PRO NATURA HELVETICA
Rue des Cygnes 39
1400 YVERDON
Tél. 024 21 26 21

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

4.3.4.1.1

ETUDE DU RECUL D'UNE RIVE DU LAC DE NEUCHATEL

(SECTEUR COMPRIS ENTRE YVERDON ET CHEYRES)

Travail de recherche postgrade.

B. DUFOUR

P. ROBIN

Institut du Génie de l'Environnement

1982

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION

2. SPECIFICITES DU MILIEU ET PREDISPOSITION A L'EROSION

2.1. Le contexte géographique

2.2. Pression humaine sur le milieu

3. MATERIALISATION ET ESTIMATION DU PHENOMENE DE RECUL

3.1. Observations qualitatives

3.2. Evaluation quantitative et dynamique

4. ETUDE DES FACTEURS D'EROSION

4.1. Facteur historique

4.2. Facteurs humains

4.3. Facteurs mécaniques

4.3.1. Les vents

4.3.2. L'hydrodynamisme

4.4. Facteurs chimiques et biologiques

5. ANALYSE DES PROCESSUS D'EVOLUTION DE LA COTE

5.1. Les principes du recul de la ligne de rivage

5.1.1. Les principes mécano-physiques généraux

5.1.2. Histoire des débuts de l'érosion du nouveau rivage corrigé

5.1.3. Evolution longitudinale des rivages

5.1.4. Le recul transversal des rives

5.2. Principes d'évolution de la zone littorale

5.2.1. Situation zonale, hydrodynamique et sédimentologique générale

5.2.2. La beine de Champ-Pittet

5.2.3. Le cas particulier de la Baie d'Yvonand

5.2.4. La beine de Cheyres

6. PROPOSITIONS D'INTERVENTION

6.1. Au niveau de la zone littorale

6.2. Au niveau des mentalités

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES (Voir dossier séparé)

AVANT-PROPOS

A la suite de travaux importants qui ont abouti à l'établissement du plan de protection de la rive Sud-Est du lac de Neuchâtel par la Ligue Suisse pour la Protection de la Nature (avril 81), et du plan directeur de la rive sud du lac de Neuchâtel et du lac de Morat, réalisé par les offices d'aménagement du territoire de Vaud et Fribourg (adopté en mai - juin 82), des mesures conservatoires ont été prises pour préserver cette région reconnue au plan national et international.

Le groupe de travail de Pro Natura Helvetica, responsable de l'entretien des importantes réserves naturelles constituées le long du lac, nous a suggéré une étude sur l'érosion des rives. Ce phénomène constitue une des menaces immédiates pour les zones humides sauvegardées de la Grande Cariçaie.

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un travail de diplôme d'études postgrades de génie de l'environnement.

1. INTRODUCTION

Notre travail constitue une investigation, c'est-à-dire une recherche détaillée et circonscrite à un phénomène particulier peu étudié jusqu'alors. Celle-ci porte sur les circonstances, les causes, les modalités, et les solutions à apporter à un processus inquiétant qui concerne l'érosion des rives du lac de Neuchâtel et plus particulièrement le tiers sud de la rive droite. L'intérêt d'une recherche sur ce sujet est triple.

Le processus d'érosion des rives n'est pas propre au lac de Neuchâtel. Au cours de l'évolution naturelle d'un lac, être vivant, les rives s'érodent et les sédiments arrachés aux berges concourent au comblement progressif du lac jusqu'à sa disparition, autrement dit, sa mort. Or il se trouve que dans la partie sud de la rive droite ce processus atteint une ampleur exceptionnelle qui en fait un phénomène en soi, propre à ce lac. A titre scientifique donc, le phénomène mérite éclaircissements et explications.

Cette érosion ne concerne pas une rive ordinaire. Cette dernière est un des plus beau fleuron du patrimoine naturel du Plateau de ce pays passablement urbanisé qu'est la Suisse. L'érosion et son corallaire, qui est le recul du rivage, touche la zone littorale lacustre la plus riche et la mieux conservée du pays, du point de vue de ses biotopes. Il y a donc là un intérêt écologique évident à mieux connaître pour les protéger ces 40 kms de grèves d'Yverdon à la Thielle, ayant fait récemment l'objet de mesures de protection les classant parmi "les paysages d'importance nationale à préserver".

L'intérêt ultime est dicté par la force des choses. Si rien n'est fait pour ces rivages magnifiques, ils sont condamnés à disparaître ou du moins à perdre toute la valeur écologique qu'ils ont présentement. Donc non seulement une

étude s'impose, mais en plus il y a urgence.

Le cadre de ce travail s'inscrit dans le prolongement du "Plan de protection de la rive sud-est du lac" dont les objectifs définis sont les suivants.

- Conservation du paysage lacustre.
- Conservation à long terme de grandes étendues marécageuses dans leur diversité actuelle.
- Conservation de la continuité de la végétation de rive, et du contact des milieux naturels avec l'arrière pays.
- Protection des éco-systèmes lacustres et riverains.

Ces mesures conservatoires visent à sauvegarder la rive dans son état actuel, voire à l'améliorer, or comme nous le verrons par la suite, le processus d'érosion bien qu'amplifié par le fait historique de la Correction des eaux du Jura, obéit à une loi naturelle. Ceci confère une nature quelque peu paradoxale à cette recherche dans la mesure ou pour une fois les intérêts à court et long terme de protection et de sauvegarde des milieux écologiques s'opposent fondamentalement à l'évolution naturelle du milieu, qui vise à sa disparition.

Enfin, outre le fait de vouloir sensibiliser l'opinion à ce grave problème, un des buts sera de faire une série de propositions cherchant à mettre en échèc le fait inéluctable, si rien n'est entrepris de la disparition de ces rivages.

2. SPECIFICITES DU MILIEU PREDISPOSITION A L'EROSION

Toutes les rives de lac s'érodent même dans le calcaire massif ou le granite. Sans aller jusque-là, une étude récente sur le rivage des Grangettes dans la partie orientale du Léman, met aussi en évidence un recul de la berge, imputable d'après les auteurs à la régression de la roselière, facteur d'encrage et de maintenance de la ligne de rivage. Dans le secteur qui nous concerne, d'Yverdon à Cheyres, la régression des rives est telle, que ni la roselière, ni même les grands arbres n'arrivent à se maintenir sur ces berges mouvantes. Dans ce contexte, c'est la régression mécanique du rivage qui devient largement dominante, et qui ote tout support à une roselière qui ne peut que s'incliner.

C'est un spectacle désolant que d'apprécier sur ce site l'ampleur de la morsure de l'érosion. Mais très vite au-dela du constat physionomique de l'état des berges, il vient à l'idée que pour s'exercer de la sorte, l'érosion rencontre un terrain favorable. Quel cadre physique, et quelles influences spécifiques de ce milieu, le prédisposent à subir plus que tout autre pareille agression ?

