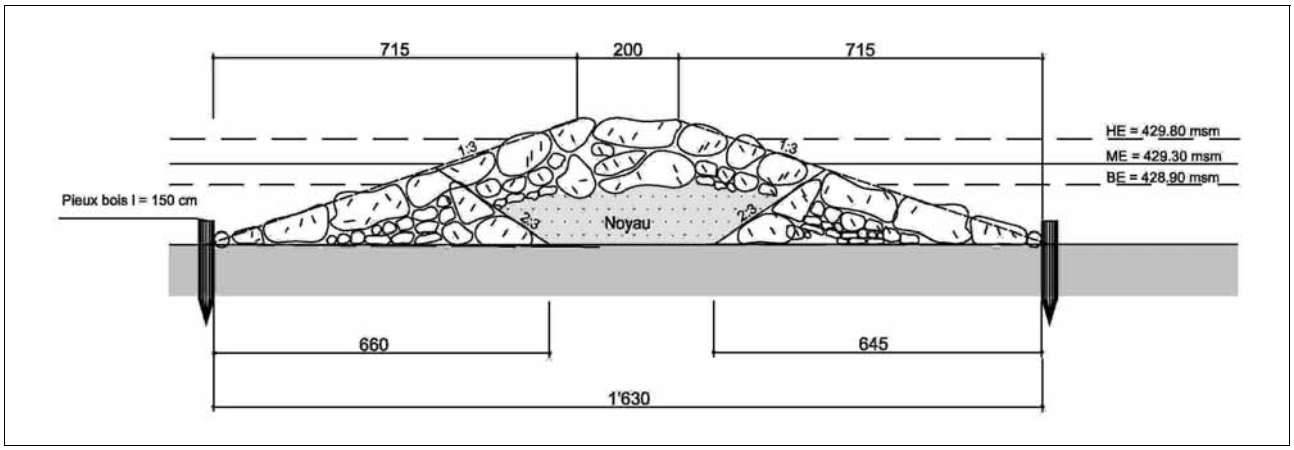


Figure 7: Schéma type d'un épi en enrochements (les cotes sont données en centimètres).

4.3 Ouvrages en béton

Récifs artificiels Henkelriff ® (R1, R2)

- Les éléments constitutifs des récifs sont en béton préfabriqué et d'un poids de 3 tonnes chacun. L'assemblage se fait par un système en queue d'aronde lâche qui permet au récif d'épouser la topographie de la beine (Fig. 8).
- Testés en laboratoire, les récifs artificiels Henkelriff ® obligent les courants lacustres, après franchissement de leur crête, à déposer les sédiments en suspension. Ils empêchent, après réflexion des courants contre le rivage, la migration des sédiments déposés. L'efficacité de ce mécanisme de piégeage de sédiments est conditionnée par la forme des récifs, leur profondeur d'immersion et la distance qui les sépare de la rive à protéger. Ces paramètres ont été adaptés aux caractéristiques du lac de Neuchâtel par le concepteur des récifs, M. G. Henkel.

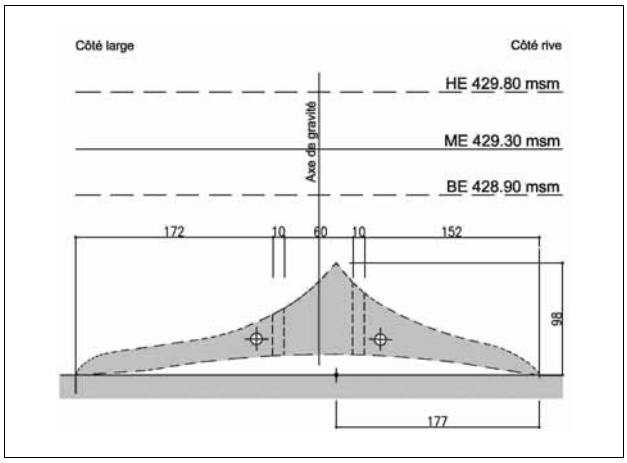


Figure 8: A gauche : schéma type d'un élément de récif artificiel (les cotes sont données en centimètres). A droite : immersion d'un élément.

4.4 Ouvrages en bois

Palissades à claire-voie (P2a, P2b, P2c, P3a, P3b)

- Les palissades à claire-voie sont constituées de 2 rangées de pieux entre lesquelles s'empilent des fascines de saules ou des boudins de coco. Elles ont été implantées parallèlement à la rive, à quelques dizaines de mètres de cette dernière (Fig. 9).
- Testées sur divers lacs européens aux dimensions plus réduites que celui de Neuchâtel, elles freinent, sans les briser, les courants et les vagues.

Epi en pieux jointifs (EB1)

- Un épi en pieux de bois a été construit perpendiculairement à la rive actuelle. Les pieux en bois sont fichés dans le sol côte à côte, avec un léger décalage, de façon à créer une paroi d'environ 30 cm d'épaisseur. Compte tenu de la présence de molasse dure à environ 1 m en dessous du fond actuel du lac, ce qui réduit la fiche possible, l'épi en pieux jointifs a été épaulé des deux côtés par des enrochements (Fig. 9).
- L'effet souhaité de l'épi en pieux jointifs est comparable à celui des épis en enrochements.

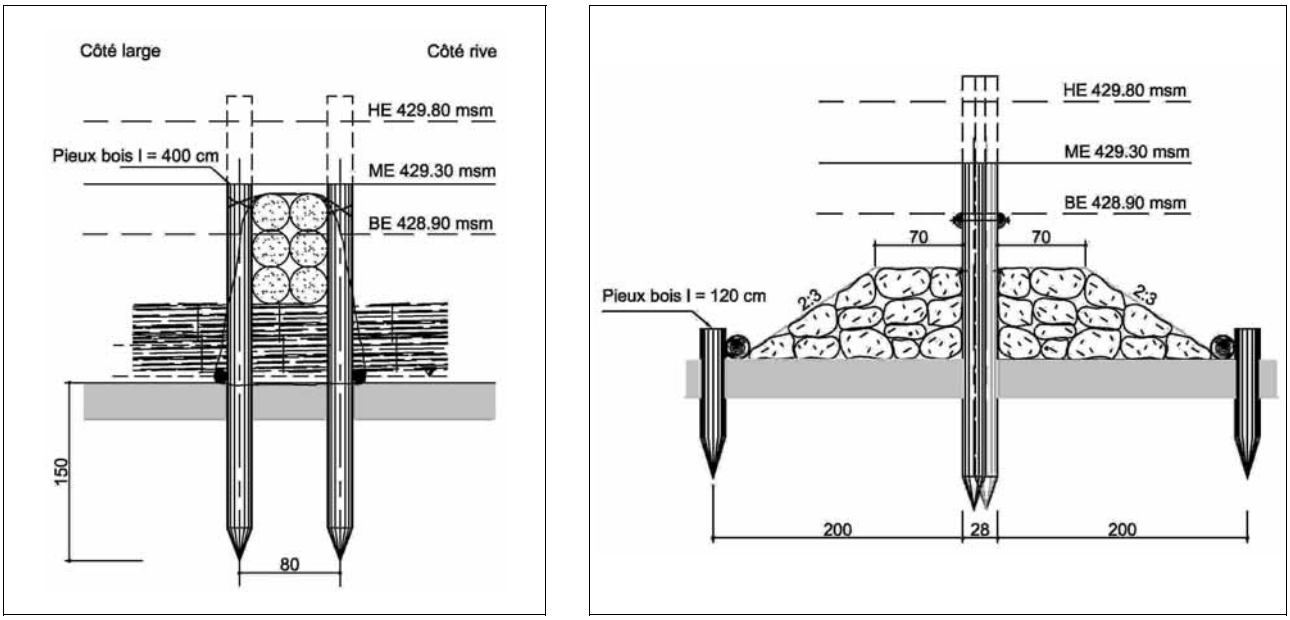


Figure 9: A gauche schéma type d'une palissade à claire-voie.
A droite schéma type d'un épi en pieux jointifs (les cotes sont données en centimètres).

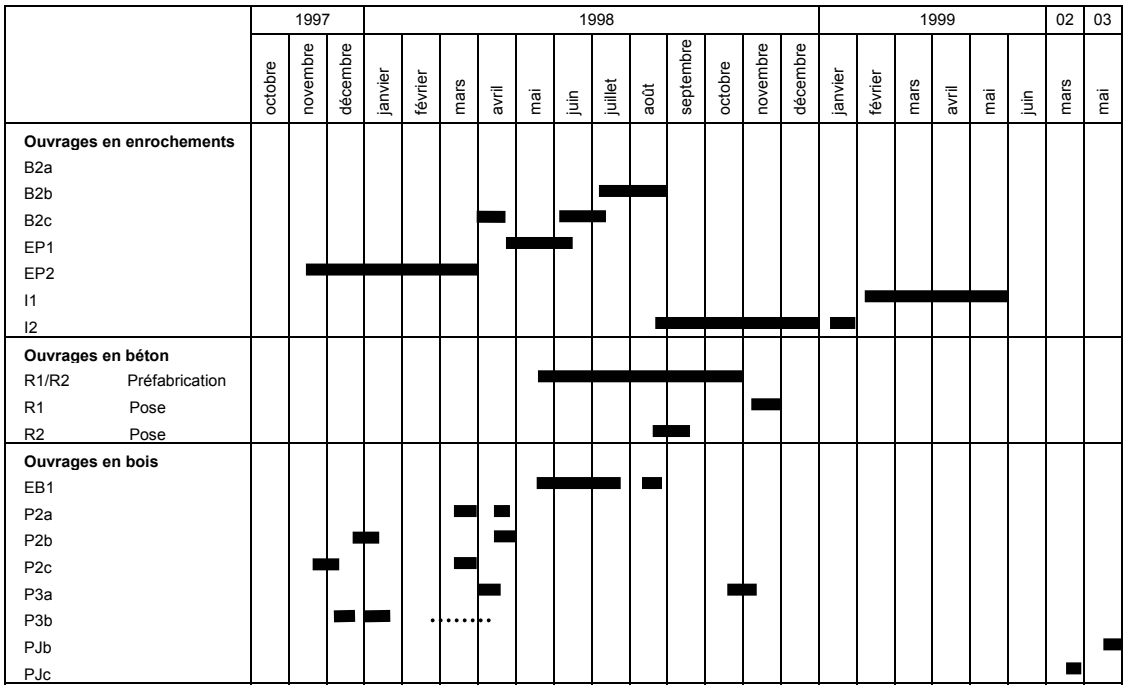
Palissades en pieux jointifs (PJb, PJc)

- Les palissades en pieux jointifs ont été implantées à l'extrémité sud-ouest du tronçon pilote, zone ouverte à la navigation. Les palissades sont parallèles à la rive. Les pieux, disposés en quinconce, ont une longueur d'environ 6 m .
- L'effet souhaité des palissades en pieux jointifs est comparable à celui des palissades à claire-voie.

4.5 Exécution des travaux

Le Tableau 3 résume le déroulement des travaux.

Tableau 3 : Récapitulatif des étapes de réalisation des travaux.



Ouvrages en enrochements

Une analyse préalable de la qualité des enrochements calcaires fournis par les chantiers autoroutiers RNA5 a été réalisée en octobre 1997 par le laboratoire de connaissance des matériaux de l'Ecole d'ingénieurs du canton de Vaud d'Yverdon-les-Bains (EIVD). Les résultats des analyses de résistance, de porosité et de gélivité ont confirmé la bonne qualité des matériaux, vérifiée durant les travaux par des contrôles bi-hebdomadaires. Des problèmes de quantité et de décalage entre extraction et utilisation des matériaux produits par les chantiers autoroutiers RNA5 ont obligé l'achat de blocs auprès de carrières situées à Ste-Croix (VD), Tatüren (FR) et Hauterive (NE). Finalement, le manque de matériaux a conduit au renoncement de la réalisation de 3 digues brise-lames (B1a, B1b, B1c) et d'une île prévue pour être accessible aux baigneurs et aux bateaux (PL1). La pose des géotextiles de fond a parfois été rendue difficile par les coups de vent. Les blocs des couronnements ont été mis en place à l'aide d'un grappin. La cadence d'exécution a été estimée à :

- 3,7 m'/jour pour les digues brise-lames ;
- 1,4 m'/jour pour les îles aux oiseaux ;
- 4,9 m'/jour pour les épis.

Ouvrages en béton

Après approbation de la préfabrication d'un élément d'essai, la production en série des éléments a débuté le 18 mai 1998 en utilisant simultanément 4 moules en acier. Le 30 novembre 1998, les 921 éléments nécessaires à la construction des récifs étaient produits. Ils ont été livrés par camions, puis transbordés sur chaland et mis en place avec une pelle dragline, un plongeur assurant le guidage sous l'eau. La cadence de pose a été de 25 pièces par jour.

Ouvrages en bois

L'exécution des palissades à claire-voie a débuté par le battage des pieux, sur 2 rangs, à partir d'une plate-forme flottante. Les pieux ont été arasés au niveau des hautes eaux du lac. Après un délai de 1 à 3 mois, nécessaire au tassement du sable aux points de battage, les fascines ont été déposées entre les pieux, légèrement compressées et ligaturées (Fig. 10). Elles avaient été préalablement transportées par chaland et déposées à proximité des ouvrages, puis régulièrement arrosées ou noyées afin d'éviter leur dessication. Un 2ème battage des pieux a été réalisé afin de compresser au mieux les fascines. Il est difficile de donner un temps d'exécution des palissades compte tenu des multiples reprises d'exécution suite aux coups de bise de juillet et novembre 1998, ainsi qu'à l'ouragan Lothar de décembre 1999. On peut tout de même indiquer les cadences d'exécution suivantes :

- battage de pieux : 20 pièces/jour
- pose de fascines : 7 m³/jour.

Figure 10:
Pose de fascines de saule dans une palissade à claire-voie.

L'épi et les palissades en pieux jointifs sont exécutés de manière identique. L'épi est perpendiculaire à la rive tandis que la palissade est plus ou moins parallèle.

Les pieux de 18 à 25 cm de diamètres sont foncés en quinconce au moyen d'un mouton installé sur une plate-forme flottante.