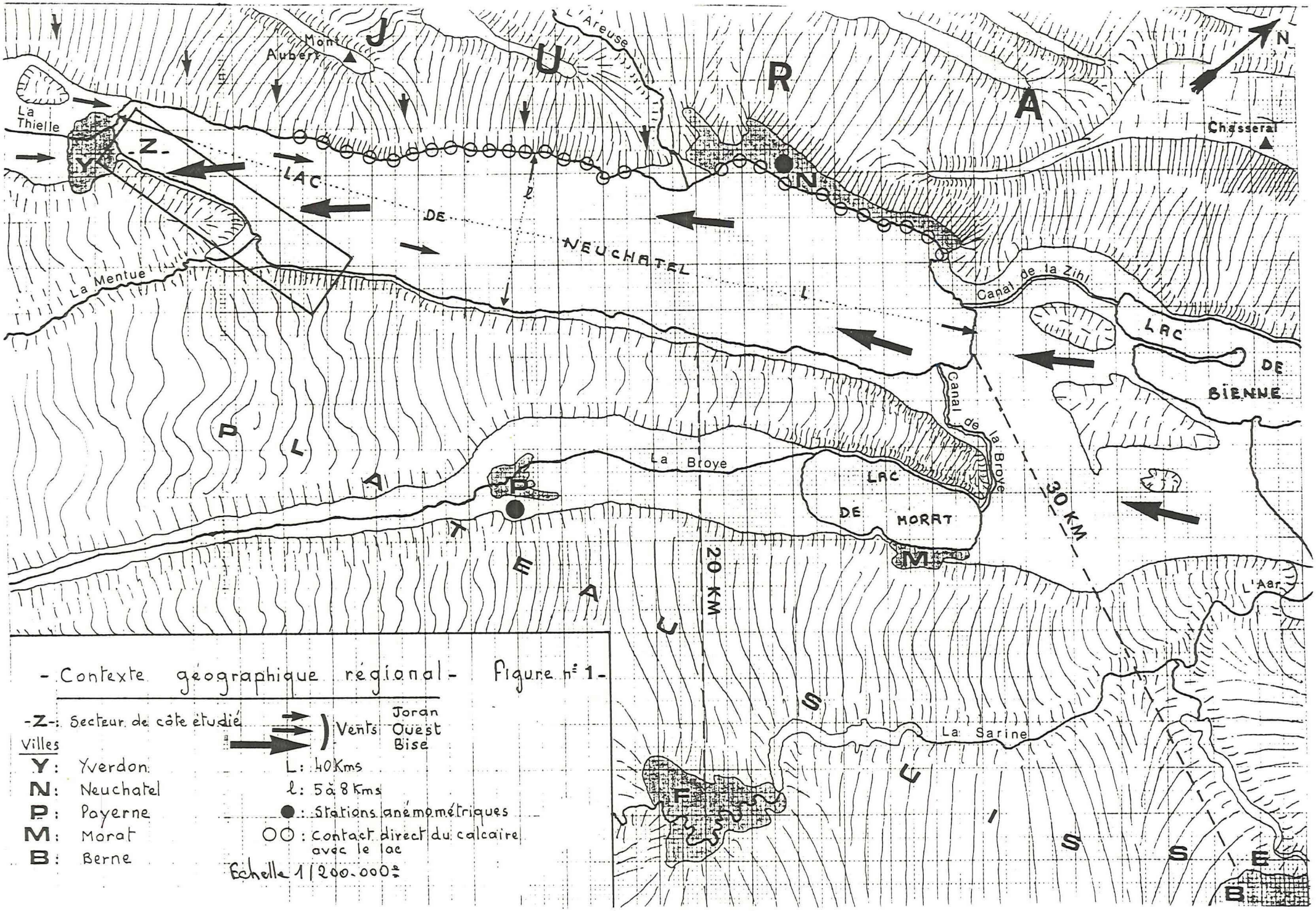
2.2. Le contexte géographique

Au nord-ouest des massifs pré-alpins bernois et fribourgeois s'étend jusqu'au pied du Jura un bassin tertiaire improprement appelé le Plateau Suisse". Celui-ci est constitué d'une épaisseur considérable de matériel détritique et glaciaire issu des Alpes dont la surrection a bosselé sa surface, lui conférant cette physionomie de plateau. La région a été ensevelie sous les glaces des quatres périodes froides successives du quaternaire. A la fonte du dernier glacier Wurmien, il y a une dizaine de milliers d'années, la région a peu de chose près devait présenter son visage topographique actuel. De nombreuses zones sur-

creusées par la masse des glaciers ont donné naissance à une multitude de lacs, situés ordinairement au débouché des grandes vallées glaciaires. Trois échappent à cette ordonnance que l'on retrouve allongés au pied du Jura et épousant la même direction générale que cette montagne S-W, N-E. (figure no. 1) Ces trois lacs subjurassiens, Morat, Bienne et Neuchâtel font partie du réseau hydrographique du Rhin, non influencé jusqu'à une période récente par les eaux en provenance des Alpes. Notre lac, long d'une quarantaine de kilomètres et large de 6 en moyenne occupe une situation régionale bien particulière.

Par rapport aux unités geo-morphologiques, le lac de Neuchâtel longe au N-E sur une quinzaine de kilomètres le pied du Jura. Partout ailleurs il est en contact avec le matériel tertiaire, très résistant quand il s'agit de grès-molassique ou plus meuble comme les sables détritiques provenant de l'altération de cette molasse, ou les accumulations sédimentaires fluviales ou glaciaires. La nature pétrographique des deux rives tend à les opposer en développant une dissymétrie nette de leurs profils. La rive gauche est abrupte et les profondeurs maxima du lac sont toutes proches, tandis que le profil de la rive droite est bien plus doux, caractérisé par l'existence d'une plateforme littorale ou beine très développée. Ceci doit être compris comme une preuve des modalités très diverses qui règlementent les lois de déposition des sédiments lacustres. Plus localement, sur notre tronçon de côte, l'étendue de cette beine peut varier considérablement, ce qui laisse présager des différences notables des effets de l'hydrodynamisme comme cela paraît être le cas entre la baie d'Yvonand et les zones alentours.

En relation avec la direction dominante des flux atmosphériques S-W et N-E, nous avons tôt fait de nous apercevoir que l'orientation générale du lac est la même. Sachant que les vents sont influencés nettement par les unités orogra-



- Contexte géographique régional - Figure n° 1 -

-Z-: Secteur de côte étudié

Vents: Joran, Ouest, Bise

Villes

Y: Yverdon

N: Neuchatel

P: Payerne

M: Morat

B: Berne

L: 40 Kms

ℓ: 5 à 8 Kms

●: Stations anémométriques

○○: Contact direct du calcaire avec le lac

Echelle 1/200.000°

phiques de quelque importance, la remarquable continuité de la barrière jurassienne oriente le sens d'écoulement des vents, après qu'elle ait déterminé l'orientation et la forme générale du lac. Cette concordance ne va pas rester sans effet, qu'il a'agisse des vents de N-E, la bise ou des vents d'ouest, le vent, ce bassin allongé au pied de la montagne dans le même sens que les flux a toutes les chances d'être un couloir privilégié, fortement venté.

A y regarder de près ce corridor s'offre encore mieux aux effets de la bise qu'au vent. C'est sa configuration qui l'y favorise. Tout à fait à l'aval, le lac est largement évasé et ouvert aux courants de N-E, alors qu'à son autre extrêmité pour les vents d'ouest, la plaine de l'Orbe est plus courte, plus courbe aussi, et rapidement obstruée par des collines. De plus la forme en entonnoir du lac vers l'amont, qui coince les flux entre les collines molassiques de l'arrière pays d'Yvonand et les contreforts du Jura a peut-être pour effet d'accroître par compression dans ce détroit, la force de la bise, précisément dans le secteur qui nous intéresse.

Nous pouvons prévoir également que l'orientation de la rive droite dans ce goulet par rapport à la direction générale de la bise risque de créer des conditions particulières de l'hydrodynamisme, amplifiées par cet angle d'incidence, et par les courants lacustres s'écoulant dans le même sens que le vent.

Voici donc ce qu'il peut ressortir de façon assez globale d'une analyse du contexte géographique régional. Retenons pour l'essentiel deux traits spécifiques de ce milieu dont découle l'originalité géo-physique de la région. Il s'agit de l'extrême directivité de l'orientation et la situation des unités orographiques sur la direction et la force des vents, et les vents eux-mêmes dans leur intensité, tout comme celle des facteurs hydrodynamiques qu'ils engendrent. Il s'agit donc d'une rive naturellement exposée de par sa situation,prédisposée à priori à subir les coups de boutoir des facteurs conjugués d'érosion.

2.2. Pression humaine sur le milieu

Le caractère attrayant de la rive sud du lac de Neuchâtel, a eu comme conséquence ces dernières années, un accroissement important de la pression touristique, et de la fréquentation des berges. En été, jusqu'à 20.000 vacanciers occupent la région, et sont attirés principalement par le lac. De nombreux ports de plaisance ont été construits, dont les deux vastes ports de Chevroux et Portalban, qui hébergent respectivement 1150 et 1090 bateaux. De nombreux bateaux disposent d'amarrages sauvages (illégaux) et forment des trouées à travers la roselière.

L'urbanisation des rives par les chalets de vancance, les caravanes-ventouses et les terrains de camping se développe aux dépends des zones naturelles. Des drainages ont été effectués dans le marais pour le convertir en terrain à bâtir, opération très lucrative pour certaines communes. De plus, certaines d'entre elles désirent un accès au lac en zone de réserve naturelle. La mobilité actuelle des vacanciers dans les zones naturelles crèe des accès à travers la végétation et dérange la faune.

Actuellement, la chasse et la pêche ne constituent pas un problème pour la conservation du milieu naturel en raison d'une stricte réglementation et d'une conscience écologique largement répandue. En revanche, les aménagements de la place de tir de Forel et les exercices de défrichage opérés tout récemment par l'aviation constituent une atteinte au milieu naturel.

L'enthrophisation croissante du lac de Neuchâtel, malgré les efforts d'épuration des eaux usées, a des effets sur la végétation riveraine et indirectement sur l'érosion. Cet aspect sera traité au chapitre 4.

Dans le milieu naturellement fragile que nous avons décrit, les atteintes humaines contribuent davantage à cette fragilisation d'où cette contribution des hommes au processus de l'érosion.

3. MATERIALISATION ET ESTIMATION DU PHENOMENE DE RECUL

3.1. Observations qualitatives

Point n'est besoin d'être un éminent spécialiste pour s'en rendre compte, la rive est dans un état lamentable, et les manifestations de l'altération, et même du recul du rivage sautent aux yeux. L'état de la végétation et celui des berges constituent des indices appréciables par tous de la régression généralisée de la rive.

Outre les grands arbres (photo no. 1, 13, 14, 15) peupliers, aulnes, saules sabordés sur place, sapés à leur base par les vagues abattus et enchevêtrés, gisant comme autant d'épaves tantôt côté lac, tantôt sur la berge, une simple promenade sur la dune entre lac et roselière donne un aperçu de l'ampleur des dégâts.

La première ceinture de roseaux est basse, clairsemée, malingre. (photos nos 5,17,21) On la présent fortement exposée. Il suffit du rest d'une légère brise de N.E. pour que ce premier rempart soit battu, et fortement agité par les vagues. Quelques roseaux isolés sont visibles de place en place dans le lac à un mètre ou deux du rivage. (photo no 16, 25) Leur physionomie et leur situation donnent d'une part une idée du sursis accordé à ces braves résistants, et donc du dynamisme du processus de recul, et d'autre part une appréciation de la relative fragilité de la tenue d'une roselière exposée à des conditions d'une extrême rudesse, telles que celles qui s'exercent ici.

C'est peut-être le lacis de rhizomes qui témoigne le plus tragiquement de l'état des lieux. (photos nos4, 5, 6) Directement sur la berge, ou sous l'eau sur quelques mètres, ils ont été exhumés par trop de sapement. Ils crèvent ainsi en noircissant, flottant et se désagrègeant, et avec eux meurt aussi tout espoir de régénération ultérieure.

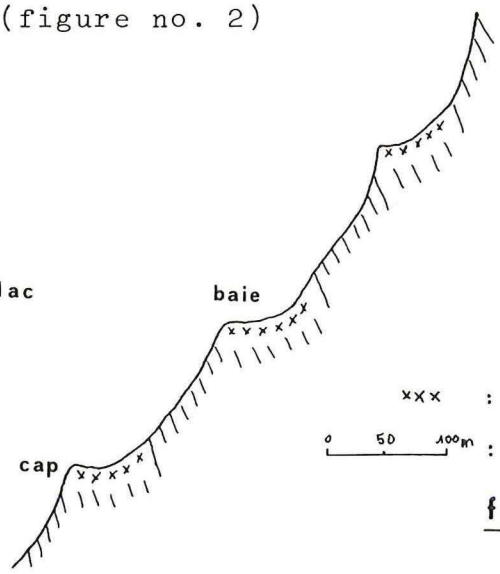
Cette première ceinture de végétation qui n'excède pas 1,20 m. de haut est clairsemée pour la bonne raison que plus de la moitié des roseaux ont été sectionnés à leur base, au niveau du premier noeud laissant le rivage hérissé de moignons noircis de cinq à dix centimètres de haut. (photo no. 6, 17) Par endroit les roseaux restant sont ployés et

succombent sous le poids de gros rouleaux de macrophytes du genre potamot, roulés par les vagues jusqu'au pied de la dune. (photo 19, 21) Ailleurs des déchets divers en provenance du lac, meurtrissent de place en place la roselière avant de s'échouer. (photo no. 18, 20) Il ne semble pas toutefois que ce dernier fait revête sur cette rive et sur ce lac l'importance que d'autres ont reconnu sur le rivage des Grangettes au Léman. (Moret, 1980)

Pour moins spectaculaire qu'elle apparaisse l'érosion des berges est tout aussi active.(photos 11,12,22,23)Peut-être aurions-nous dû commencer par là dans la mesure où l'on ne peut concevoir de végétation saine sur un support malade. Entre Yverdon et Cheyres nous avons reconnu six faciès caractéristiques de berges en proie à l'érosion que nous décrivons ici, et que nous analyserons dans un chapitre ultérieur.

A l'échelle de la centaine de mètres entre Yverdon et les étangs de Champ-Pittet, la côte montre une succession de mini caps et de baies.

(figure no. 2)



xxx : Secteur d'érosion intense

0 50 100m : Echelle

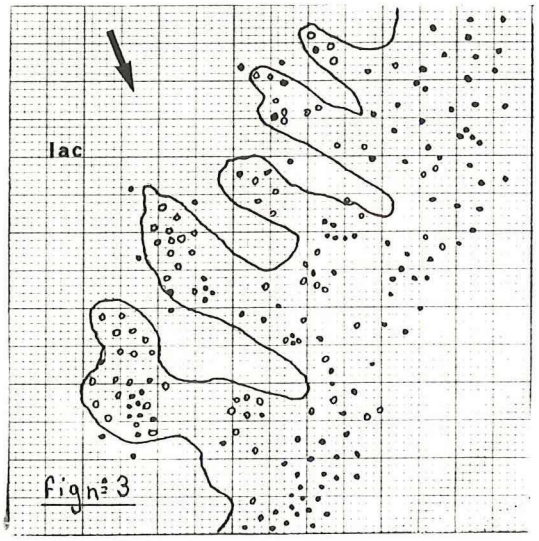
fig: 2

Tout au long de cette alternance, le rivage présente cycliquement tous les stigmates d'une érosion extrêmement active. Il s'agit des zones marquées par des croix sur la figure ci-dessus, qui correspondent à l'aval des baies, et l'amont des caps. Dans ces lieux fortement exposés le recul est tel qu'au-delà d'une érosion ponctuelle de secteurs particuliers de la rive, c'est le profil longitudinal qui régresse mètres après mètres, affecté à tous les niveaux; végétation et état de

la berge, dans sa morphologie, la configuration de sa découpe, et son profil. C'est ce que nous nous proposons d'aborder maintenant.

En relation avec le profil longitudinal caractéristique de la côte dans cette région du lac, la berge présente un profil transversal non moins caractéristique dans ces zones d'intense activité érosive. Ces zones pourraient être définies de berges basses, lessivées superficiellement par le déferlement des vagues, porteuses du facies le plus altéré qui soit de la première ceinture de roseaux, dont la plateforme quasi horizontale s'achève brutalement au contact de la dune en formant un angle vif. (voir profils no 1 et 5 en annexe) (photos 17, 21)

Toujours dans cette zone, mais cette fois à l'échelle du mètre, la berge émergée présente des échancrures et d'autres parties saillantes, comme une côte miniature à rias ou fjords. (photos 1, 17)
Si bien que le lac toujours plus ou moins agité, dévore la berge non sur un front rectiligne, mais façonne et utilise cette découpe compliquée qui sépare les mottes, et accroît d'autant la longueur du rivage offerte à son action érosive. (voir figure no. 3)



-Légende:

: Rhizomes et roseaux sectionnés

: Roseaux malingres de la première ceinture

0 1m : Echelle

: Direction et angle d'incidence des vagues de bise

Tout au long de ce rivage, d'Yverdon au lotissement de VD 8 la berge immergée présente un profil transversal en marches d'escalier. (voir profils no 4,5 en annexeLa cohésion de la première marche, sous le niveau de l'eau est assurée par le lacis de rhizomes. Celle-ci peut avoir de 1 à 3 mètres, bien solide tout au bord maintenue par des rhizomes encore vivants et peu déterrés. Vers le large la marche s'effiloche, les rhizomes sont noirs en voie de décomposition et d'arrachement,

complètement déchaussés. Il arrive parfois que la marche se termine par un léger surplomb sapée par en-dessous et dominant de quelques décimètres les sédiments sous-jacents. Ceci met en évidence l'excellente tenue aux agents d'érosion de ce lacis de rhizomes avant qu'il ne soit complètement mis à nu hors de son support.

A une centaine de mètres à l'ouest des bouches de la Mentue comme au niveau des étangs de Champ-Pittet nous pouvons voir des langues ou bancs de sable émergés ou immergés. (photos 7,8,29,30) Ces masses imposantes de matériaux pourraient inspirer de prime abord au promeneur un sentiment de quiétude vis à vis de l'érosion, sinon d'équilibre. En fait il n'en n'est rien et il faut savoir que ces bancs constitués de dizaines de mètres cubes de matériaux se déplacent subitement, migrent, apparaissent et disparaissent aussi soudainement et qu'à ce titre il faut les prendre pour un symptôme de déséquilibre du rivage à mettre en relation avec l'érosion généralisée qui frappe la côte de ce secteur.

A une échelle moindre, dans quelques anses, nous avons pu voir à la fin de l'été, autrement dit à la fin de la période climatique calme, des accumulations fraîches de sable superposées à l'ancien rivage sabloneux. Cela nous a conduit à croire d'abord à un engraissement de ces petites anses. En fait il n'en n'est rien. Ces accumulations se trouvent dans un état d'équilibre extrêmement précaire, et à la moindre occasion, comme un bon coup de vent, tout sera remis en mouvement.

Vers Cheyres enfin, la dune par endroit est assez haute, bien stabilisée par un tapis herbeux et quelques buissons. L'érosion en attaquant cette berge a créé une micro-falaise assez spectaculaire de 30 à 70 centimètres de haut. (photos 10,11,12,22,23) Les vagues heurtent frontalement cette paroi, crèent par sapement un surplomb. Le tapis herbeux s'affaisse en un rouleau vers le lac, jusqu'à ce que toute une portion du rivage s'effondre. Le mode de progression de l'érosion à cet endroit diffère assez peu de celui que l'on observe du niveau des falaises crayeuses de la Manche. (photos 11,12,22)

3.2. Evaluation quantitative et dynamique

Après avoir pris conscience visuellement de l'altération de la végétation, et du recul de la rive il est tentant d'essayer d'évaluer quantitativement le phénomène ainsi que d'essayer d'entrevoir de quelle dynamique il est animé. Ces évaluations, dans la mesure ou elles sont possibles permettent de dresser un bilan de l'état de la situation actuelle, rattaché à l'évolution générale dans le temps du secteur. Autrement dit, savoir où se situer par rapport au début du processus, jusqu'où celui-ci peut se développer, et à quel rythme.