Les cadences d'avancement ont été pour :

- l'épi jointif EB1 : 10 pièces/jour avec mouton de 0,8 t
- les palissades en pieux jointifs PJb-PJc : 20–40 pièces/jour avec mouton de 3 t

L'épi en pieu jointifs à été exécuté par une entreprise civile alors que les palissades ont été réalisées par des détachements de pontonniers de l'armée.

Quantité et nature des matériaux mis en œuvre

Le Tableau 4 récapitule les quantités de matériaux mis en œuvre pour la construction des ouvrages.

Tableau 4 : Nature et quantité de matériaux utilisés pour la réalisation des ouvrages.

Type d'ouvrage	**Matériaux**	**Surface** [m²]	**Longueur** [m']	**Volume** [m³]
Ouvrages en enrochements	Enrochements			19'500
	Matériaux pierreux			21'980
	Graviers roulés			320
	Géotextiles	20'600		
	Piquets et longrines		3'750	
Ouvrages en béton	Béton			1'130*
Ouvrages en bois	Pieux		10'600	
	Fascines de saules et boudins de coco			890

* et 82 tonnes d'armature

5 Suivis du tronçon pilote

Le Tableau 5 donne un aperçu des différents suivis réalisés sur le tronçon pilote. Le plan de l'Annexe 2 précise leur localisation.

Tableau 5 : Récapitulatif des suivis réalisés.

Type de suivi		Date de réalisation										
		1979	1993	1994	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Mécanique									X	X	X	X
Bathymétrique	par transect								X			X
	général		X*						X			X
Ligne de rive		X*		X*					X	X*		X*
Sédimentologique					X	X	X		X			X
Biologiques	Végétation											X
	Macrophytes				X		X		X			X
	Macrofaune benthique					X	X		X			X
	Faune piscicole				X		X		X			X
	Avifaune						X	X	X	X	X	X

X : suivi réalisé sur le tronçon-pilote uniquement.

X* : suivi réalisé à l'échelle de toute la Rive sud du lac de Neuchâtel.

Novembre 1997 : début des travaux du tronçon pilote. Mai 2003 : fin des travaux.

5.1 Suivi mécanique

Objectifs

Le suivi mécanique vise à:

- évaluer la résistance des ouvrages aux courants lacustres;
- évaluer le tassement des ouvrages en enrochements.

Méthode

Le suivi mécanique des ouvrages a été effectué, annuellement, par le bureau Burri & Pavid SA. Le contrôle a consisté à relever, avec une précision de l'ordre du cm, les altitudes du couronnement des ouvrages sur des repères matérialisés.

5.2 Suivi bathymétrique

Objectifs

Le suivi bathymétrique vise à:

- évaluer l'influence des ouvrages sur la topographie générale de la beine lacustre;
- évaluer l'influence des ouvrages sur les phénomènes localisés d'accumulation de sédiments ou d'érosion.

Méthode

Un suivi bathymétrique le long de profils disposés au droit des ouvrages a été effectué par le bureau Burri & Pavid SA. Des points d'altitude ont été relevés tous

les 10 m le long de profils référencés à l'aide de points fixes matérialisés. La précision des lectures est de l'ordre du cm., mais l'interprétation des résultats, en raison de la nature et de la mouvance des sédiments, a été faite au dm (± 5 cm). Une bathymétrie de la beine lacustre de toute la Rive sud du lac de Neuchâtel avait été réalisée en 1993. Deux bathymétries du secteur de beine du tronçon pilote délimité par le périmètre d'interdiction à la navigation de l'OROEM no7 ont été réalisées en 2000 et en 2003 par le bureau Bathytec Sârl. La beine a été balayée tous les 10 m avec une embarcation munie d'un Differential Global Positioning System (DGPS) et d'un sondeur, lequel fonctionne à partir de 50 cm de profondeur. Le calibrage et la restitution des mensurations ont été faits au bureau.

5.3 Suivi de la ligne de rive

Objectif

Le suivi de la ligne de rive vise à:

- évaluer l'influence des ouvrages sur la position et la forme de la ligne de rive séparant les marais des eaux libres du lac.

Méthode

Le suivi de la ligne de rive a été réalisé par le GEG par comparaison de photographies aériennes. La ligne de rive a été définie comme celle séparant la végétation riveraine émergente et les eaux libres du lac. Les clichés utilisés proviennent de vols photographiques réalisés par l'Office fédéral de topographie (vol 1979, échelle 1:20'000; vol 1994 et vol 2001, échelle 1:5'000), l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (vol 2000, échelle 1:5'000) et Expo.02 (vol 2003, échelle 1:10'000). Ils ont été redressés par le laboratoire de photogrammétrie de l'EPFL pour les 4 premiers vols et par le Bureau Ulrich, Wiesmann et Rolle SA pour le dernier. La précision des résultats obtenus dépend de la qualité du redressement des photos aériennes et de l'interprétation de la ligne de rive lors de sa restitution. L'erreur due au redressement a été estimée en comparant les levés de terrain et les levés par photogrammétrie pour des points caractéristiques; elle est de l'ordre du mètre pour les photos au 1:20'000 et de 0.25 m pour celles au 1:5'000. L'erreur due à l'interprétation de la ligne de rive lors de sa restitution dépend de la parallaxe, de la présence d'ombre, de l'état de développement et de l'inclinaison de la végétation. Elle est de l'ordre du mètre, même pour des photos à petite échelle. Les lignes de rive restituées ont été découpées en secteurs de 100 m de large, numérotés de 1 à 38 du sud-ouest au nord-est du tronçon pilote. La surface de végétation riveraine émergente perdue ou gagnée d'un état chronologique à l'autre a permis le calcul du recul annuel moyen de la ligne de rive par secteur.

5.4 Suivi sédimentologique

Objectifs

Le suivi sédimentologique vise à:

- évaluer l'influence des ouvrages sur la nature des sédiments des fonds lacustres du tronçon pilote;
- mettre en relation cette influence avec les éventuels changements constatés dans d'autres domaines d'étude (macrofaune benthique, macrophytes et faune piscicole).

Méthode

L'analyse de la granulométrie, de la teneur en matière organique et en calcaire d'échantillons prélevés le long de transects a permis de suivre l'évolution de la nature des sédiments superficiels. Les prélèvements ont été réalisés sur 6 transects (T2 à T7) correspondant aux différents types d'ouvrages et sur le transect T1, qualifié de transect de référence. Sur chaque transect correspondant à un type d'ouvrage, deux stations ont été échantillonnées à l'abri de l'ouvrage et 2 autres au large de l'ouvrage (1 échantillon prélevé par station). Les prélèvements ont été effectués en plongée autonome, au moyen de carottiers en plexiglas de 20 cm de long et 7 cm de diamètre permettant l'extraction d'un volume maximal de 0.7 l (Fig.11).

Figure 11:
Prélèvement d'échantillons de sédiments.

5.5 Suivis biologiques

Avifaune

Objectifs

Le suivi de l'avifaune a pour but de:

- documenter la colonisation des ouvrages par les oiseaux nicheurs;
- évaluer l'incidence des ouvrages sur les populations d'oiseaux d'eau de la réserve naturelle (cycle annuel, évolution des effectifs à long terme).

Méthode

Le suivi de l'avifaune nicheuse, en particulier des laridés (sternes, mouettes, goélands), a été conduit dès la fin de la réalisation des ouvrages. La première visite des îles a eu lieu en 1999. Sitôt la présence de nicheurs attestée, les contrôles ont été renforcés à raison d'une visite tous les 15 jours de mi-avril à mi-juillet, afin de dénombrer les nids, procéder au baguement des jeunes, relever d'éventuelles pontes de remplacement et évaluer ainsi le succès de reproduction des nicheurs. La fonction de site d'escale pour l'avifaune des ouvrages a été suivie par les observateurs en charge des recensements des oiseaux d'eau du secteur Champ-Pittet – Yvonand.

Faune piscicole

Objectifs

Le suivi de la faune piscicole a pour but de:

- évaluer l'influence des ouvrages sur les populations de la faune piscicole, sa diversité et la reproduction des espèces;
- déterminer les principales espèces bénéficiaires des nouvelles conditions d'habitat et de reproduction;
- évaluer l'incidence des ouvrages sur l'exercice de la pêche professionnelle.

Méthode

Le suivi de l'évolution des peuplements piscicoles a été réalisé en effectuant des plongées nocturnes, au mois d'août, le long des transects utilisés pour le suivi des caractéristiques des sédiments et des macroinvertébrés benthiques. Le transect T2 a été qualifié de transect de référence. L'abondance des espèces présentes a été relevée. Des pêches électriques ont été effectuées sur 3 sites (2 dans le système lagunaire de Champ-Pittet et 1 sur la beine à proximité du transect T4) et des contacts répétés ont été établis avec les pêcheurs. Ces démarches ont apporté des compléments d'information concernant la valeur de certains sites comme lieu de reproduction et l'impact des ouvrages sur les activités de la pêche professionnelle.

Macroinvertébrés benthiques

Objectifs

Le suivi des macroinvertébrés benthiques a pour but de:

- évaluer l'influence des ouvrages sur la nature des fonds lacustres (texture et niveau trophique des sédiments);
- décrire l'évolution de la structure des peuplements d'invertébrés benthiques;
- apprécier l'évolution quantitative des ressources alimentaires pour les poissons et l'avifaune lacustre.

Méthode

Les échantillons prélevés dans le cadre du suivi des caractéristiques des sédiments ont servi au suivi des macroinvertébrés benthiques. Pour chacun d'eux l'abondance relative des taxons indicateurs de la classe des oligochètes et de la famille des chironomidés a été déterminée. En complément, l'abondance de gros mollusques tels que la moule zébrée (*Dreissena polymorpha)* ou l'anodonte des cygnes (*Anodonta cygnea*) a été relevée le long des transects lors du prélèvement des échantillons de sédiments.

Végétation

Objectif

Le suivi de la végétation a pour but de:

- décrire l'évolution du couvert végétal sur les ouvrages en enrochements émergés.

Méthode

Des relevés ont été réalisés dès 2003 sur les ouvrages en enrochements émergés. Le recouvrement au sol de la strate arbustive, de la strate herbacée et de chaque espèce végétale a été évalué pour chaque ouvrage ou partie d'ouvrage. Les périmètres des stations et le recouvrement de certaines espèces de la liste rouge et des néophytes de la liste noire ont été notés. L'identification des espèces a été faite selon AESCHIMANN D. et al. (1989). La nomenclature adoptée est celle de AESCHIMANN D. et al. (1996).

Macrophytes

Objectif

Le suivi des macrophytes a pour but de:

- évaluer l'influence des ouvrages sur le développement des herbiers de macrophytes et de leur diversité.

Méthode

Les périmètres des herbiers de macrophytes du tronçon pilote ont été relevés sur photos aériennes. Des campagnes de terrain ont permis de préciser ces périmètres et de les subdiviser en surfaces jugées homogènes selon l'évaluation de la diversité des espèces de macrophytes présentes, de l'abondance relative de ces espèces (selon 5 classes) et de la densité de l'herbier (selon 3 classes). Ces 3 paramètres ont été déterminés pour chaque surface relevée.

6 Stabilité et effets des ouvrages

6.1 Stabilité des ouvrages

Les tassements principaux relevés pour les ouvrages en enrochements se sont produits lors de leur mise en place. Des tassements très faibles, de l'ordre du centimètre et dans la fourchette de précision des nivellements, ont été relevés ultérieurement. Quelques mouvements de blocs particulièrement exposés aux vagues de bise ont été notés en 2001, mais se sont stabilisés depuis. Le brise-lames B2a, dont le niveau de la crête correspond à celui du niveau moyen des eaux, présente une dissymétrie granulométrique : l'accumulation constatée de petits blocs côté rive pourrait être le résultat du travail des vagues déchaussant les blocs de sertissage du couronnement côté large et les projetant côté rive.

Les récifs artificiels ont subi, peu après leur mise en place, de faibles rotations des éléments préfabriqués qui s'expliquent par le décalage entre le centre de gravité et l'axe géométrique transversal d'une part, et par le jeu indispensable entre tenons et mortaises d'autre part. Cela s'est traduit par de petits décrochements en dents de scie le long de l'arête longitudinale supérieure des récifs. Un tassement localisé à l'extrémité nord-est du récif R1 a été observé en 2002 et s'est poursuivi (environ 17 cm de tassement entre 2002 et 2003). Ce tassement pourrait s'expliquer par la pression des courants sur la face verticale des éléments de cette extrémité de récif à laquelle s'ajouterait celle des courants déviés par l'ensemble du récif et par l'épi voisin.

L'observation des différents types d'ouvrages en bois a permis de constater que les épis et les palissades en pieux jointifs n'ont pas subi d'altération particulière. Par contre les courants et le gel ont déstabilisé puis détruit rapidement les fascines de saule des palissades à claire-voie. L'entretien des fascines par recépage et le remplacement par des boudins de coco des fascines arrachées s'est révélé inefficace. Par contre la pose, sur la palissade à claire-voie P2a, de gabions plastifiés et ligaturés entre eux est concluante après 3 ans d'observation.

6.2 Effets des ouvrages sur la topographie de la beine

Résultats du suivi bathymétrique par transect

Une accumulation de sédiments est constatée au pied de tous les ouvrages, principalement côté rive, et sur la face exposée à la bise (face nord est) des ouvrages en enrochements. Un affouillement est par contre constaté au large des ouvrages.

Les récifs artificiels ont permis l'accumulation de sédiments sur leur face exposée à la bise (face nord est) et à leur pied, côté rive. Un affouillement est par contre constaté au large des ouvrages.

Les palissades à claire-voie ne présentent pas de tendance nette.

Une synthèse des résultats de ce suivi est présentée dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Synthèse des résultats des relevés bathymétriques par transect au droit des ouvrages.