Plusieurs domaines d'investigation permettent de se donner une idée quantitative du phénomène de recul. La première chose à laquelle on pense c'est de trouver les moyens de mesurer de façon linéaire la régression de la ligne de rivage. C'est ce à quoi nous avons procédé en établissant par piquetages une vingtaine de profils entre Yverdon et Cheyres, selon la méthode figurée ci-dessous. (Fig. no.4)

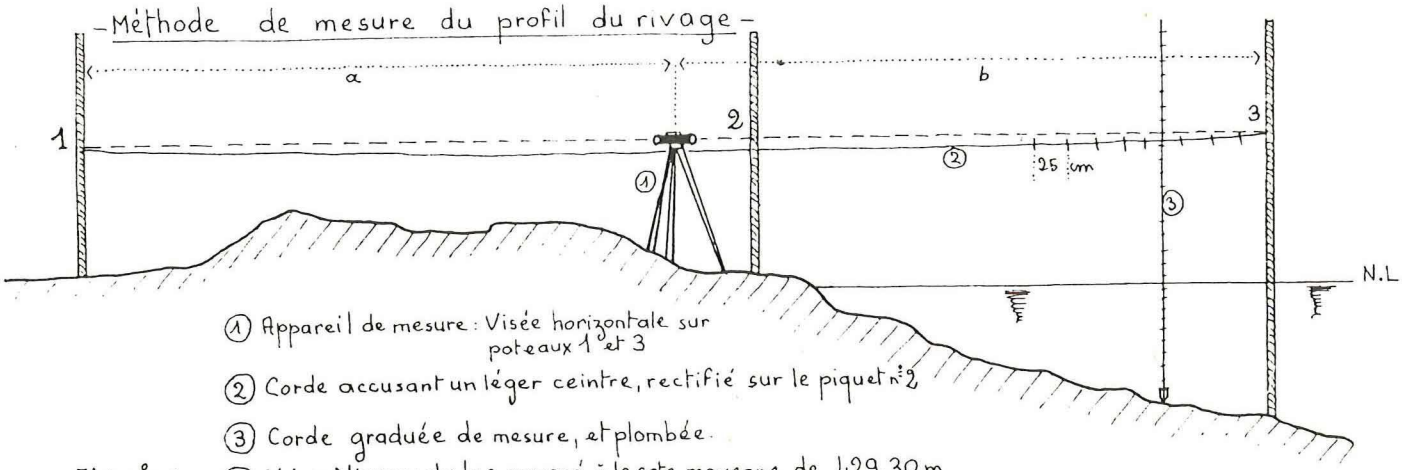


Fig n°: 4

Nous connaissons le site de chaque relevé, et nous établissons très précisément un profil (+ ou - 3 cm). De la sorte nous épinglons définitivement dans le temps à un moment donné une image du profil transversal de la rive. (Voir profils en annexe). Comme l'ensemble de notre côte recule, au terme

d'un certain laps de temps (2 ou 3 ans) un nouveau relevé doit mettre en relief un nouveau profil, indice de la régression du rivage. Ceci doit pouvoir fournir précisément une mesure du recul en m/an mais également une idée, bien qu'approximative, du volume de matériel déblayé en m^3/an.

L'autre domaine d'investigation, ce sont les témoignages tant visuels, parlés, qu'écrits. Ainsi, les plus vieilles cartes à grande échelle (1/25.000^e) que nous ayons consulté, sont celles de l'Atlas Siegfried, corrigées au tout début du siècle, juste après la Correction. Les plus anciennes de 1890donnent le profil longitudinal de la côte juste après l'abaissement du niveau des eaux, et à ce titre sont très précieuses. En comparant ces dernières avec les plus récentes cartes au 1/25.000^e dont nous disposons, nous avons là un autre moyen d'apprécier le recul. Disons tout de suite, et le problème est identique avec les séries successives (1937, 1954, 1974, 1980) de photos aériennes, que cette échelle de 1/25.000 ne permet que des approximation, quand 1 mm sur le document représente 25 m sur le terrain. Néanmoins, plus l'échelle de temps est grande entre les plus anciens documents et les plus récents, et plus les résultats sont concluants, du fait d'un recul appréciable d'autant plus facile à mesurer.

Les planches du cadastre quant à elles, fournissent non seulement une appréciation linéaire, mais spaciale du recul. Ainsi, l'association Ligue Suisse pour la protection de la nature, par l'intermédiaire de Pro Natura-Helvetica, chargée de la gestion et de l'entretien de la Grande-Cariçaie, a fait établir après acquisition de parcelles destinées à agrandir les zones protégées, un nouveau relevé cadastral de ses terrains. C'est alors qu'il est apparu que l'érosion avait spolié l'Association d'un certain nombre d'hectares de marais, disparus sous les flots. Il resterait par ailleurs quelques bornes parcellaires dans le fond de la Baie d'Yverdon immergées à 150 m sous 1 m ou 2 d'eau.

Restent les témoignages parlés avec passion des pêcheurs et des riverains. Précieux également, au-delà des imprécisions ou exagérations, car ils relatent souvent des faits ponctuels; comme telle période de bise exceptionnelle il y a tant d'années, ayant fait disparaître 10 mètres de rive et le chemin avec, telle "troche" de roselière lacustre emportée un beau jour, ou tel banc de sable, à telle période, formé ou disparu soudainement. (cf: Gogel, R. 1973)

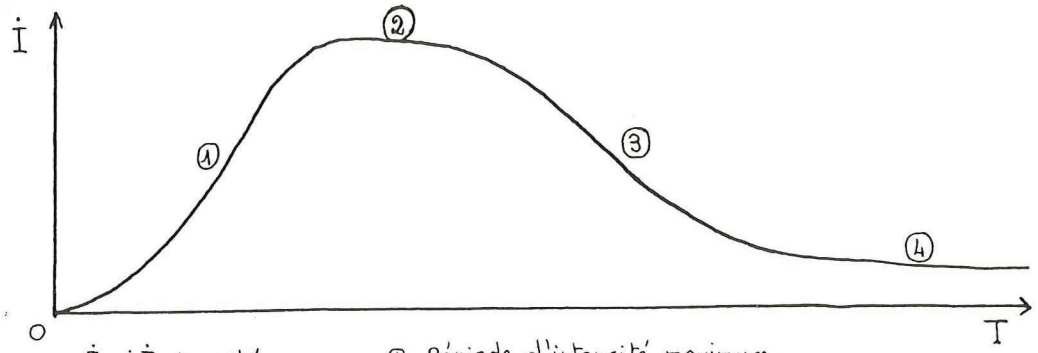
Voici pour la méthodologie de ces évaluations quantitatives et dynamiques. Maintenant nous allons hasarder quelques chiffres, en l'absence des résultats tangibles et relativement précis que nous étions en droit d'attendre de la deuxième campagne de relevés des profils, mais qui ne peut malheureusement pas entrer dans le temps qui nous est imparti pour ce travail. Avant toutefois, il est nécessaire d'apporter trois précisions.

- D'abord, sur la nature du recul généralisé de la côte, il est tout à fait important de ne pas se laisser leurer par les moyennes chiffrées. L'érosion ne s'exerce jamais de façon linéaire, progressive ou régulière mais procède par sautes, par à-coups, par crises. Ainsi quatre jours terribles, de bise, peuvent blesser davantage le rivage, que tout un hiver calme. Autrement dit, un bilan annuel chiffré du recul, par exemple 1,5 m/an peut être mis à 85% sur le compte de deux séries de trois et quatre jours de vent de tempête.

- De plus cette portion de côte en proie à un certain type d'érosion, n'échappe pas à des modèles dynamiques propres à tout phénomène érosif . On peut penser que le processus au lendemain de la Correction a débuté relativement calmement (cf: Chapitre sur les principes de recul de la ligne de rivage) le temps que tous les éléments confrontés aux nouvelles données se mettent en place, puis le phénomène s'est amplifié en accélérant de façon exponentielle, jusqu'à ce qu'un jour prochain après une phase maximum d'érosion on note un ralentissement de plus en plus marqué, jus-

qu'à ce que le processus recouvre une vitesse d'action ordinaire. Tout nous laisse croire, que nous nous trouvons aujourd'hui et pour quelques décennies encore dans la partie la plus ascendante de la courbe. Nous pourrions l'imaginer ainsi. (Fig. no.5)

- Courbe de la célérité des processus d'érosion -



I : Intensité.
T : Temps.
O : Origine 1888.

① Période d'intensité maximum.
② Pallier de stabilisation à un niveau intense.
③ Décélération du procesus.
④ Rythme moyen d'érosion.

Fig n°: 5

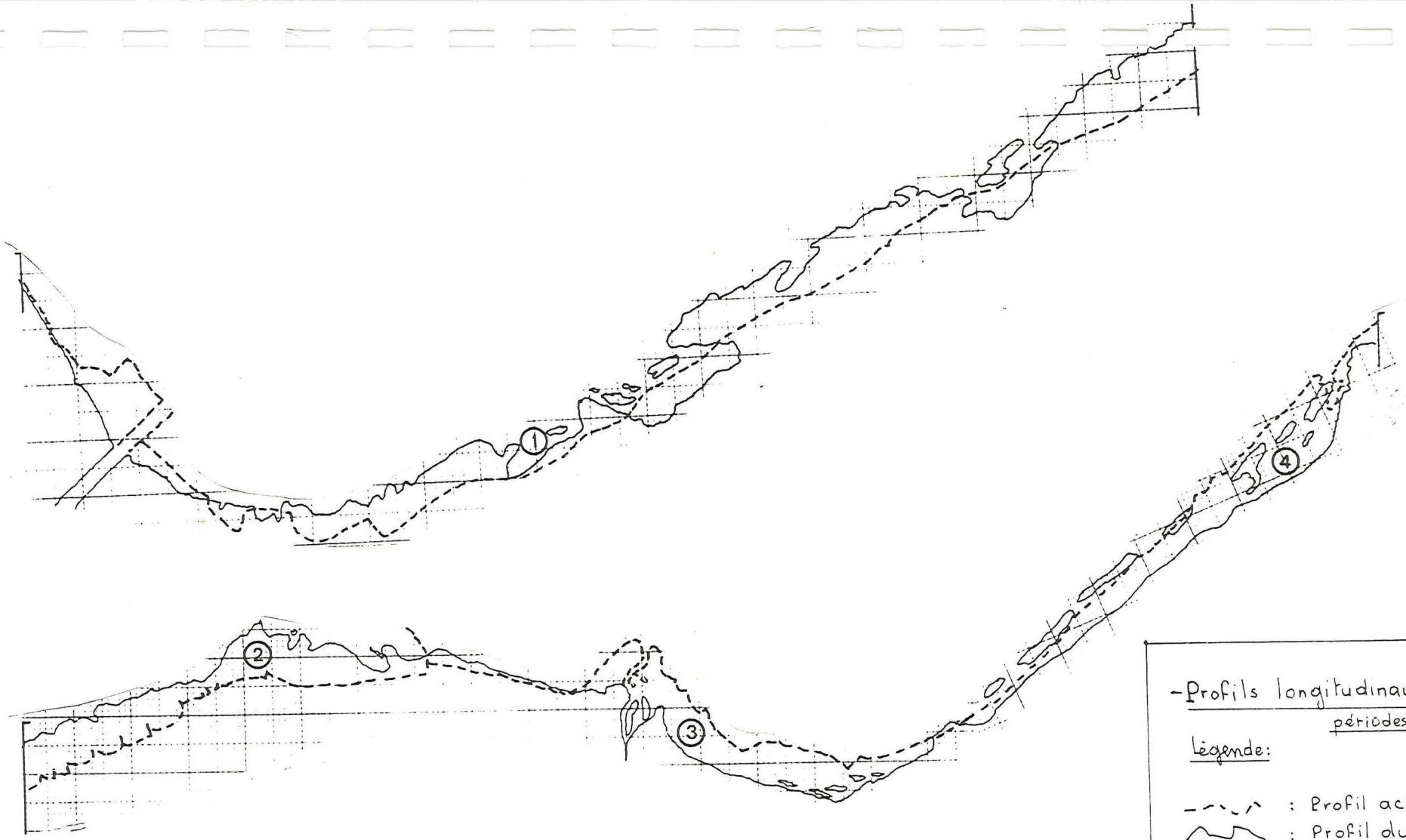
- Enfin dans l'évolution longitudinale du profil du rivage, telle portion de rive peut se trouver alternativement en position d'extrême exposition aux agents d'érosion, ou en position de répit relatif. C'est dire que le dynamisme d'une portion de rivage, dans le contexte général de recul de la côte, peut afficher une relative indépendance de son évolution. C'est ce que nous nous efforcerons de montrer dans l'étude du recul de la rive.

Voici reporté sur la figure no.6 ci-après, à partir de cartes au 1/25.000e flusieurs profils de rivage, à des époques successives.

Une moyenne des mesures de l'évolution de la ligne de rivage à partir de ces cartes au 1/25.000e donne:*

	Evolution du rivage en m	Dynamique moyenne en m/an
Secteur de Champ Pittet	-250	2,57
Secteur de VD 8	-310	3,20
Baie d'Yvonand		
Delta de la Mentue	+180	1,85
Sud du secteur de Cheyres	+250	2,57

* Fluctuations de la ligne de rivage entre la carte Siegfried de 1900 et la carte au 1/25.000e de 1974.



-Profils longitudinaux à différentes périodes-

Légende:

: Profil actuel

: Profil du début du siècle

1 : Recul 250m
2 : Recul : 310m
3 : Avancée : 180m
4 : Avancée : 250m

Echelle: 1/25.000:

Note: En (4) Les bancs de sable préfigurent la côte actuelle.

fig n° 6

A partir des photos aériennes (séries 1937, 1954, 1974, 1980) nous obtenons:

	Recul absolu en m	Dynamique moyenne du recul en m/an
Secteur de Champ-Pittet	-40	1,08
Secteur de Cheyres	-43	1,46
Baie d'Yvonand	-36	0,97

Ceci appelle plusieurs commentaires.
Certains secteurs comme Champ-Pittet ou VD 8 sont depuis l'origine (la Correction) soumis à une évolution régressive intense.
L'histoire des lignes de rivage de la Baie d'Yvonand ou du secteur secteur de Cheyres sont plus compliquées dans la mesure où elles ont évolué dans un sens et dans l'autre.
L'évolution générale de la Baie d'Yvonant est positive, et le recul de 36 m que l'on remarque sur les photos peut quasiment être interprété comme une stagnation de l'évolution, compte tenu de l'approximation des mesures.
Le secteur de Cheyres a beaucoup progressé au lendemain de la Correction. Il s'est rectifié 200 à 250 m plus au large en alignant une série de bancs de sable qui ont fini par constituer un cordon derrière lequel les marais on pu regagner du terrain. Par la suite le recul a repris le temps qu'une beine et un rivage d'érosion se profilent, et l'évolution actuelle de cette zone est redevenue fortement régressive.
Enfin la comparaison de la dynamique moyenne sur près d'un siècle à Champ-Pittet (2,57 m) et la dynamique actuelle 1,08 m tendrait à prouver que les processus de recul ralentissent. Mais encore une fois les imprécisions de relevés de la carte Siegfried et les difficultés de mesures liées à la petitesse de l'échelle 1/25.000^{e} donnent à ces comparaisons un caractère aléatoire.

De ces données, et en tenant compte de l'évolution probable de la célérité des processus d'érosion (voir Figure n° 5), dans une perspective pessimiste, nous pouvons évaluer à 1 siècle et demi le temps nécessaire à la disparition des marais dans la région de Champ-Pittet. Dans une perspective un peu moins sombre, qui tient compte d'une décélération de la vitesse du recul à l'approche de la falaise, nous pouvons chiffrer leur disparition totale à deux ou deux siècles et demi. Ceci ne doit pas faire perdre de vue que d'ici une centaine d'années, et c'est bien là l'important, la bande maigrichonne de marais coincée entre le lac, la route et la voie ferrée n'aura de vigueur suffisante que pour clouer définitivement le bec à toutes les espèces d'oiseaux.

4. ETUDE DES FACTEURS D'EROSION

Après avoir mis en évidence la pression humaine qui tend à fragiliser ce milieu naturellement sensible et prédisposé à l'érosion qu'est le lac de Neuchâtel, et après avoir reconnu physionomiquement et évalué le recul imputable à l'érosion, il est temps d'étudier les facteurs qui concourent à l'altération du rivage.

4.1. Facteur historique

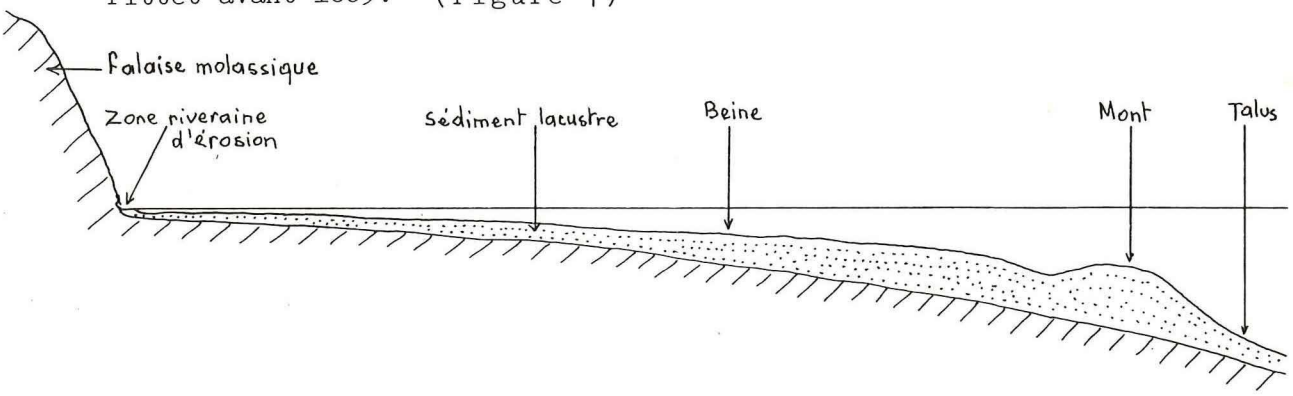
Le lac de Neuchâtel est sûrement avec ses deux voisins Morat et Bienne dont l'histoire est indissociable, le grand lac suisse dont le régime hydrologique a été le plus boulversé par les hommes. Il faut reconnaître que durant des siècles les riverains ont eu a souffrir de ses accès d'humeur: crues exceptionnelles ou étiages castastrophiques. Archibald Quartier cite dans son livre sur le Lac des témoignages pittoresques. En 1718 et en octobre - "Eaux très basses dans la nuit du 21. Personne ne se souvient d'avoir vu le lac "si petit". Pour entrer dans la Thielle les barques devaient "raseler" presque toute leur charge. Le haut des pilotis du port de Péters était à sec et il pouvait faire le tour de sa battue sans se mouiller les pieds". Plus loin en avril 1743 "du 6 au 11, les trois lacs de Neuchâtel, Morat et Bienne avec le Grand Marais, ne paraissent être qu'un seul et même lac".