Type d'ouvrage	Nom		Tendance	Localisation
Ouvrages en enrochements	Digue brise-lames	B2a	- (40 cm) + (30 cm) - (60 cm)	Au large de l'ouvrage Entre l'ouvrage et la rive A la rive
		B2b	+ (63 cm)	Au pied de l'ouvrage
		B2c	- (30 cm) + (33 cm), – (20 cm) + (70 cm)	Au large de l'ouvrage Au pied de l'ouvrage A la rive
	Ile aux oiseaux	I1	+ (100 cm) + (60 cm)	Au pied de l'ouvrage Entre l'ouvrage et la rive
		I2	+ (60 cm) + (70 cm)	Au pied de l'ouvrage Entre l'ouvrage et la rive
	Epi	EP1	+ (40 cm)	Au pied de l'ouvrage
		EP2	+ (25 cm)	Au pied de l'ouvrage
Ouvrages en béton	Récif artificiel	R1	- (30 cm) + (70 cm), – (50 cm)	Au large de l'ouvrage Entre l'ouvrage et la rive
		R2	- (50 cm) + (50 cm) + (20 cm), – (50 cm)	Au large de l'ouvrage Au pied de l'ouvrage Entre l'ouvrage et la rive
Ouvrages en bois	Palissade à claire-voie	P2a P2b P2c	+ (75 cm), – (55 cm)	Entre l'ouvrage et la rive
		P3a P3b	+ (50 cm)	A la rive

Résultats du suivi bathymétrique général

Dans les secteurs de beine lacustre non protégés, soit au large des ouvrages et au sud-ouest du tronçon pilote, les mouvements de sédiments sont de faible amplitude (± 50 cm max.) et sont orientés NE–SO (effet dominant des vagues de bise). A la limite séparant le tronçon pilote des eaux profondes du lac, soit sur le mont de la beine lacustre, de petits ravins se sont formés, probablement générés par les courants réfléchis vers le large par les ouvrages.

Dans le secteur protégé par les ouvrages, délimité par l'île aux oiseaux I1 et l'épi en enrochements EP2 pour ses petits côtés et par les récifs artificiels et la rive pour ses grands côtés, les surfaces d'accumulation de sédiments prédominent, principalement à l'abri des ouvrages en enrochements, un peu moins derrière les récifs artificiels. L'effet protecteur de ces ouvrages se traduit par un changement net d'orientation des ripple-marks qui tendent à devenir parallèles à la rive, signe caractéristique de la transition d'une dynamique d'érosion vers une dynamique d'accumulation.

6.3 Effets des ouvrages sur la ligne de rive

La Figure 12 présente les résultats du recul annuel de la ligne de rive avant la construction du tronçon pilote (1979–1994) et après celle-ci (2000–2003). Les secteurs 1 à 6, dont la protection par les palissades en pieux jointifs P1b et P1c a été achevée début 2003, servent de secteurs témoins. Les secteurs 7 à 11, non protégés, n'ont pas été retenus comme secteurs témoins en raison du particularisme de la rive à cet endroit (lagune en contact avec des étangs intérieurs). Les secteurs 12 à 38, protégés par le solde des ouvrages du tronçon pilote, servent de secteurs tests.

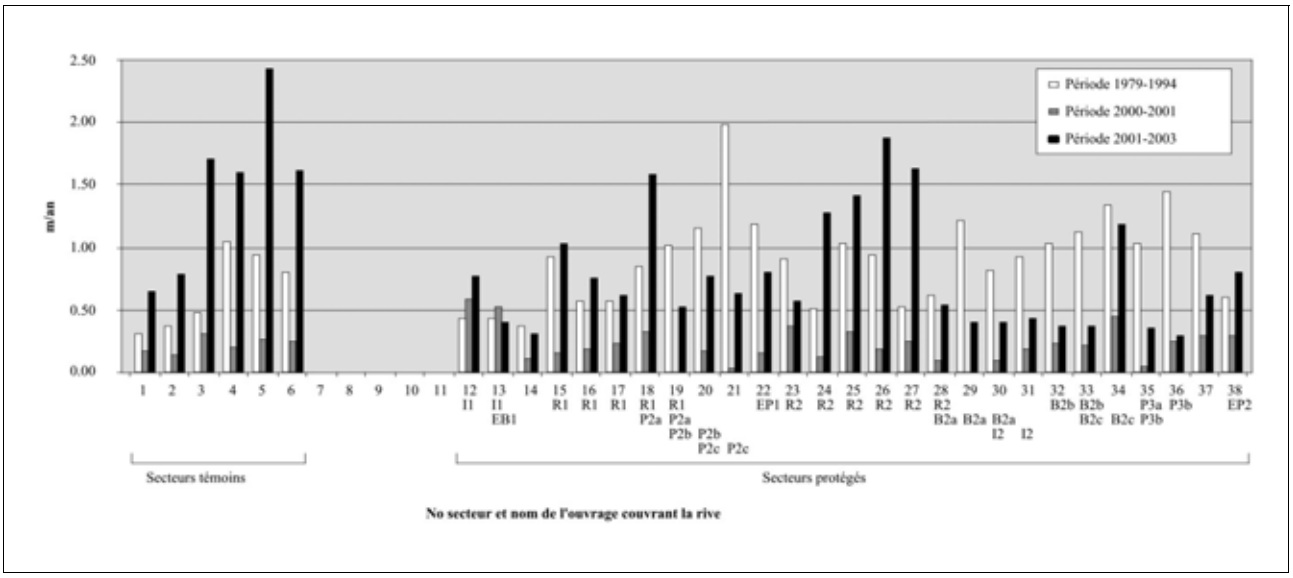


Figure 12: Recul de la ligne de rive par secteur de 100 m.

Les différences annuelles de recul constatées entre 2000–2001 et 2001–2003 doivent être interprétées avec précaution. Une superposition des photos de 2000 et 2001 montre en effet que le relevé de la ligne de rive de 2000 est plus approximatif que celui de 2001 en raison de la date tardive du vol de 2000 (juillet au lieu de mai) et du développement déjà important des roseaux (masquage partiel de la ligne de rive). La comparaison des résultats a de fait été axée sur les périodes 1979–1994 et 2001–2003.

La comparaison des résultats pour ces deux périodes montre une évolution différenciée du recul de la rive suivant les secteurs considérés. Le recul annuel a augmenté pour les secteurs témoins, passant de 0.7 m/an pour la période 1979–1994 à 1.5 m/an pour la période 2001–2003. Il diminue en revanche pour les secteurs tests, passant de 0.9 m/an à 0.8 m/an. Certains d'entre eux enregistrent même, depuis 2000, une avance de la ligne de rive, notamment à l'arrière des îles aux oiseaux, de la digue brise-lames B2a et des palissades à claire-voie (Fig. 13).

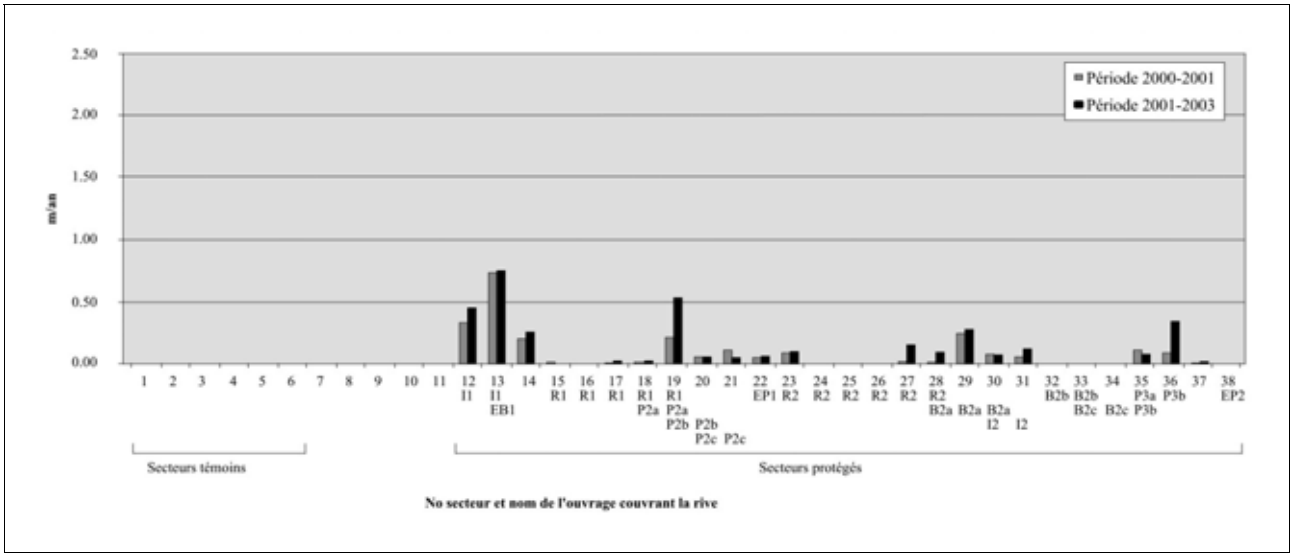


Figure 13: Avance de la ligne de rive par secteur de 100 m.

Les ouvrages semblent avoir une action différenciée sur le recul de la rive en fonction de leur type (Tab. 7).

Tableau 7 : Recul annuel moyen de la ligne de rive par ouvrage ou groupe d'ouvrages (m/an).

Secteurs témoins				**1979–1994**	**2001–2003**
				Recul (m/an)	
				0.7	1.5
Secteurs protégés	**Type d'ouvrage**	**Nom**			
	Ouvrages en enrochements	Digue brise-lames	B2a B2b B2c	1.0	0.6
		Ile aux oiseaux	I1	0.4	0.6
			I2	0.9	0.4
		Epi	EP1	1.2	0.8
			EP2	0.6	0.8
	Ouvrages en béton	Récif artificiel	R1	0.8	0.9
			R2	0.7	1.2
	Ouvrages en bois	Palissade à claire-voie	P2a P2b P2c	1.3	0.9
			P3a P3b	1.3	0.4
		Epi en pieux jointifs	EB1	0.4	0.4

Certains ouvrages en enrochements, notamment les digues brise-lames B2a, B2b et B2c et l'île aux oiseaux I2, semblent protéger plus efficacement la rive que les récifs artificiels à l'arrière desquels le recul se poursuit. Les palissades à claire-voie, proches de la rive, combinées à des ouvrages en enrochements au large, ont le plus nettement freiné la vitesse du recul.

6.4 Effets des ouvrages sur la sédimentation

Les échantillons prélevés avant travaux présentent, pour tous les transects, une granulométrie à forte prédominance sableuse (>90%) et à faible proportion de particules fines (<10%) (Fig. 14).

Après travaux, la proportion de particules fines, les teneurs en matière organique et en calcaire ont augmenté pour les échantillons prélevés à l'abri des ouvrages en enrochements. L'augmentation de la proportion en particules fines est la plus forte à l'abri de l'épi en enrochements EP1 (65% en 2003). Elle est un peu plus faible à l'abri de l'île aux oiseaux I2 et de la digue brise-lames B2c. La proportion de particules fines a augmenté à l'abri de la palissade à claire-voie P2b ainsi qu'au large, du fait de l'influence de la palissade à claire-voie P2c et de l'épi EP1. En 2003, la teneur en particules fines est corrélée avec la teneur en calcaire et avec le taux de matière organique.

Les récifs artificiels n'ont par contre pas modifié la granulométrie des sédiments.

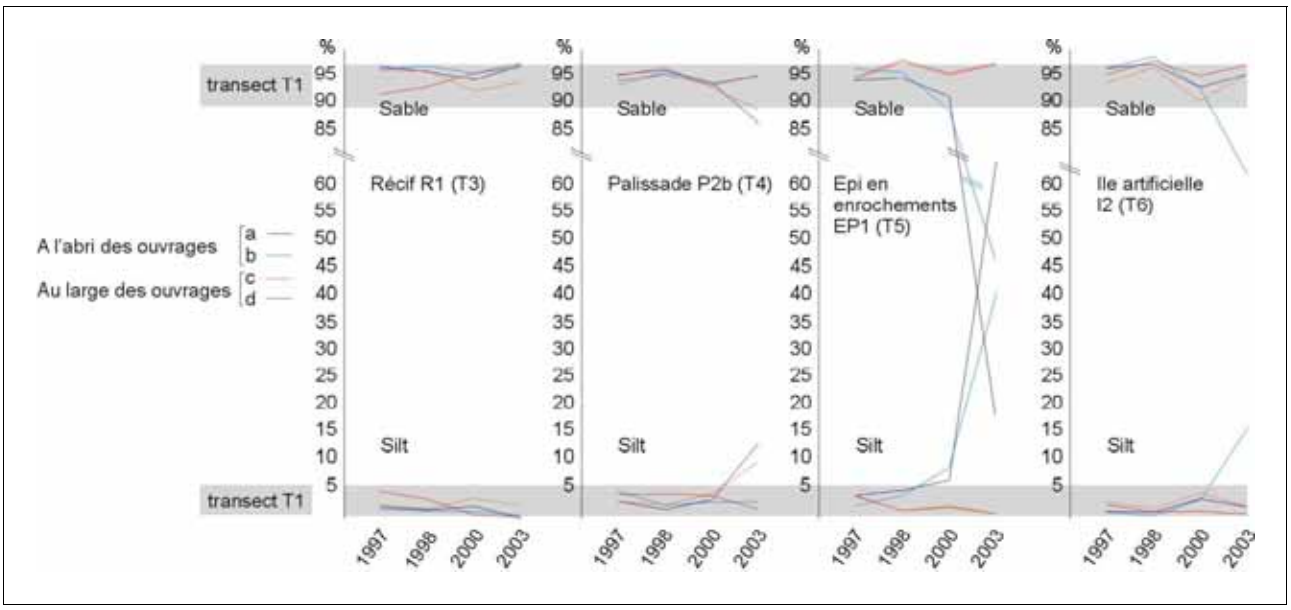


Figure 14 : Comparaison des pourcentages de sable et de silt entre les ouvrages T3, T4, T5 et T6. Le paramètre argile [%] obéit à la même tendance que le silt [%] ; il n'a pas été reporté sur la figure afin de ne pas la surcharger. Le transect T1 a servi de référence (ouvrage non réalisé) ; sa granulométrie est illustrée par les champs grisés.

6.5 Effets des ouvrages sur la faune et la flore

Avifaune

Nidification

Les relevés et suivis réalisés ont montré que les ouvrages exerçaient une attractivité différente sur l'avifaune suivant leur date de réalisation, la nature de leurs matériaux et le risque de submersion par le lac. Le Tableau 8 rend compte de la multifonctionnalité des ouvrages du tronçon pilote pour l'avifaune.

Tableau 8 : Fonctionnalité des ouvrages pour l'avifaune.