Pour assagir l'état sauvage du lac, assainir la zone du Grand Marais et offrir de nouvelles surfaces cultivables une correction des eaux du Jura a été envisagée. Immenses travaux de génie civil pour l'époque, ils débutent en 1869 et se terminent en 1888. Les faits marquants qui nous intéressent sont: en 1878 le détournement de l'Aar dans le lac de Bienne, l'équi-niveau des trois lacs par l'approfondissement des canaux qui les relient, la régulation du niveau général des lacs par une écluse installée à Nidau en aval du lac de Bienne en 1888, et surtout l'abaissement de 2,73 m. du niveau moyen des eaux, avec son corollaire qui fut l'exondation d'une ceinture de terrains plus ou moins vastes selon les secteurs, sur tout le pourtour des lacs.

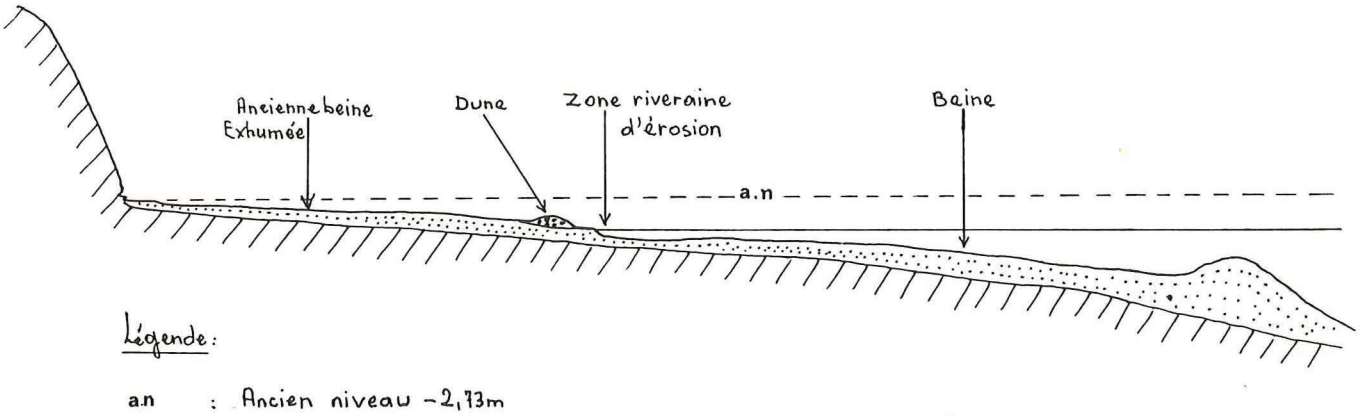
Cette correction d'envergure fait dire à Archibald Quartier, et en cela nous le rejoignons, qu'il y a eu deux lacs de Neuchâtel, celui d'avant

les travaux, et un autre après la Correction. Ce nouvel état plus artificiel obtenu après 1888 relève de l'intervention humaine, c'est à dire des modifications qui lui ont été apportées. Mais les effets et incidences de ces grands travaux sur notre lac contemporain, nous préférons les attribuer au fait historique bien défini dans le temps, qu'est la Correction des eaux du Jura, et nous réserverons l'expression de facteurs humains aux pressions et influences exercées aujourd'hui sur le lac.

Voici quel pouvait-être le profil transversal dans la région de Champ-Pittet avant 1869. (Figure 7)



Voici le profil transversal dans le même secteur tel qu'il est aujourd'hui. (Figure 8)



En s'abaissant de 2,73 m., les eaux exondent la moitié environ de la surface de la beine, et déplacent la zone riveraine d'érosion dans un secteur autrefois immergé. Ceci instaure subitement une rupture du profil d'équilibre, que tous cours d'eau, tous lacs tendent idéalement à établir. Depuis la fonte des glaciers du quaternaire, et malgré des variations importantes de niveau des eaux, scientifiquement établies, le profil d'équilibre de cette longue beine avait dû suivre et se réajuster, en disposant d'assez de temps, à la loi dictée par ces fluctuations. La Correction pour le lac correspond en fait à un accident affectant son niveau, et par voie de conséquence, le profil transversal des zones riveraines. Le fait artificiel de la Correction a constitué dans l'histoire de l'évolution du lac un traumatisme dont il n'a pas fini aujourd'hui de se remettre. En maints endroits, l'état de la rive nous donne la preuve que le lac court anarchiquement à la recherche de ses anciens profils, de ses anciens équilibres, même s'il doit les établir légèrement différemment. C'est un point important de considérer que ces efforts de retour à une situation antérieure font l'objet d'une dynamique, qui pour être désordonnée, n'en n'est pas moins tout à fait naturelle.

Dans ce cadre le recul de la berge ne doit plus surprendre. A terme, il faudrait que le lac revienne battre par haut coefficient le pied de la falaise molassique, pour que le préjudice soit réparé et oublié. Entre temps, des milliers de m^3 de matériaux auraient été déblayés, provenant de l'érosion du rivage, et de l'abaissement du plancher de la beine. L'hydrodynamisme s'attènuerait au fur et à mesure que la ligne de rivage se rapprocherait de la falaise, et que s'établirait un nouveau profil d'équilibre sensiblement superposable à l'ancien, mais à un niveau inférieur. On pourrait noter enfin un bilan de matériaux quasi équilibre entre l'engraissement et l'abrasion, avec stabilisation du rivage.

Cette prospective inspirée de l'évolution naturelle probable du secteur est en contradiction comme nous le notions précédemment, avec les intérêts de sauvegarde d'un milieu unique en Suisse. C'est donc, une fois n'est pas coutume, contre l'évolution naturelle qu'il va falloir se protéger, et trouver des solutions.

Le facteur historique, que constitue la correction des eaux du Jura, est hérité du passé. Il a déterminé un nouvel état, une seconde nature pour le lac, mais n'agit pas en tant que tel. On pourrait lui opposer les facteurs actifs que nous allons étudier maintenant et qui mordent à belles dents dans la rive.

4.2. Facteurs humains

Les hommes, en tant qu'utilisateurs du lac, exercent une action, et cette action, dans certaines circonstances, peut contribuer à altérer le milieu. En relation avec l'érosion, on constate que la régulation des eaux joue un rôle important. En rapport avec les niveaux du lac, on peut distinguer deux périodes :

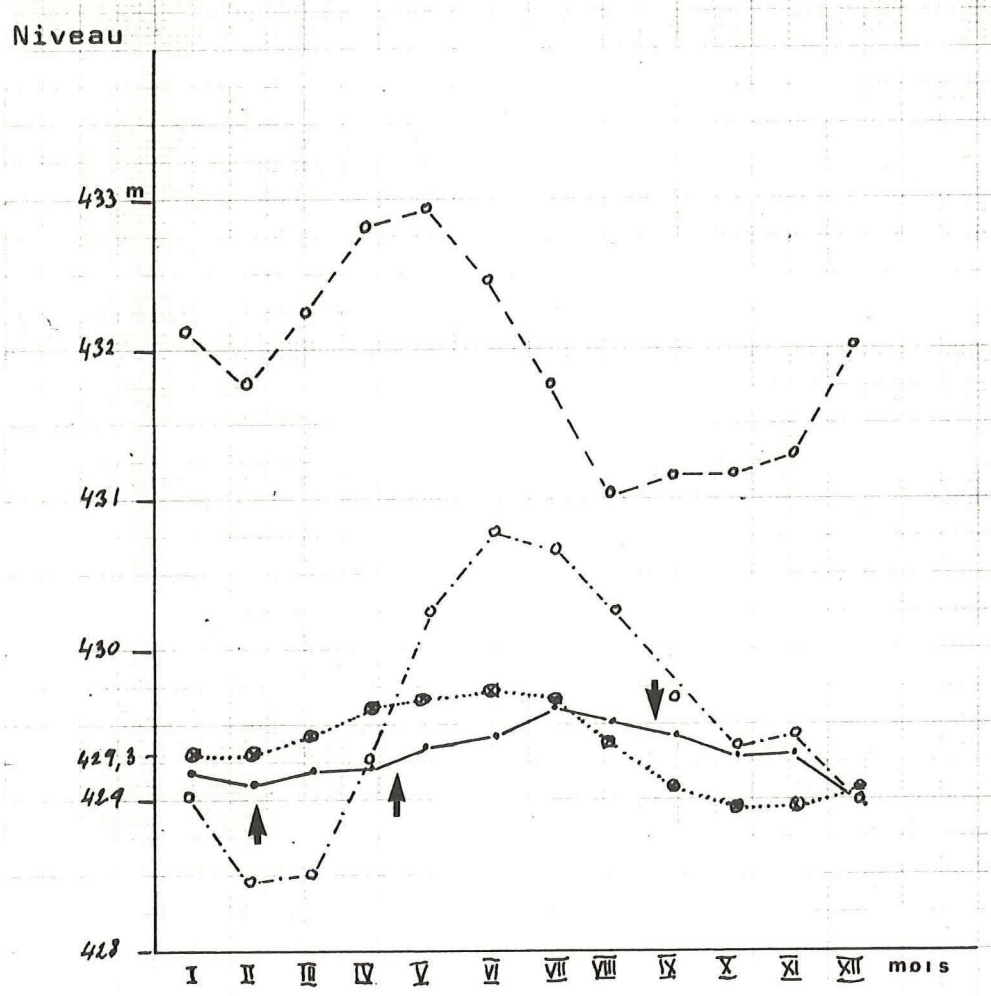
- Avant 1869, le lac était à l'état sauvage et réagissait naturellement aux divers phénomènes capables de faire varier son niveau. Le régime était déterminé par les conditions météorologiques règnant sur le Jura.

- Après 1889 (fin de la première correction), le lac a acquis un nouveau régime, à tendance davantage alpine avec le détournement de l'Aar dans le lac de Bienne. De plus, son niveau est dorénavent contrôlé par l'homme et cela caractérise son rôle actif. Malgré ces travaux, la première correction conduit à une augmentation des fluctuations de niveau de 2,3 à 3 m., créant des innondations au niveau des lacs de Neuchâtel et Morat. Pour pallier ce résultat indésirable, une deuxième correction des eaux du Jura a été nécessaire et a aboutit à un asservissement complet du lac du point de vue de ses niveaux.

Actuellement, ces niveaux sont à la mercides milieux économiques désireux d'une utilisation optimale des eaux pour les centrales hydroélectriques de l'Aar. On constate que les niveaux obtenus de cette façon ne sont pas en corrélation avec les exigences écologiques des milieux préoccupés de protection de la nature, de la faune et de la pêche.

La suppression des crues entraine un assèchement puis un embroussaillement du marais. Les niveaux trop bas de mi-février entrave la fraie des poissons dans le marais. Les élévations du niveau après le 15 avril peuvent provoquer la noyade des nids construits au sol. (Figure No 9)

Les niveaux: fluctuations et déphasages.



Légende

o— — —o avant la première correction des eaux (1868)

o—·—·—o après la première correction des eaux (1892-1963)

•———• niveaux en 1982 (après la deuxième correction)

⊗·····⊗ niveaux souhaitables pour la protection de la nature

➔ périodes de déphasage sur profil actuel par rapport au profil souhaitable

Fig. no:9

En ce qui concerne l'érosion, on distingue deux situations :

- En régime de hautes eaux, la profondeur augmentant, les vagues conservent toute leur énergie jusqu'à la rive et permettent l'action de sape par les bois flottants.

- En régime de basses eaux, l'érosion éolienne peut agir au niveau des berges et provoquer une migration de la dune littorale. D'autre part, en temps d'hiver les jeunes pousses de roseaux émergées peuvent geler (Moret, 1980), entrainant l'affaiblissement de la roselière littorale et des rhizomes qui constituent les éléments stabilisateurs du sol de la rive. Ceci contribue à l'érosion des berges.

Un autre facteur indirect d'érosion pouvant être pris en compte, est constitué par les modifications que l'homme a apportées au paysage rural de l'arrière-pays. En suppriment des zones humides, en arrachant les haies, en endiguant rivières et ruisseaux et en drainant forêts et champs, les crues "bi-centenaires" sont devenues bi-annuelles et elles amènent d'énormes quantités d'alluvions et de bois dans le lac. Preuve en est la crue d'orage de la Mentue dans la nuit du 15 au 16 août 1982, transportant plusieures tonnes d'arbres et de branchages qui ont formé une île flottante sur un haut-fond avant d'envahir la roselière. Sans l'action rapide des responsables de ce secteur, les conséquences auraient été désastreuses.

En rapport avec la navigation (les installations portuaires et les amarrages), le facteur de l'érosion a souvent été négligé. Ainsi, le fort de Grandson, mal orienté, a été déchaussé par forte bise. D'autres ouvrages humains, de stabilisation des berges, au niveau de la pointe d'Yvonand, ont été bien conçus après une étude et des essais sur plusieures années.

Les draguages effectués jusqu'ici sur la rive sud n'ont pas eu d'effet sur l'érosion des rives, comme cela a été le cas aux Grangettes. La construction de routes dans cette région pourrait entrainer l'extraction dans la beine de grandes quantités de matériaux et provoquer des glissements pouvant se répercuter à grande distance.

4.3. Facteurs mécaniques

En remontant à la source et de façon mécanique ont peut dire que les différences de pression entre masses d'air, engendrent des vents qui en soufflant sur un plan d'eau donnent naissance à des vagues, lesquelles en s'organisant déterminent des crêtes de houle nanties d'une certaine énergie qui dans des circonstances particulières peuvent mettre en mouvement une partie de la masse d'eau sous forme de courants. On peut penser d'autre part que tous ces éléments dynamiques, qui tous effets conjugués déploient assez de force pour modeler une facade maritime, en auront à revendre pour façonner un rivage lacustre. Bien sûr, il faut que les conditions du milieu y soient favorables, que le lac prête le flanc. C'est précisément ce qui est apparu en analysant les spécificités du milieu mettant en relief une prédisposition particulière à l'érosion. Et dans l'observation des stigmates de l'érosion sur la berge et la végétation, c'est l'ampleur du phénomène qui saute aux yeux.

Il reste maintenant à analyser les modalités d'action de cette mécanique, et déterminer la part que prend vis à vis du recul du rivage, chaque facteur.

4.3.1. Les vents

Dans notre région, les vents constituent la source d'énergie initiale qui permet aux processus d'érosion, facteur dynamique, de se développer. D'autres sources d'énergie servant l'érosion pourraient être prises en compte, telle que celle provenant des eaux de pluie ou de ruissellement affectant la rive, ou encore celle issue des grands mouvements verticaux saisonniers d'origine thermique, qui mettent en mouvement des masses d'eau considérables, et déterminent des courants de densité. Ces facteurs d'érosion apparaissant très secondaires au vu des autres, et difficilement décelables ne seront pas considérés.

L'action mécanique du vent peut être direct. Ainsi un bon coup de Joran au printemps, sur un arbre qui vient de mettre ses feuilles, et sapé consciencieusement à sa base par les vagues hivernales, risque d'être abattu. On l'observe couramment tout au long de la rive.

Ces derniers déchaussés, les racines mises à nu,

sont bien plus sensibles aux coups de vent qu'à un régime régulier. Ils le sont aussi davantage au printemps et en été, une fois feuillus. Le Joran est sûrement un spécialiste de ces hécatombes, avec ses rafales de printemps, et son angle d'incidence perpendiculaire à la rive droite. Ce qui n'exclut nullement que la bise et le vent soient incapables de tels méfaits.

Le vent agit directement aussi par érosion éolienne au sens strict. Des rafales très puissantes arrivent à mettre en mouvement les grains de sable les plus fins de la dune et à modifier très légèrement son profil. Dans le cas qui nous intéresse, de par la direction des vents, la migration des grains de sable pousserait la dune vers l'intérieur du marais. Néanmoins notre milieu se prête assez mal à l'érosion éolienne dans la mesure où, d'une part la dune est une accumulation de sables grossiers (0.3 à 1 mm) ne rappelant que de très loin les sables dunaires de l'océan, et encore moins ceux des zones désertiques, et d'autre part la végétation atténue très vite, et considérablement les effets du vent. Les dunes nues, telles que celles de Champ-Pittet ou de la baie d'Yvonand constituent de toute évidence des milieux plus propices à l'érosion éolienne. Il resterait à l'évaluer ce que nous n'avons malheureusement pas eu l'occasion de faire en l'absence de vents suffisamment forts.

Paradoxalement, c'est indirectement que l'action des vents meurtrit le plus le rivage. Vecteurs d'énergie, ils génèrent l'essentiel de l'hydrodynamisme du lac, exception faite des mouvements d'origine thermique, ou liés à la rotation de la terre. C'est l'hydrodynamisme qui est facteur d'érosion, par l'intermédiaire du vent. C'est sous cet angle que nous allons les étudier maintenant, et dans le contexte bien précis de ce secteur de la rive droite.

Etudier les vents qui balayent le rivage entre Yverdon et Cheyres n'est pas chose facile puisqu'il n'existe aucune station anémométrique. Les deux plus proches sont Neuchâtel et Payerne. Chacun connaît la dépendance de ces courants à l'égard de la topographie régionale, c'est pourquoi toute extrapolation à partir des deux stations pré-citées est hautement hasardeuse. Encore peut-on utiliser avec un certain profit les données de Neuchâtel, quant à Payerne, seules des moyennes annuelles peuvent être comparées et avec circonspection. Le fait climatique ponctuel, en

définitive, c'est grace au témoignage des riveraines, des pêcheurs surtout qu'on en mesure le mieux les effets.