Type d'ouvrage	Nom de l'ouvrage		Nidification	Escale	Repos
Ouvrages en enrochements	Digue brise-lames	B2a B2b	-	-	-
		B2c	+++	+	+
	Ile aux oiseaux	I1	+	++	++
		I2	+++	++	++
	Epi	EP1	potentiel	-	-
		EP2	(+)	-	-
Ouvrages en béton	Récif artificiel	R1 R2	-	-	-
Ouvrages en bois	Palissade à claire-voie	P2a P2b P2c P3a P3b	-	-	+
	Epi en pieux jointifs	EB1	-	-	+
	Palissade en pieux jointifs	PJb PJc	-	-	+

- = fonction inexistante,

(+) = fonction remplie à un moment du suivi,

\+ = fonction remplie tout au long du suivi (plus ou moins bien suivant le nb de +).

Les îles aux oiseaux et le brise-lames B2c attirent plus spécifiquement les oiseaux. Le Tableau 9 illustre le succès de ces ouvrages en enrochements pour la nidification des mouettes, sternes et goélands, les deux premières étant des espèces prioritaires et menacées en Suisse. Les effectifs relevés en 2003 correspondent environ au 30% de la population totale de mouettes rieuses nicheuses en Suisse, à 15% de celle de sternes pierregarins et à 14% de celle de goélands. Avant même qu'ils ne soient achevés, ces ouvrages ont attiré les oiseaux et répondu aux objectifs biologiques complémentaires qui leur avaient été donnés. Au printemps 1998 la digue brise-lames B2c, en cours de construction, accueillait déjà trois couples de sternes. Par la suite, l'île aux oiseaux I2, achevée durant l'hiver 1998–1999, est devenue le site de nidification privilégié des laridés. Mais l'envahissement progressif de cette île par les goélands, ainsi que la prédation exercée par cette espèce sur les mouettes et les sternes ont conduit ces dernières à quitter l'île pour s'installer, dès 2002, sur le brise-lames B2c. Le niveau de crête de cet ouvrage (429.85 m) préserve une partie des enrochements d'une submersion en période de reproduction. Les gros blocs de son couronnement, aux faces supérieures planes, favorisent l'établissement des nids et l'absence de tout-venant entre les blocs permet aux jeunes mouettes et sternes de

se réfugier dans les anfractuosités, tout en limitant la colonisation par la végétation. Cet ouvrage a permis la nidification de 110 couples de mouettes rieuses en 2002 et 220 couples en 2003. La réussite de la reproduction a été excellente en 2003 avec environ 310 jeunes à l'envol, soit un succès de reproduction élevé de 1,4 jeune/nid.

Tableau 9 : Evolution du nombre de nids d'oiseaux sur les ouvrages en enrochements (* nichées abandonnées).

Type d'ouvrage	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Brise-lames B2c						
Canard colvert *(Anas platyrhynchos)*					1	3
Mixte colvert/nette						3
Nette rousse *(Netta rufina)*						1
Mouette rieuse *(Larus ridibundus)*					110	220
Sterne pierregarin *(Sterna hirundo)*	3				38	60
Foulque macroule *(Fulica atra)*					3	4
Ile aux oiseaux I2						
Oie cendrée *(Anser anser)*					1	1
Canard colvert *(Anas platyrhynchos)*			1	3	3	2
Mixte colvert/nette						2
Nette rousse *(Netta rufina)*			1		2	1
Petit gravelot *(Charadrius dubius)*			1	1		
Mouette rieuse *(Larus ridibundus)*			45	140	200*	
Goéland leucophée *(Larus cachinnans)*		1	1	1	35	105
Sterne pierregarin *(Sterna hirundo)*		3	12	13	2*	
Foulque macroule *(Fulica atra)*				2	3	3
Ile aux oiseaux I1						
Canard colvert *(Anas platyrhynchos)*			1	1		
Mixte colvert/nette						1
Nette rousse *(Netta rufina)*			1			
Petit gravelot *(Charadrius dubius)*			1	1	1	1
Goéland leucophée *(Larus cachinnans)*			1	1	4	2
Bergeronnette grise *(Motacilla alba)*		1		1	1	1
Foulque macroule *(Fulica atra)*				1		

Terminée en mai 1999, l'île aux oiseaux I1, malgré une construction analogue à I2 et l'aménagement d'un lit de boulets à l'intention des sternes, exerce pour l'heure une attractivité plus faible. Le comportement grégaire des laridés pourrait être à l'origine de cette différence.

Deux autres espèces remarquables montrent depuis 2002 un intérêt pour les ouvrages. Il s'agit de l'oie cendrée et de la nette rousse dont la nidification relève, notamment pour l'oie, d'une des premières en Suisse pour des oiseaux d'origine sauvage.

Les ouvrages en liaison directe avec la rive, limitrophes de secteurs ouverts à la navigation et à la baignade et accessibles au public comme l'épi EP2, se révèlent moins attractifs pour l'avifaune, en raison des dérangements occasionnés par l'homme.

Migration et hivernage

Tous les ouvrages émergés sont utilisés comme sites d'escale par les oiseaux migrateurs. Les pieux servent de sites de repos pour le grand cormoran et les laridés. Les îles aux oiseaux et l'épi EP1, interdits d'accès, constituent les principaux sites de repos ou de dortoir pour diverses espèces (grande aigrette *(Egretta alba),* anatidés et laridés) et de biotopes d'alimentation à certains oiseaux des rivages comme les limicoles (bécasseaux, chevaliers, gravelots, courlis etc) (Fig. 15). La plupart des espèces migratrices de laridés et de limicoles observables sur les bancs de sable et les grèves naturels ont déjà été observées, mais en effectifs moindre, sur les îles aux oiseaux. Les ouvrages émergés constituent également des protections pour les oiseaux lorsque le lac est agité. Par forts vents, on observe régulièrement des rassemblements d'oiseaux d'eau sur les hauts-fonds lacustres à l'abri de ces ouvrages.

Figure 15: A gauche : envol de laridés sur l'île aux oiseaux I2. A droite : la mouette rieuse, espèce prioritaire et menacée en Suisse, a colonisé la digue brise-lames B2c.

Les résultats des comptages mensuels (2002) d'oiseaux d'eau effectués dans le périmètre du tronçon pilote montrent des effectifs d'oiseaux d'eau relativement faibles, de l'ordre de 300 à 500 individus. Ces effectifs augmentent légèrement en période de reproduction (avril à juin) grâce aux colonies de laridés et atteignent leurs maxima en fin d'automne. Les résultats des recensements internationaux de novembre et de janvier, pour les 10 derniers hivers, montrent une tendance à l'accroissement des hivernants depuis l'hiver 2000 /01 (Fig. 16).

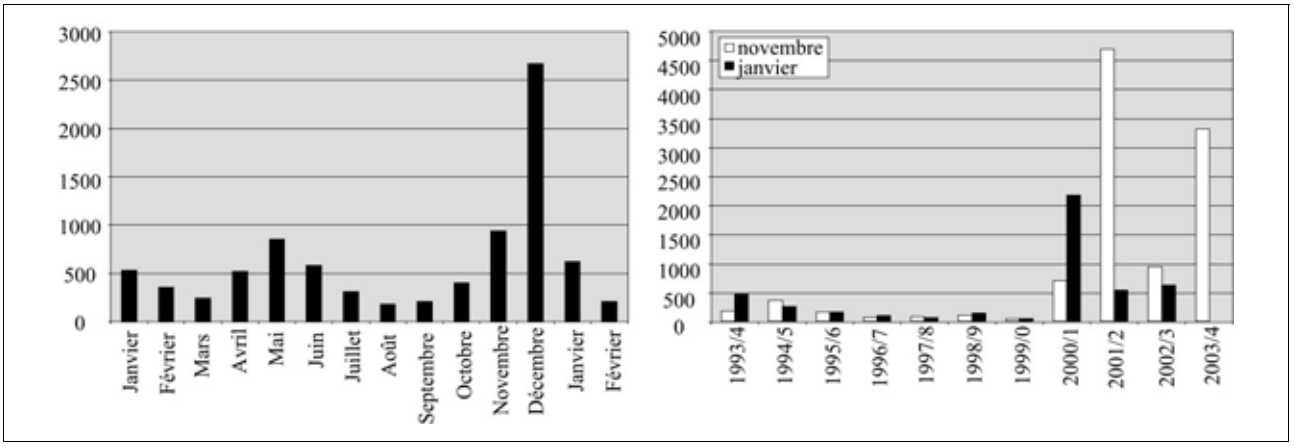


Figure 16: A gauche : Evolution (2002) des populations d'oiseaux d'eau de la réserve des Grèves de Cheseaux. A droite : Résultats des recensements internationaux des hivernants des 10 dernières années dans la réserve des Grèves de Cheseaux.

Cette augmentation des effectifs met en évidence l'attractivité accrue de cette réserve pour les oiseaux, due à la présence des ouvrages qui diversifient les possibilités d'accueil (reposoirs, eaux abritées) et à l'accroissement de l'offre alimentaire fournie par le développement des herbiers de macrophytes, l'augmentation s'étant surtout manifestée chez les herbivores (fuligule milouin et nette rousse) (Fig. 17).

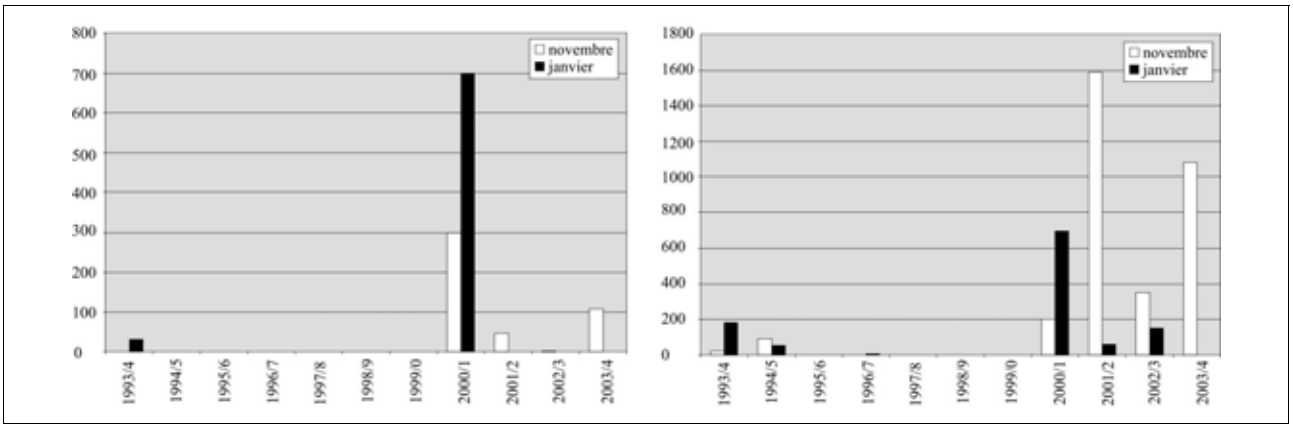


Figure 17: Evolution des effectifs de fuligule milouin (à gauche) et de nette rousse (à droite) dans la réserve des Grèves de Cheseaux.

Faune piscicole : Résultats du suivi – évolution 1996–2003

A) Plongées nocturnes

Les principaux résultats observés lors des plongées nocturnes sur les transects T2 à T7 sont énoncés ci-après :

- La diversité totale des espèces recensées sur le tronçon pilote est comparable depuis 1996 (7–8 espèces). Seules 3 à 5 espèces ont été recensées en 2000 et 2003 à l'abri des ouvrages; ces dernières sont, par ordre d'abondance : la perche *(Perca fluviatilis),* le gardon *(Rutilus rutilus),* le brochet *(Esox lucius),* la brème franche *(Abramis brama)* et la loche franche *(Barbatula bar-batula).*
- L'ensemble des espèces observées sur le tronçon pilote ont été recensées lors de suivi antérieurs sur la Rive sud du lac de Neuchâtel. Le goujon *(Gobio gobio)* et l'ablette *(Alburnus alburnus)* sont à nouveau observés dans la beine du tronçon pilote; ces derniers avaient fortement régressé dans les années 80 (comm. pers. Ph. Oberson, 2003).
- L'abondance des poissons adultes et sub-adultes sur la beine du tronçon pilote est très faible et identique sur toute la durée du suivi. Les plus faibles densités de poissons sont observées au large des ouvrages alors que les plus fortes se situent dans les herbiers de characées de faible densité à l'abri des ouvrages. Ainsi, des densités particulièrement élevées de gardons et de perches (stade juvénile, 5 à 10 individus/m) sont observées à l'abri de l'épi en enrochement [EP1] et de l'île aux oiseaux [I2]. Les poissons ne semblent par contre pas coloniser les herbiers denses d'élodées et de potamots.
- L'écrevisse américaine *(Orconectes limosus)* est omniprésente sur le tronçon pilote et plus particulièrement aux abords de certains ouvrages, tels que l'île aux oiseaux [I2].

B) Pêches électriques

Les résultats des pêches électriques permettent les constatations suivantes:

- La diversité des espèces capturées « toute classe d'âge confondue » demeure relativement stable depuis le début du suivi (11 sp. en 1996 / 13 sp. en 1998 / 13 sp. en 2000). La diversité ichtyologique totale observée depuis 1996 est de 14 espèces.
- La diversité des espèces au stade juvénile tend à augmenter depuis le début du suivi (7 espèces en 1996 et 1998 / 12 sp. en 2000). Ce constat confirme les potentialités élevées du site pour la reproduction de la faune piscicole.
- Les peuplements piscicoles échantillonnés sont essentiellement composés de trois espèces : la bouvière *(Rhodeus amarus),* le gardon *(Rutilus rutilus)* et la perche *(Perca fluviatilis).* Les effectifs de la loche de rivière *(Cobitis taenia),* espèce menacée, et de la bouvière *(Rhodeus amarus),* espèce fortement menacée, ne montrent pas d'évolution significative depuis la construction des ouvrages. Par ailleurs seuls quelques juvéniles de brochet *(Esox lucius)* ont été recensés à proximité de la lagune de Champ-Pittet.
- Les résultats des pêches électriques présentent de grandes disparités entre les campagnes effectuées en 1996, 1998 et 2000. Cette disparité est à mettre en relation avec les fortes variations interannuelles d'abondance de certaines espèces, telles que la perche par exemple.

Figure 18:
Banc de perches.

Analyse de l'effet des ouvrages

Les plongées nocturnes et les pêches de sondage ont mis en évidence quelques modifications du peuplement piscicole en relation avec la réalisation des ouvrages. Toutefois, ces constations se limitent à des tendances générales. Les possibilités de déplacement élevées de la faune piscicole et/ou les fortes variations inter-annuelles de certaines espèces ne permettent pas de tirer des conclusions pour la période de suivi considérée.

Ouvrages en enrochements

- Des densités de poissons juvéniles très élevées sont observées à l'abri des ouvrages, tout particulièrement pour l'épi en enrochements [EP1] et l'île aux oiseaux [I2].
- Une concentration d'espèces benthiques et/ou lithophiles (lotte *(Lota lota),* chabot *(Cottus gobio),* loche franche), localisée aux abords des ouvrages en enrochements (épi, île, brise-lames) est mise en évidence lors du suivi réalisé en l'an 2000.

Récifs artificiels

- Aucune modification significative du peuplement piscicole n'est mise en évidence pour ce type d'ouvrage.

Ouvrages en bois

- Les structures immergées, telles que les palissades, constituent de nouveaux habitats. Elles créent localement des conditions d'écoulement particulières qui sont attractives pour le poisson. Des concentrations importantes de perches, gardons et ablettes y ont été observées en 2000.

Macroinvertébrés benthiques

La composition faunistique observée de 1997 à 2003 est caractéristique d'une zone littorale sableuse à sablo-limoneuse, dominée par les oligochètes et les chironomidés. La diversité observée à l'abri des ouvrages ne montre pas de différence significative avec celle observée au large de ces derniers.

La Figure 19 illustre la comparaison des caractéristiques du peuplement benthique entre les stations abritées par les ouvrages et celles situées au large de ces derniers.

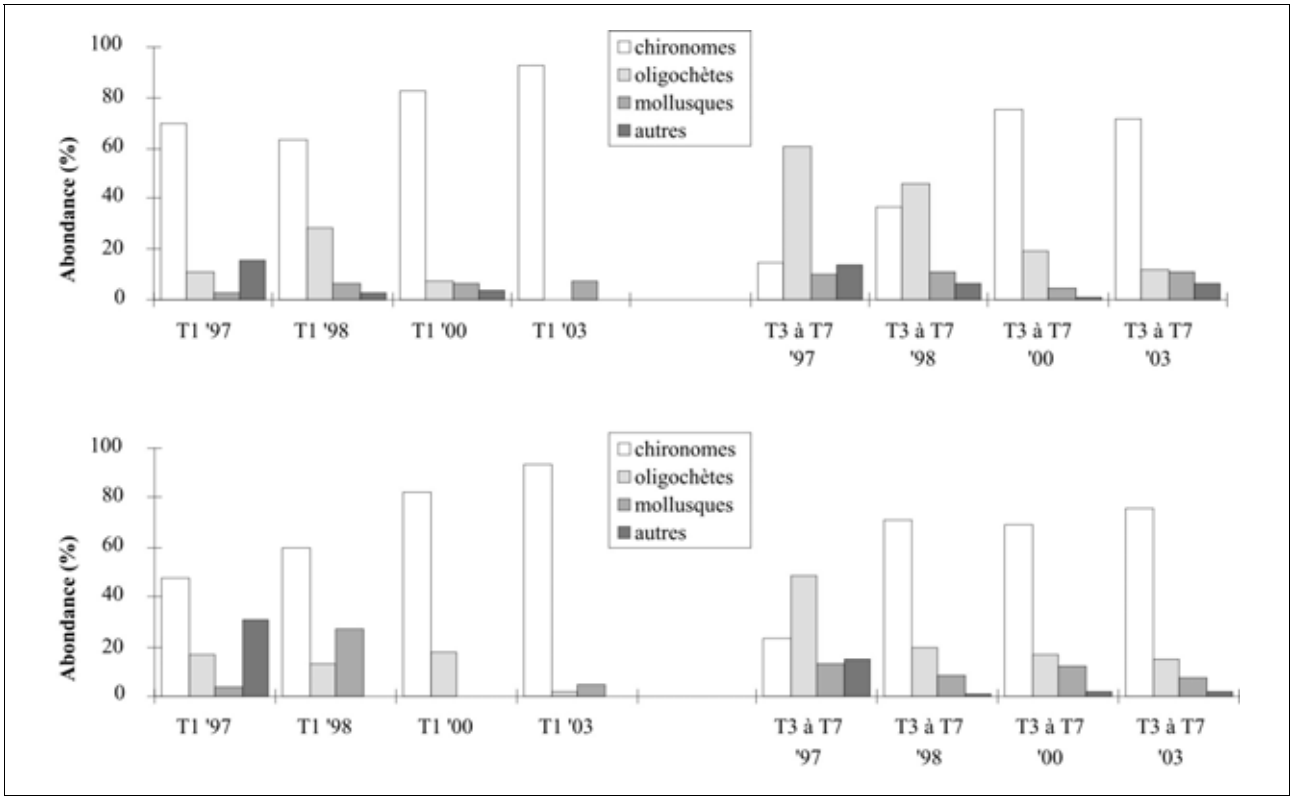


Figure 19: Evolution du peuplement benthique à l'abri (en haut) et au large (en bas) des ouvrages anti-érosion [années : 1997–2003].

Abondance des organismes

- La majorité des taxons dominants avant réalisation des ouvrages, en 1997, le sont également en 1998, 2000 et 2003 (ex : chironomidés *Cladotanytarsus, Polypedilum et Stictochironomus ;* bivalve *Pisidium).* Un indice de diversité faible (Shannon, < 1) est observé ponctuellement, sur l'ensemble des stations situées à l'abri des ouvrages, ainsi que sur le transect de référence. Cet indice exprime notamment la dominance relative des taxons ci-dessus dans les stations échantillonnées. Une nette progression de l'abondance des *chironomidés* est constatée à partir de 1998 (réalisation des travaux), tant sur les stations situées à l'abri, qu'au large des ouvrages.
- La faune des *chironomidés* est dominée par 2 taxons *(Polypedilum* et *Cladotanytarsus)* représentant environ le 80% du peuplement. Cette faune représente une qualité trophique des sédiments « méso-eutrophes » ; on observe en effet une quasi-absence d'espèces typiques de sédiments « eutrophes » (3 individus).
- Le genre *Stictochironomus,* caractéristique de sédiments peu enrichis en matière organique (type « oligo-mésotrophe ») demeure fréquent et relativement abondant. L'abondance de ce taxon n'est pas significativement différente entre les stations situées à l'abri et au large des ouvrages (test Mann-Whitney, p >0.05).
- La faune des autres groupes d'invertébrés est dominée par les mollusques bivalves *Sphaeriidae* du genre *Pisidium.*

Analyse de l'effet des ouvrages

Les macroinvertébrés benthiques ne s'avèrent pas être de bons indicateurs de l'évolution de la qualité hydrobiologique du milieu, à l'échelle de la période de suivi considérée. Il n'est donc pas possible de mettre en évidence d'effets significatifs des ouvrages à ce stade de l'étude.

La disponibilité alimentaire pour les poissons demeure globalement très faible. Notons toutefois que le potentiel actuel de nutrition pour les oiseaux d'eau malacophages est plus élevé sur la beine sableuse du tronçon pilote, en raison d'abondantes concentrations de juvéniles de moules zébrées constatées sur tous les ouvrages construits (ouvrages en enrochements, particulièrement).

Végétation

Une couverture végétale herbacée et ligneuse s'est rapidement développée sur les ouvrages en enrochements. Pour maintenir le caractère pionnier de ces milieux, des actions de débroussaillage ont été aussitôt entreprises. Elles ont permis de contenir le développement des arbustes dont la couverture est inférieure à 50% après 5 saisons de végétation, alors que celle de la strate herbacée varie entre 5 et 75% suivant l'ouvrage considéré.

Au cours du mois de juillet 2003, 186 espèces végétales ont été relevées sur les ouvrages en enrochements émergents (surface prospectée: 0.02 km²), soit les îles aux oiseaux I1 et I2, la digue brise-lames B2c et les épis EP1 et EP2. Nombre d'espèces, notamment les vernales, dont la déliquescence aura été accélérée par la canicule de l'été 2003, avaient disparu et n'ont pu être relevées. Cette diversité est élevée si on la compare aux 674 espèces relevées depuis 1984 dans le secteur riverain correspondant (secteur no 225, surface : 114,5 km2) de l'Atlas WELTEN et SUTTER (1982). Elle s'explique par la nature pionnière des ouvrages et la diversité des conditions qui y prévalent (variabilité des conditions hydriques, hétérogénéité du substrat). Les espèces herbacées relevées les plus abondantes sont :

- le roseau commun (Phragmites australis) ;
- l'agrostide stolonifère (Agrostis stolonifera) ;
- le lycope d'Europe (Lycopus europaeus) ;
- l'alpiste roseau (Phalaris arundinacea) ;
- le saule blanc (Salix alba) ;
- le liseron des haies (Calystegia sepium) ;
- la reine des prés (Filipendula ulmaria) ;
- l'épiaire des marais (Stachys palustris).

Les îles aux oiseaux, dont la variabilité des conditions hydriques et de la granulométrie est plus élevée que celle des autres ouvrages en enrochements, abritent une diversité végétale plus importante ainsi que de nombreuses espèces en danger à l'échelle du plateau suisse tels le rumex géant *(Rumex hydrolapathum),* l'épilobe de Fleischer *(Epilobium fleischeri),* le catapodium raide *(Catapodium rigidum),* l'hé-

léocharis épingle *(Eleocharis acicularis)* et le rubanier émergé *(Sparganium emersum)*. La végétation se présente, dans la partie basse des îles aux oiseaux, en ceintures caractéristiques comparables à celles que l'on trouve, à plus grande échelle, dans la Grande Cariçaie : végétation pionnière en contact presque permanent avec les eaux du lac, cariçaies et roselières plus en retrait (Fig. 20).

La plupart des espèces en danger ou vulnérables relevées (MOSER D. et al. 2002) sont caractéristiques des marais non boisés. Quelques-unes n'avaient encore jamais été observées dans la Grande Cariçaie, par exemple l'héléocharis à tétons *(Eleocharis mamillata),* alors que d'autres n'y avaient plus été observées depuis plusieurs décennies, par exemple l'héléocharis épingle *(Eleocharis acicularis).*

Figure 20: A gauche : La flore diversifiée de l'île aux oiseaux I2. A droite : le catapodium raide, graminée en expansion mais encore rare en Suisse, sur les enrochements de l'île aux oiseaux I2.

Parmi les espèces ligneuses (22 espèces relevées), 8 dominent : le saule blanc *(Salix alba),* cendré *(S. cinerea)* et pourpre *(S. purpurea),* le peuplier blanc *(Populus alba)* et noir *(P. nigra),* l'aulne noir *(Alnus glutinosa),* le bouleau *(Betula pendula)* et le frêne *(Fraxinus excelsior).*

La nature pionnière des ouvrages est également propice aux néophytes dont 3 espèces de la liste noire, le buddléa de David *(Buddleja davidii),* le robinier faux-acacia *(Robinia pseudoacacia)* et le solidage géant *(Solidago gigantea)* et 1 espèce de la liste grise, l'onagre bisannuelle *(Oenothera biennis),* ont été relevées; le solidage géant *(Solidago gigantea)* est présent sur tous les ouvrages prospectés.

Plusieurs espèces nitrophiles (l'oseille des prés *(Rumex acetosa),* la patience sauvage *(Rumex obtusifolius),* le pissenlit officinal *(Taraxacum officinale),* le trèfle des prés *(Trifolium pratense)* et le trèfle rampant *(Trifolium repens))* ont été relevées, en particulier sur les surfaces d'ouvrages occupées préférentiellement par l'avifaune.

Macrophytes

Le suivi des macrophytes sur la beine littorale du tronçon pilote met en évidence d'importantes modifications des herbiers en relation avec l'implantation des ouvrages.

Localisation et surfaces des herbiers

En 1996, la surface totale colonisée par les macrophytes était estimée à 20% (environ 25 ha) de l'ensemble de la beine comprise entre 0 et 3 mètres. En 2003, on peut estimer que la couverture végétale couvre plus de 50% de la beine (soit quelques 70 ha) entre 0 et 3 mètres et plus de 80% de la zone comprise entre 0 et 2 mètres, ce qui correspond globalement à la zone située à l'abri des ouvrages. La colonisation du site par les characées explique en partie cette surface élevée. Les herbiers de potamots ne représentant qu'une petite surface de cette couverture (20 à 30% maximum).

On note une différence significative entre les ouvrages émergés et les ouvrages immergés, ces derniers étant nettement moins favorables à l'établissement d'herbiers denses et diversifiés (characées et potamots, notamment). Cette configuration se modifie en situation non protégée, pour laquelle on retrouve des portions de beine non colonisées dans une gamme de profondeurs identiques.

Après le développement d'une mosaïque de petits herbiers distincts les uns des autres à l'abri des ouvrages entre 1996 et 2000, on observe de grands herbiers très denses atteignant jusqu'à 4,5 hectares en 2003.

Les herbiers se sont également développés sur une bande de 30 à 100 mètres au large des ouvrages (au large des îles artificielles, en particulier). Leur densité est toutefois nettement inférieure à celle des herbiers abrités.

Notons que les conditions climatiques particulières de l'année 2003, (soit une température exceptionnellement élevée), ont eu une influence positive sur la végétation aquatique. La luxuriance des herbiers y est probablement liée. Bien que ce paramètre soit non quantifiable, il ne remet toutefois pas en cause l'impact positif des ouvrages sur les macrophytes.

Figure 21: A gauche, naïade maritime. A droite, échantillonnage de macrophytes à l'aide d'un rateau.

Diversité et composition des herbiers

La structure des herbiers, ainsi que l'évolution de l'ensemble des espèces de macrophytes recensées sont présentés de manière synthétique dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Evolution des espèces et des herbiers de macrophytes.

Espèce	**1996**	**1998**	**2000**	**2003**	**1998–2000**	**2000–2003**	**1996–2003**
Chara gr. *vulgaris*	+	+	+	+	-	-	<
Nitellopsis obtusa (Des.) J. Groves		+	+	+	<	<<	<<<
Renoncule en crosse *(Ranunculus circinatus)* EN/EN	+						
Myriophylle en épi *(Myriophyllum spicatum)* NT/NT	+	+	+	+	<	>>	-
Élodée du Canada *(Elodea canadensis)* (LC)/(LC)		+	+	+	<	>	
Élodée de Nuttall *(Elodea nuttallii)* (LC)/(LC)		+	+	+	<	>	
Groenlandia serré *(Groenlandia densa)* NT/NT		+					
Potamot fluet *(Potamogeton* gr. pusillus) VU/VU		+	+	+	<<	>	<
Potamot de Suisse *(Potamogeton helveticus)* E / E			+	+			
Potamot luisant *(Potamogeton lucens)* EN / EN				+			
Potamot pectiné *(Potamogeton pectinatus)* LC/LC	+	+	+	+	>>	<	>
Potamot perfolié *(Potamogeton perfoliatus)* LC/LC	+	+	+	+	-	-	<
Potamogeton x descipiens Nolte LC/LC	+	+	+	+	<	>>	>
Zannichellie des marais *(Zannichellia palustris)* VU/VU		+	+				
Naïade maritime *(Najas marina)* EN / EN			+	+		<<	<<
Jonc-des-tonneliers *(Schoenoplectus lacustris)* LC/LC			+	+	<	<	<
Roseau commun *(Phragmites australis)* LC/LC	+	+	+	+	-	-	
Nombre d'espèces recensées	7	12	14	14			
Diversité moyenne par herbier	2	3.3	3.6	3.7			
Densité moyenne par herbier	2.7	2.2	2.2	2			

- Stable ; < augmentation perceptible ; << augmentation importante : > diminution perceptible ; >> diminution importante

L'analyse des résultats appelle les constatations suivantes :

- Le nombre d'espèces recensées a doublé au cours des années de suivi 1996 à 2003. Huit espèces nouvelles sont apparues ; parmi celles-ci, on note la présence de deux espèces remarquables : naïade maritime *(Najas marina)* et jonc-des-tonneliers *(Schoenoplectus lacustris)*. Ces deux espèces ont colonisé le site dès 2000, puis se sont fortement développées en 2003. L'espèce ayant le plus significativement progressé est *Nitellopsis obtusa*.
- En 2003, la diversité des herbiers est comprise entre 1 et 8 espèces. Dans la moitié des herbiers, 4 espèces au minimum ont été observées.
- Lors de la campagne 2003, deux espèces dominent quantitativement l'ensemble des herbiers : la *Chara* gr. *vulgaris* (présente au minimum dans 89% des herbiers, avec une abondance ≥ 3 dans 44% des herbiers) et le Potamot pectiné *(Potamogeton pectinatus)* (présent dans 79% des herbiers avec une abondance ≥ 3 dans 27% des herbiers).
- L'importance des characées est encore renforcée par l'expansion de *Nitellopsis obtusa*. Au minimum une des deux characées a été inventoriée dans 94% des herbiers. Par ailleurs, 50% d'entre eux contiennent les deux espèces.
- Concernant la valeur bioindicatrice des espèces présentes, leur évolution en 2003 indique nettement une situation plus abritée, voire même des eaux plus chargées en nutriments (N, P), en regard du développement de la naïade, du potamot pectiné et de la characée *Nitellopsis obtusa,* notamment. La colonisation du site par le scirpe lacustre indique également une évolution favorable des conditions de houle à l'abri des ouvrages.

Analyse de l'effet des ouvrages

Le suivi initié en 1996 indique que les ouvrages anti-érosion ont une influence importante sur le développement des herbiers. Les résultats sont présentés par type d'ouvrage.

Ouvrages en enrochements

La zone abritée par le **brise-lames immergé** [B2a] est couverte d'un tapis de characées dans lequel on observe la présence régulière de la naïade (cette matrice de végétation rase se retrouve sur toute la zone protégée par les ouvrages). Cet ouvrage à fleur d'eau a un effet positif sur les macrophytes similaire au brise-lames émergé [B2c], aussi bien à l'abri de l'ouvrage qu'au large. La végétation derrière le brise-lames immergé [B2b] est moins dense, composée essentiellement de characées, hormis quelques petits herbiers de potamots et de *Nitellopsis*. Les herbiers abrités par le brise-lames émergé [B2c] sont denses et étendus, composés de potamots principalement.

L'effet des brise-lames immergés sur les macrophytes est donc moindre que celui des brise-lames émergés. On peut avancer qu'on mesure quantitativement et qualitativement un gradient entre les 3 types de brise-lames, indépendamment de la proximité des autres ouvrages.

La zone située à l'abri de **l'île aux oiseaux** [I1] est colonisée par des herbiers denses de potamots. La zone peu profonde proche de l'ouvrage est cependant pauvre en végétation, comme cela a été observé pour l'île [I2]. Aucune scirpaie n'a été recensée. Au large de l'île, de vastes herbiers de characées colonisent les fonds sur une bande de plus de 100 mètres de large. L'île aux oiseaux [I2] abrite des herbiers denses de potamot pectiné et de *Nitellopsis*. La zone graveleuse peu profonde au pied sud de l'île est couverte d'un tapis d'algues vertes, empêchant toute colonisation par les macrophytes. Une roselière s'est établie sur la moitié nord de l'île. Il n'y a quasiment pas de macrophytes au large de l'île.

L'effet de **l'épi** [EP1] sur les herbiers est important. La végétation a atteint son développement optimal. La densité est maximale, la diversité importante et l'étendue des herbiers atteint environ 3 ha. L'effet est cependant uniquement observable sur une bande parallèle à la rive, dans la gamme de profondeurs où est implanté l'ouvrage.

L'effet de l'épi [EP2] sur les herbiers est aussi important que le précédent. Les macrophytes ont fortement colonisé la beine à l'ouest de l'épi. Les herbiers sont denses et diversifiés (7 espèces). La colonisation à l'abri de l'épi est tellement importante que l'on peut considérer que l'on est en présence d'un vaste herbier d'environ 4.5 ha. L'effet de l'ouvrage sur les macrophytes s'observe nettement sur une distance d'environ 250 mètres parallèlement à la rive. Il s'arrête après quelques dizaines de mètres au large.

Le récif artificiel [R1] n'est pas propice au développement d'herbiers de potamots denses et diversifiés. Un effet sur les herbiers est cependant perceptible, puisqu'on retrouve, à l'abri de l'ouvrage, un tapis continu de characées de densité faible. A l'instar du récif artificiel [R2], l'ouvrage n'offre pas l'abri nécessaire au développement des potamots. Toute la zone abritée derrière l'ouvrage est cependant colonisée par les characées. Il y a très peu de macrophytes au large de l'ouvrage.

Ouvrages en bois

Les fonds situés à l'abri des **palissades en pieux jointifs** [PJb et c] sont presque dépourvus de macrophytes, hormis quelques très petits herbiers de potamots et de charas. Les ouvrages ont été réalisés récemment ; il est prématuré de tirer des enseignements sur ce type d'ouvrage. Notons toutefois qu'une scirpaie (jeunes semis) est en train de se développer.

A l'abri des palissades, on ne retrouve pas les herbiers denses observés le long des épis voisins. Hormis quelques petits herbiers de potamots, les fonds sont colonisés par des tapis peu denses de characées *(Chara gr. vulgaris et Nitellopsis obtusa)* et de naïade. Le jonc lacustre *(Schoenoplectus lacustris)* est régulièrement observé sous forme immergée. On retrouve des characées au large des palissades toutefois en densité très faible. Les herbiers au large des palissades à claire-voie [P2a, b et c] sont en revanche assez denses, composés de characées (Nitellopsis, Chara) associées aux potamots. L'enrichissement de cette zone en herbiers s'explique toutefois

par l'influence de l'épi voisin [EP1]. La colonisation à l'abri des palissades semble avoir régressé entre les années 2000 et 2003.

Zone « de référence » (ouest du tronçon pilote)

Dans la zone non protégée, à l'ouest des ouvrages, la végétation s'est considérablement développée depuis 2–3 ans. On trouve principalement des herbiers de potamot pectiné *(Potamogeton pectinatus)* et de *Nitellopsis obtusa* proches de la rive ainsi que des tapis de *Chara gr. vulgaris* plus au large. Globalement, cette zone « libre » située entre l'île [I1] et les palissades en pieux jointifs [PJb et c], est colonisée par les macrophytes de façon similaire avec les zones protégées par les ouvrages immergés. Le tapis continu de characées présent derrière les ouvrages disparaît au fur et à mesure qu'on s'éloigne en direction de l'ouest. On retrouve, à quelques centaines de mètres à l'est de la plage du camping d'Yverdon-les-Bains, les fonds sableux et nus, présents sur tout le tronçon d'étude avant les travaux.

6.6 Intégration paysagère et cohabitation avec les différents utilisateurs du plan d'eau

Intégration paysagère

Malgré le nombre conséquent d'ouvrages mis en place, le tronçon pilote reste dans l'ensemble très discret du regard du promeneur comme celui du navigateur qui ne décèle clairement que les îles et les ouvrages en enrochements émergés. La faible hauteur des palissades, ainsi que leur proximité de la rive les rendent difficilement distinguables de la rive et de sa ceinture de roseaux

Rappelons ici que l'ensemble des ouvrages réalisés ont été construits dans un secteur interdit à la navigation et à la baignade et que les seules personnes habilitées aujourd'hui à le traverser sont les pêcheurs professionnels. Un paragraphe particulier leur est de fait consacré.

Deux types d'ouvrages sont toutefois en limite de zones ouvertes à la baignade. Il s'agit des palissades en pieux jointifs PJb et PJc et de l'épi EP2.

La palissade PJb est limitrophe de la plage d'Yverdon-les-Bains. Le balisage de cette plage touche celui de la réserve des Grèves de Cheseaux. L'espacement important des bouées rend toutefois difficile, pour le baigneur en particulier, la compréhension de ces limites. Force est de constater que les palissades en pieux jointifs servent depuis leur construction, de plongeoirs et de site de repos pour les baigneurs. Depuis la plage, seuls les ouvrages en enrochements et notamment les îles sont visibles de la rive. Leur couverture progressive par une végétation herbacée et arbustive facilite aujourd'hui leur intégration dans un paysage riverain naturel où alternent des rives nues et d'autres arborées.

A l'autre extrémité du tronçon, l'épi EP2 limitrophe lui aussi d'une zone ouverte à la navigation est aussi très prisé des baigneurs et des naturistes qui trouvent ici une

des seules zones tranquilles en verdure du secteur. Là aussi, l'ouvrage est perçu comme un avantage plus comme un problème en raison de la rareté des plages de la rive. Comme à l'ouest, les seuls autres ouvrages visibles sont les îles et le brise-lame émergés. Aucune remarque négative sur l'intégration de ces ouvrages n'a été émise de la part de ces utilisateurs.

Exercice de la pêche

Valeur actuelle du tronçon pilote

En 2003, 9 pêcheurs professionnels étaient susceptibles de fréquenter la beine du tronçon pilote, mais seuls trois pêcheurs fréquentaient régulièrement le secteur.

La beine du tronçon pilote constitue un secteur relativement peu exploité. Seule la pêche du brochet *(Esox lucius)* au printemps (fév.–mars) présente un intérêt particulier sur cette zone. Cette dernière dépendant toutefois fortement du niveau du lac pendant la période de frai (en dépit de la cote obligatoire fixée à 429.30 msm).

Pour les autres poissons prisés des pêcheurs, le tronçon pilote ne constitue pas un site de pêche de valeur particulière, en effet :

- La palée de bord ne trouve pas de fonds graveleux propices à son développement (reproduction).
- La perche *(Perca fluviatilis)* est pêchée essentiellement à proximité du mont (au large des ouvrages), durant les mois de juin et juillet.
- La truite est également pêchée à l'extérieur du tronçon pilote, durant les mois de sept.–octobre, au moyen de filets de fond (10–25 m de profondeur).

Analyse de l'effet des ouvrages

La concertation auprès des pêcheurs professionnels réalisée depuis 1997 a permis de mettre en évidence plusieurs effets liés à l'implantation des ouvrages sur l'exercice de la pêche professionnelle :

- La suppression de surfaces de pêche dans la zone concernée constitue un impact non-négligeable sur l'exercice de la pêche. Cette constatation va à l'encontre de l'hypothèse avancée lors de l'étude du projet pilote en 1995. La pêche du brochet a été abandonnée à proximité des ouvrages en raison des risques élevés d'endommagement des bateaux en cas de météo défavorable (vents élevés, brouillards en mars essentiellement).
- La pose de nasses et de filets dans la lagune de Champ-Pittet est également abandonnée pour les raisons précitées et du fait des difficultés d'accès.
- Le développement important des herbiers de macrophytes rend impossible toute activité de pêche (risques d'emmêlement des filets) en période estivale.

Ces différentes remarques montrent que la réduction des activités de pêche dans le secteur du tronçon pilote résulte plus des contraintes techniques que d'un appauvrissement de sa valeur piscicole. La perte de ces surfaces de pêche représente un impact modeste compte tenu de la présence d'autres secteurs piscicoles aux environs (Cheyres, Grandson).

7 Synthèse et conclusions

7.1 Efficacité technique des ouvrages

Le tronçon pilote visait à assurer une protection générale de l'écosystème riverain. Ses ouvrages devaient contribuer à l'atténuation des vagues et des courants lacustres, à l'origine de l'érosion de la zone littorale, et favoriser le dépôt de matériaux sur la beine.

Les résultats mettent en évidence les influences des ouvrages sur la topographie de la beine, les caractéristiques des sédiments et l'évolution de la ligne de rive.

Depuis la construction des ouvrages en 1998, la topographie générale de la beine s'est modifiée. Des zones d'accumulation se sont créées à l'abri des ouvrages en enrochements, un peu moins derrière les récifs artificiels. Un changement d'orientation des dépôts est également constaté: initialement orientés dans l'axe de la bise, les dépôts tendent à devenir parallèles à la rive, signe vraisemblable d'une transition du processus d'érosion vers un système en accumulation. Ces résultats se voient confirmés par le suivi sédimentologique: la granulométrie des matériaux déposés à l'abri des ouvrages change, la texture devenant plus argileuse et limoneuse. Cette tendance dépend toutefois fortement du type d'ouvrage. Elle est évidente pour les ouvrages en enrochements émergés, particulièrement pour ceux implantés perpendiculairement à la rive, mais peu marquée à l'abri des récifs artificiels. Une augmentation du taux de matière organique est également constatée.

Si la morphologie de la ligne de rive n'a pas significativement changé, la progression localisée de massifs de roseaux, constatée uniquement dans les secteurs protégés, indique une modification des conditions du milieu (courantologie,…). Les secteurs de rive protégés par les ouvrages semblent désormais reculer moins vite que ceux non protégés. La question reste ouverte de savoir si on assiste à la première phase d'une réelle stabilisation ou à un simple changement de vitesse du phénomène de recul.

7.2 Effets des ouvrages sur la faune et la flore

Un des objectifs du tronçon pilote était de préserver la valeur naturelle de la rive, voire de l'accroître en créant des conditions favorables aux biocénoses animales et végétales. Les ouvrages émergés, construits en zone interdite à la navigation, devaient notamment remplir des fonctions de sites d'escale ou de nidification pour l'avifaune.

Les résultats mettent en évidence non seulement le maintien et le développement, mais aussi une diversification des biocénoses initiales et des habitats. Les changements les plus notables s'observent pour les macrophytes et l'avifaune.

La surface de beine colonisée par les macrophytes jusqu'à une profondeur d'eau de 3 mètres, a presque triplé en 6 ans, passant de 25 ha à 70 ha. Cette évolution s'est

accompagnée d'une diversification des espèces, leur nombre passant de 7 à 14. Les ouvrages émergés, derrière lesquels se sont développés des herbiers très denses et diversifiés, s'avèrent les mieux adaptés pour favoriser le développement des macrophytes. Les ouvrages immergés, tels que les récifs artificiels, ont un effet moins important, mais toutefois positif par le développement d'un tapis de characées continu s'étendant jusqu'à la rive. Enfin, les surfaces à l'abri des ouvrages émergés perpendiculaires à la rive (épis) ont été colonisées par de vastes herbiers très denses et diversifiés.

Le développement de scirpaies (jonc-des-tonneliers) est un des effets les plus réjouissants des ouvrages. Bien que plus résistant que le roseau, le jonc lacustre souffre des conditions de houles régnant sur le lac de Neuchâtel. On le rencontre généralement sous forme de petits îlots à l'abri des courants lacustres. Cette espèce a fortement régressé en Suisse depuis le début du siècle. Avec la mise en place des ouvrages, on peut espérer voir se développer à terme, une vaste scirpaie entre les palissades et la rive.

Il est aussi intéressant de noter que le type de végétation que l'on trouve aujourd'hui sur le tronçon pilote s'apparente à celui du littoral du lac du Bourget (Savoie), aujourd'hui localement protégé par des ouvrages et considéré comme un des lacs les plus riches d'Europe en terme de qualité écologique.

Une végétation émergente palustre a colonisé les parties en tout venant de certains ouvrages et localement la beine entre les ouvrages et la rive. Plusieurs espèces caractéristiques des eaux calmes et des grèves limoneuses méso à oligotrophes se sont développées. Les parties basses des îles hébergent la plus grande diversité floristique de tous les ouvrages. La rareté de certaines espèces milite pour qu'un entretien minimal soit réalisé afin d'empêcher un embroussaillement massif. A terme, la diversité floristique devrait diminuer avec l'eutrophisation croissante des surfaces fréquentées régulièrement par l'avifaune. Une évolution dans ce sens peut en effet être observée sur l'île neuchâteloise du Fanel, réaménagée il y a une dizaine d'années : la diversité et les espèces rares ou vulnérables y sont plus faibles alors que le nombre et la couverture des espèces nitrophiles y sont plus élevés.

L'ensemble des ouvrages émergés du tronçon pilote constitue un élément important de diversification des hauts-fonds littoraux de la réserve d'oiseaux d'eau et de migrateurs d'importance internationale de Grandson-Champ-Pittet. Les nouvelles îles de Champ-Pittet et surtout de Châble-Perron, de même que le brise lame B2c, dont le couronnement n'a jamais été submergé en période de reproduction depuis 2000, ont permis le développement d'une importante population de laridés nicheurs. La colonie de mouettes rieuses est la première jamais observée sur sol vaudois ; elle est devenue la plus importante de Suisse au printemps 2003 (30% des effectifs suisses). La colonie de sterne pierregarin était en 2003 également une des plus importantes de notre pays (15% des effectifs suisses). Il en est de même de la colonie de goéland leucophée, devenue la plus grande de Suisse après celle du Fanel. La forte croissance des populations de goélands leucophées pourrait toutefois s'avérer

problématique de par la prédation que cette espèce exerce sur les autres espèces d'oiseaux d'eau.

Les ouvrages accroissent également l'attractivité de la réserve pour les oiseaux d'eau en dehors de la période de reproduction. Ils constituent des sites de repos, d'alimentation ou de mue de diverses espèces d'oiseaux d'eau et des rivages (limicoles). Les eaux protégées par les ouvrages se révèlent aussi très attractives pour le repos des oiseaux fuyant d'éventuels dérangements au large de la réserve ou les vagues d'un lac trop agité. Enfin, le développement des herbiers de characées et de bancs de moules zébrées constatés sur toutes les surfaces immergées des ouvrages, offre aux oiseaux d'eau des ressources alimentaires supplémentaires à l'intérieur de la réserve. Les résultats des derniers recensements d'oiseaux d'eau montrent un accroissement des effectifs hivernants depuis l'hiver 2000/01, en particulier au niveau des espèces végétariennes (fuligule milouin et nette rousse).

Les suivis de la faune piscicole et des macroinvertébrés benthiques montrent une relative stabilité ou un léger accroissement des populations. Le nombre de poissons adultes et subadultes, très faible, demeure comparable à celui relevé avant la construction des ouvrages. Depuis la réalisation de ceux-ci, des densités élevées de poissons juvéniles (gardon et perche notamment) sont toutefois observées à l'abri de certains ouvrages en enrochements émergés, tels que l'épi et l'île aux oiseaux. Ce constat confirme le potentiel élevé du secteur d'étude pour la reproduction de la faune piscicole. Des concentrations d'espèces benthiques (lotte, chabot, loche franche ainsi que de perches (juvéniles) ont été localisées aux abords de la plupart des ouvrages. Les effectifs d'espèces menacées (loche de rivière) ou fortement menacées à l'échelle nationale (bouvière), recensées essentiellement à proximité de la lagune de Champ-Pittet, ne montrent pas d'évolution significative depuis la construction des ouvrages.

La communauté benthique, dominée par les oligochètes et les chironomidés, demeure caractéristique d'une zone littorale sableuse à sablo-limoneuse. La majorité des taxons dominants avant la réalisation des ouvrages le sont également restés pendant et après les travaux.

7.3 Incidences des ouvrages sur l'exercice de la pêche et le tourisme lacustre

Le tronçon pilote devait permettre d'évaluer la compatibilité des ouvrages avec l'exercice de la pêche professionnelle et par extrapolation avec la navigation de plaisance.

Rappelons ici que plusieurs ouvrages du tronçon pilote sont immergés ou subaffleurants en période de hautes eaux. Si un balisage général du tronçon pilote existe, aucun signalisation individuelle des ouvrages n'avait été prévue sur les grèves de

Cheseaux-Noréaz en raison de l'interdiction générale de navigation existante dans ce secteur.

Le fait de n'avoir pas pu réaliser les ouvrages prévus en zone navigable (manque de moyens financiers) n'a pas permis d'évaluer la compatibilité des travaux de protection avec la navigation de plaisance.

Les pêcheurs professionnels ont abandonné la pêche du brochet à proximité des ouvrages, en raison des risques élevés d'endommagement des bateaux en cas de météo défavorable. La suppression des surfaces de pêche touche environ 4 km de rive (zone littorale du tronçon pilote).

La transposition de certains ouvrages, tels que les récifs artificiels, brises-lames ou palissades, dans d'autres secteurs de rive ouverts à la navigation, ne serait toutefois pas sans problèmes et sans coûts puisqu'elle nécessiterait une signalisation supplémentaire pour prévenir tout dommage aux bateaux. Indirectement, ces arguments militent pour le choix d'ouvrages émergés, visibles et également d'efficacité plus grande dans le piégeage des sédiments. De tels ouvrages auront toutefois plus d'incidence sur le paysage riverain.

7.4 Bilan du tronçon pilote

Le tronçon pilote devait conjuguer efficacité des ouvrages dans la lutte contre l'érosion et conservation de l'écosystème naturel riverain.

Confirmant les hypothèses de HUBER A. et al (1990), la combinaison d'ouvrages en enrochements, parallèles au rivage au large et perpendiculaires à la rive, avec des ouvrages en bois proches de la rive, offre la meilleure garantie de réussite. Aucun type d'ouvrage, pris individuellement, ne permet d'atteindre l'ensemble des buts recherchés à l'exception peut-être des ouvrages en enrochements, les plus coûteux du tronçon pilote. Les résultats obtenus pour chaque type d'ouvrage suffisent toutefois pour analyser leurs potentialités d'utilisation sur le reste de la Rive sud (Tableau 11).

Les ouvrages en enrochements influencent significativement la topographie et la granulométrie de la beine; ils ont permis un ralentissement du recul de la ligne de rive et ont, en particulier pour ceux émergés, une incidence très positive sur les biocénoses: extension d'herbiers de macrophytes, apparition de végétation émergente palustre, refuge pour les oiseaux et les poissons. Leur taille et leurs constituants les rendent résistants. Ces avantages ont un prix, puisque ces ouvrages se révèlent les plus chers de ceux testés. Les ouvrages émergés conjuguent le plus efficacement lutte contre l'érosion et conservation des biocénoses. Ils nécessitent cependant des mesures de gestion (entretien, limitation d'accès…) si l'on souhaite conserver d'autres objectifs (biologiques notamment).

Types d'ouvrage	Récif artificiel	Digue brise-lames immergé	Digue brise-lames émergé	Île aux oiseaux	Epi	Epi en pieux jointifs	Palissades à claire-voie	Palissades à pieux jointifs
Matériaux	béton armé	enrochement	enrochement	enrochement	enrochement	bois/blocs	bois/fascines	bois
*Coût par m' en frs.	1'095.–	3'445.–				2'050.–	1'862.–	
Volume total de l'ouvrage en m³	-	2210	3540	12830	3315	125	-	-
Avancement moyen m'/j	28	6	3.7	1.5	4.9	2	6	7.5
Durée de constr.en jours	15	20	35	90	40	36	-	15
Disponibilité des matériaux, approvisionnement	aucun problème	problème de stockage; coût élevé des enrochements dû au transport				après réservation, approvisionnement facile en pieux, mais stockage délicat des fascines de saule		
Résistance	très satisfaisante	satisfaisante	satisfaisante	satisfaisante	satisfaisante	satisfaisante	très insatis-faisante	satisfaisante
Efficacité au pied de l'ouvrage	satisfaisante	satisfaisante	satisfaisante	très satisfaisante	très satisfaisante	très satisfaisante	nulle	satisfaisante
Efficacité entre l'ouvrage et la rive	satisfaisante	très insatis-faisante	satisfaisante	très satisfaisante	-	-	très insatisfaisante	à vérifier
Incidence sur le recul de la ligne de rive	très insatisfaisante	insatisfaisante	insatisfaisante	satisfaisante	insatisfaisante	à vérifier	satisfaisante	à vérifier
Frais d'entretien	nuls	très faibles	faibles	importants	moyens	moyens	très importants	moyens
Atteintes à l'environnement en phase de construction	nulles	faibles	faibles	faibles	faibles	faibles	moyennes	nulles
Incidence sur les biocénoses								
• Avifaune	nulle	nulle	très positive	positive	potentielle	faiblement positive	faiblement positive	faiblement positive
• Faune piscicole	nulle	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive
• Macrofaune benthique	faible	faible	faible	faible	faible	faible	faible	à vérifier
• Végétation émergée	nulle	nulle	faible	très positive	faible	nulle	nulle	absente
• Macrophytes	moyennes	faiblement positives	positives	positives	très positives	positives	faiblement positives	positives

coût unitaire effectif des ouvrages réalisés ; ne correspond pas au prix du marché en raison des fournitures et prestations gratuites.

positif = diversification des espèces ou augmentation des effectifs.

Tableau 11 : Synthèse des résultats par type d'ouvrages

Les récifs artificiels en béton préfabriqué devaient remplir les mêmes fonctions que les récifs naturels en agissant sur les courants et sur les sables en suspension. Moins onéreux que les ouvrages en enrochement, ils paraissaient offrir une alternative intéressante. La comparaison des résultats montre toutefois que ces ouvrages ont un effet moindre sur la topographie et la granulométrie des sédiments, le recul de la ligne de rive et les biocénoses que les ouvrages en enrochements. Immergés, ils sont discrets, mais dangereux pour la navigation.

Les palissades de fascines à claire-voie qui avaient donné de bons résultats sur le lac de Bienne se révèlent inadéquates sur le lac de Neuchâtel et ce, même à l'arrière d'ouvrages en enrochements. Des réparations et des transformations importantes consistant à remplacer les fascines par des gabions ont été nécessaires pour assurer leur maintien. Leurs effets sur la topographie et la granulométrie des sédiments sont

limités. Les palissades semblent cependant avoir un effet positif sur la stabilisation de la berge, peut-être grâce aux ouvrages qui les protègent au large.

Les palissades en pieux jointifs offrent une alternative économiquement et techniquement plus intéressante que les palissades à claire-voie. Leur mise en place récente ne permet cependant pas de garantir que les effets positifs constatés à ce jour sur les biocénoses se maintiennent à terme.

7.5 Perspectives

Le tronçon pilote a livré une série de résultats qui permettront à l'avenir de disposer de bases de référence pour la mise en place d'éventuels nouveaux ouvrages de lutte contre l'érosion sur d'autres secteurs de la rive.

Le choix de l'un ou l'autre des ouvrages devra tenir compte du lieu, de son utilisation par les navigateurs et les baigneurs, des prescriptions de protection et de la volonté de concilier objectifs de lutte contre l'érosion et objectifs biologiques.

La plus-value apportée par une combinaison d'ouvrages permet aussi d'envisager une mise en place échelonnée des différents ouvrages et adaptée aux conditions propres de chaque site.

Les effets des ouvrages construits sur le tronçon pilote se sont révélés prometteurs à court terme. Ils devraient faire l'objet d'une réévaluation régulière afin de confirmer leurs effets positifs à plus long terme.

Annexe

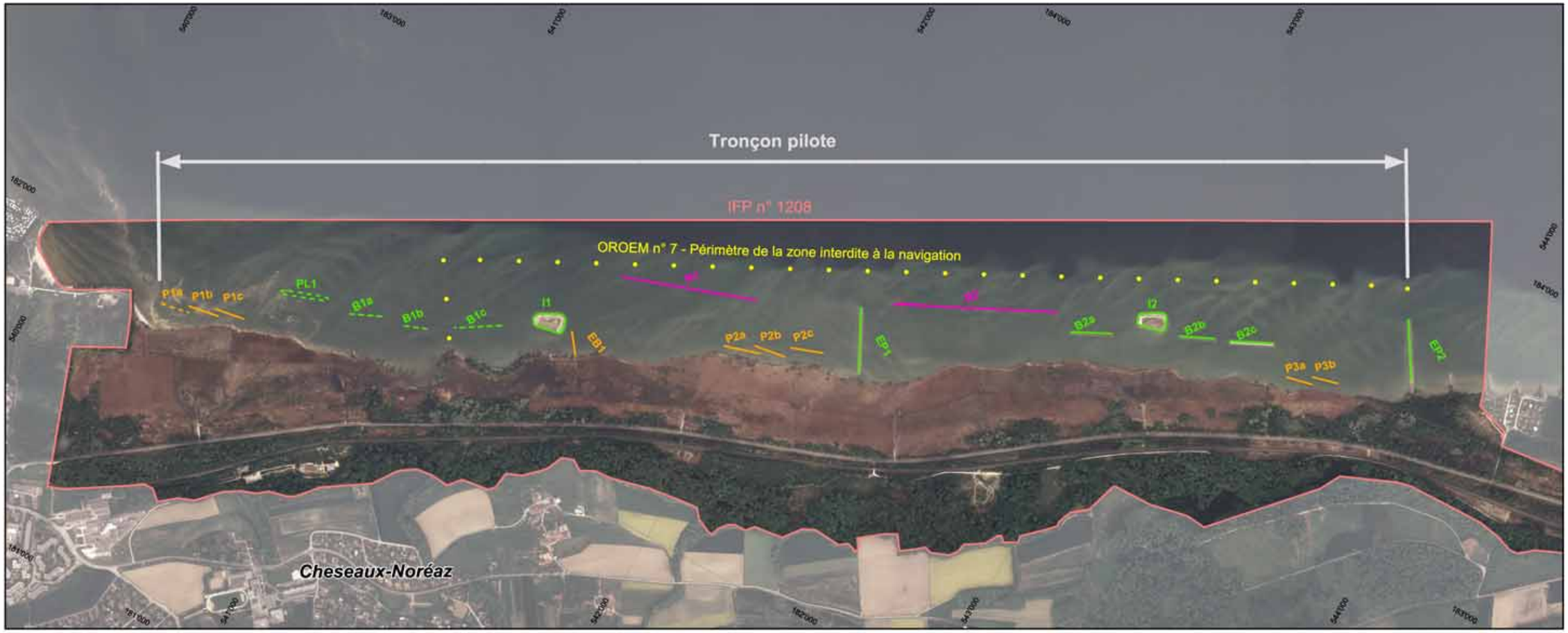
Plan no1 : Situation des ouvrages de lutte contre l'érosion

Plan no2 : Situation des suivis réalisés

Plan n° 1

Tronçon pilote de Cheseaux-Noréaz

Situation des ouvrages de lutte contre l'érosion



© 2003 GEG Grande Cariçaie / Expo.02 / SESA (VD)

Echelle

0 200 400 600 800 1'000 Mètres

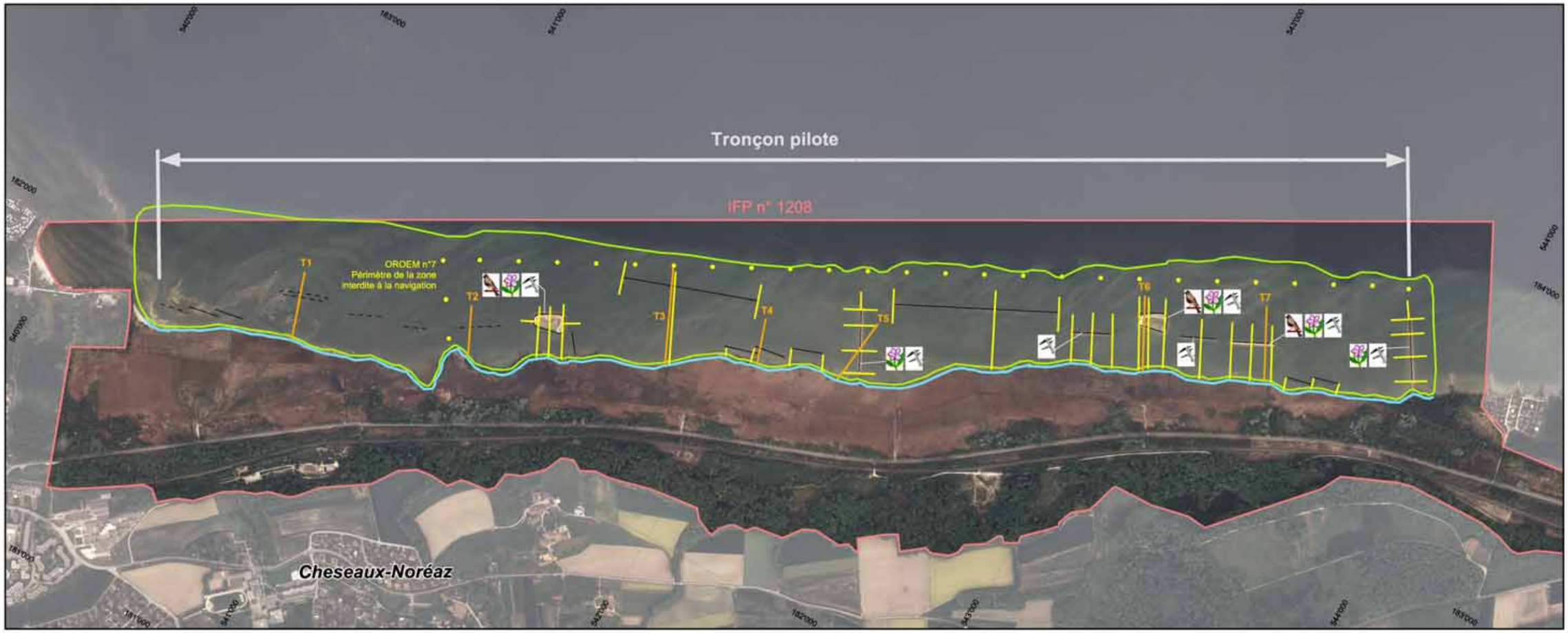
Légende

Ouvrages projetés	Ouvrages réalisés	
		Récifs artificiels en béton
		Palissades et épis en bois / bois - enrochement
		Iles, brise-lames et épis en enrochement

Plan n° 2

Tronçon pilote de Cheseaux-Noréaz

Situation des suivis



© 2003 GEG Grande Cariçaie / Expo.02 / SESA (VD)

Echelle

0 200 400 600 800 1'000 Mètres

Légende

- Suivi bathymétrique général, suivi biologique des macrophytes
- Suivi bathymétrique par transect
- Suivi sédimentologique, suivi biologique de la macrofaune benthique et de la faune piscicole
- Suivi de la ligne de rive
- Suivi biologique de la végétation
- Suivi biologique de l'avifaune
- Suivi mécanique
- Ouvrages réalisés / projetés

Index

1 Figures

Figure 1
Plan de situation du tronçon pilote 12

Figure 2
Impact des 2 corrections des eaux du Jura sur le niveau du lac de Neuchâtel 14

Figure 3
Erosion sur la Rive sud du lac de Neuchâtel 15

Figure 4
Organisation de l'ECF-RSLN 19

Figure 5
Schéma type d'une digue brise-lames 22

Figure 6
Schéma type d'une île aux oiseaux 23

Figure 7
Schéma type d'un épi en enrochements 23

Figure 8
Schéma type d'un élément de récif artificiel. Immersion d'un élément 24

Figure 9
Schéma type d'une palissade à claire-voie et d'un épi en pieux jointifs 25

Figure 10
Pose de fascines de saule dans une palissade à claire-voie 27

Figure 11
Prélèvement d'échantillons de sédiments 31

Figure 12
Recul de la ligne de rive par secteur de 100 m 37

Figure 13
Avance de la ligne de rive par secteur de 100m 38

Figure 14
Comparaison des pourcentages de sable et de silt entre les ouvrages T3, T4, T5 et T6 39

Figure 15
Envol de laridés sur l'île aux oiseaux I2. La mouette rieuse 42

Figure 16
Evolution des populations d'oiseaux d'eau de la réserve des Grèves de Cheseaux. Résultats des recensements internationaux des hivernants des 10 dernières années dans la réserve des grèves de Cheseaux 43

Figure 17
Evolution des effectifs de fuligule milouin et de nette rousse dans la réserve des Grèves de Cheseaux 43

Figure 18
Banc de perches 45

Figure 19
Evolution du peuplement benthique à l'abri et au large des ouvrages anti-érosion [années : 1997–2003] 46

Figure 20
La flore diversifiée de l'île aux oiseaux I2. Le catapodium raide, graminée en expansion mais encore rare en Suisse, sur les enrochements de l'île aux oiseaux I2 48

Figure 21
A gauche, naïade maritime. A droite, échantillonnage de macrophytes à l'aide d'un rateau 50

2 Tableaux

Tableau 1
Récapitulatif des prestations et des coûts 20

Tableau 2
Caractéristiques des ouvrages du tronçon-pilote 21

Tableau 3
Récapitulatif des étapes de réalisation des travaux 26

Tableau 4
Nature et quantité de matériaux utilisés pour la réalisation des ouvrages 28

Tableau 5
Récapitulatif des suivis réalisés 29

Tableau 6
Synthèse des résultats des relevés des relevés bathymétriques par transect au droit des ouvrages 36

Tableau 7
Recul annuel moyen de la ligne de rive par ouvrage ou groupe d'ouvrages 38

Tableau 8
Fonctionnalité des ouvrages pour l'avifaune 40

Tableau 9
Evolution du nombre de nids d'oiseaux sur les ouvrages en enrochements 41

Tableau 10
Evolution des espèces et des herbiers de macrophytes 50

Tableau 11
Synthèse des résultats par type d'ouvrages 59

3 Littérature

AESCHIMANN D., BURDET H. M. 1989 : *Flore de la Suisse et des territoires limitrophes. Le Nouveau Binz*. Ed. du Griffon, Neuchâtel. 597 pp.

AESCHIMANN D., HEITZ CH. 1996 : *Index synonymique de la Flore de Suisse et territoires limitrophes (ISFS)*. Documenta Floristicae helvetiae N° 1. Ed. Centre du Réseau Suisse de Floristique, Chambésy. 317 pp.

HUBER A., CHERVET A., RAEMY F. 1990 : *Erosion de la Rive sud du Lac de Neuchâtel*. Examen des causes. Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques de l'ETH. Zürich. 61 pp.

HUBER A., CHERVET A., RAEMY F. 1993 : *Erosion de la Rive sud du Lac de Neuchâtel*. Rapport final. Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques de l'ETH. Zürich. 46 pp.

MOSER D., GYGAX A., BÄUMLER B., WYLER N., PALESE R. 2002 : *Liste rouge des fougères et plantes à fleurs menacées de Suisse*. Ed. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, berne ; Centre du Réseau Suisse de Floristique, Chambésy ; Conservatoire et Jardin botanique de la Ville de Genève, Chambésy. Série OFEFP « L'environnement pratique ». 118 pp.

4 Glossaire

Bathymétrie
Mesure de la profondeur des mers ou des lacs.

Beine
Surface lacustre submergée par une faible hauteur d'eau

Benthique
Relatif aux fonds marins ou lacustres.

Bise
Vent sec et froid soufflant du Nord ou du Nord-Est.

Chironomidés
Famille d'insectes comprenant des mouches minuscules de couleur brunâtre ou jaunâtre.

Correction des eaux du Jura
Travaux de régulation des eaux des lacs de Neuchâtel, Bienne et Morat exécutés entre 1868 et 1891 (1ère correction) puis entre 1962 et 1973 (2ème correction).

DGPS
Abréviation de Differantial Global Positioning System

Erosion
Ensemble des phénomènes constitués par la dégradation du relief, le transport et l'accumulation des matériaux arrachés.

Eutrophes
Adjectif caractérisant des eaux riches en éléments organiques.

Fascine
Fagot de branchages employé dans les travaux de terrassement, de fortification, d'hydraulique.

Fetch
Distance sur laquelle le vent peut exercer son action sur un plan d'eau sans rencontrer d'obstacle ou sans changer lui-même de direction.

Laridés
Famille d'oiseaux d'eau essentiellement représentée par les mouettes, les goélands et les sternes.

Macrophyte
Littéralement « grand végétal » ce terme est accepté pour désigner les espèces végétales enracinées adaptées à une submersion continuelle.

Mésotrophes
Adjectif caractérisant des eaux dont la teneur en éléments organiques est moyenne.

Molasse
Grès tendre, mêlé d'argile et de quartz.

Mont
Ligne topographique séparant la beine d'un lac et ses eaux profondes.

Oligochètes
Classe d'annélides terrestres ou aquatiques, au corps translucide, sans pieds ni appendices (ex.: le lombric).

Oligotrophes
Adjectif caractérisant des eaux pauvres en éléments organiques.

Parallaxe
Angle formé par deux droites menées d'un corps observé à deux points d'observation.

Photogrammétrie
Application de la stéréophotographie aux levés topographiques.

Transect
Dispositif linéaire le long duquel des données à caractère scientifique sont récoltées.