Nous avons vu que le lac constituait un couloir de prédilection pour les vents, bise et vent d'ouest. Rapporté à notre tronçon de côte les vents d'ouest ne nous intéressent guère dans la mesure où ils ne disposent que d'un "fetch*" très court (3 km à l'extêmité de la zone de Champ-Pittet). Par contre à Cheyres avec 11 kms de fetch les vagues de vent ont le temps de s'organiser. C'est ce que nous avons pu constater de visu par vent moyen, en observant les micro-falaises bien battues par des vagues d'ouest (photos 11,12,22,23) Nous ne nous attarderons pas sur cette dernière situation, car elle est symétrique à celle que nous allons développer avec la bise. Enfin le mot est lâché, et si certains pouvaient croire que le lac a des problèmes affectifs, ils n'auraient pas entièrement tort, tant il est vrai que le lac est bien malade de sa bise. Principalement dans notre zone. Voici un tableau de la fréquence des vents, sur une période malheureusement courte, ayant provoqué des vagues sur le lac de Neuchâtel, exprimée en % du nombre de jours de chaque mois des années 1959 à 61. (d'après Solleberger)

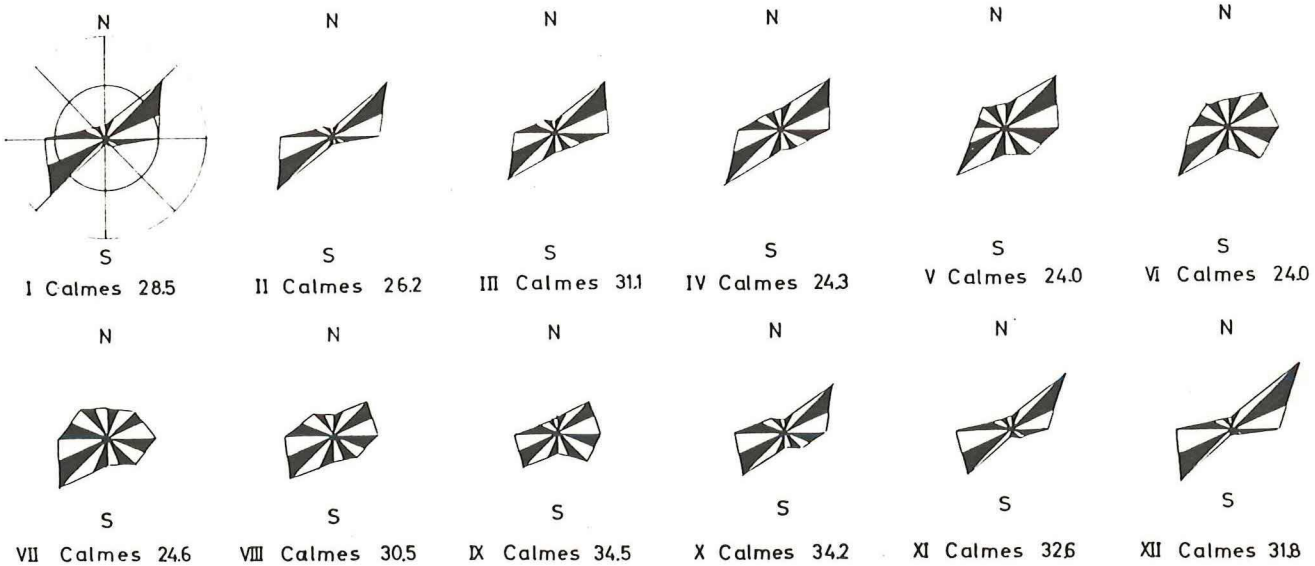
	E bise	SW vent	NNW Joran
Janvier	25,8	30,6	0
Février	6,1	19,7	0
Mars	18,8	5,4	2,7
Avril	17,8	20,6	5,0
Mai	25,2	13,4	8,1
Juin	13,0	7,8	5,6
Juillet	10,8	22,7	4,3
Août	17,2	17,7	1,1
Septembre	25,0	11,1	1,1
Octobre	9,7	24,2	1,6
Novembre	17,2	15,0	1,1
Décembre	29,9	23,2	0,5
Hiver	17,2	16,7	1,2
Printemps	18,7	13,9	6,2
Eté	17,7	17,2	2,2
Automne	18,9	20,8	1,1

* Fetch : Longueur du plan d'eau sur laquelle les vents peuvent exercer leur action.

Il ressort de ce tableau que la plus grande quantité de jours de bise tombe en décembre. Le 6,1 du mois de février semble être une anomalie liée à la trop courte période d'observation. Les régimes de bise sont donc surtout hivernaux, ce qui ne doit pas surprendre lorsqu'on les sait en relation avec les hautes pressions stagnant sur l'Europe du Nord. Les vents d'ouest qui dépendent des dépression atlantiques, sont difficiles a situer saisonnièrement, bien qu'ils dominent également en hiver. Le Joran quant à lui, vent thérmique ne s'expliquant que par la présence toute proche du Jura, n'ayant rien à voir avec les grands centres d'action barométriques, est un vent de printemps. Il souffle peu comme on le sait, mais ses bourrasques sont terribles, subites et redoutées des pêcheurs.

Maintenant si l'on considère les régimes mensuels, établis à partir de Neuchâtel, et que l'on peut raisonnablement extrapoler à notre région, les douzes roses des vents rendent excellemment compte de l'extrême bipolarisation hivernale des régimes moyens mensuels. A l'inverse, en juillet par exemple, aucun vent ne domine vraiment.

Rose des vents (Neuchâtel) Fig. No 10



Avant d'en finir avec les vents, vecteurs d'énergie et générateurs de l'hydrodynamisme, il faut apporter une précision sur leur nature, car tout oppose du point de vue de l'hydrodynamisme, un coup terrible de Joran et quatre jours ininterrompus de régime de N-E. Les vagues pour se former ont besoin de constance. Ainsi un vent assez régulier et

moyen comme une bise de force 4 (échelle de Beaufort) donnera naissance à des vagues longues et agressives sur notre portion de littoral. A l'inverse, d'une bouffée de Joran de force 7 ou 8 qui peut renverser des arbres ne résultera qu'un bon clapotis court qui s'atténuera dès la saute passée pour reprendre peut-être un moment plus tard. Les riverains gardent plus présent à l'esprit ces coups de vents dévastateurs qu'un régime régulier, quand le rivage est relativement épargné. Enfin, l'actualité nous oblige à dire deux mots de la terrible tempête de foehn de novembre 1982, qui a fait des millions de dégâts en Suisse, affectant le Valais, la partie orientale du lac Léman, ainsi que les vallées du versant septentrional de l'Oberland-bernois, et ce jusqu'à Zurich. Ces vents de tempête dans toute la région du lac de Neuchâtel n'ont été ressentis que très faiblement.

4.3.2. L'hydrodynamisme

Une partie de l'énergie du vent est transférée à la surface du plan d'eau, qui connaît alors une certaine agitation. Cette dernière est fonction de plusieurs facteurs dont l'intensité du vent, la constance de son régime, et la longueur du fetch. Ces mouvements dans le cadre de notre travail ne nous intéressent que dans leur relation avec l'érosion de la rive. Dans cette acception nous nous apercevrons schématiquement que l'hydrodynamisme vertical est à mettre sur le compte des vagues, et horizontal sur celui des courants.

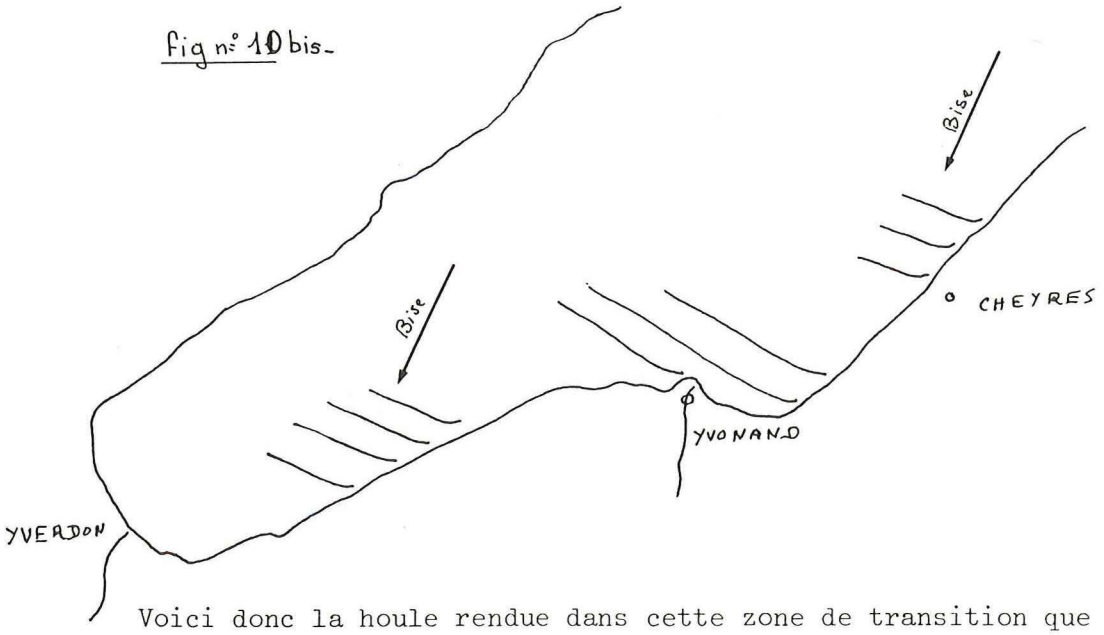
Le plus simple est d'envisager une situation donnée. Considérons un type de temps hivernal classique de N-E caractérisé par un courant moyen et soutenu (force 3, 4 avec rafales de 5 Beaufort). La bise résultante de ce type de temps, va emprunter ce couloir de prédilection constitué par la dépression tertiaire sub-jurassienne. Conformément à l'orientation générale de cette dépression, notre vent aborde le lac de Neuchâtel par le nord et s'écoule à sa surface sans rencontrer le moindre obstacle sur toute sa longueur, soit près de 40 km. Il est important de bien se rendre compte que 40 km de fetch pour un lac européen constitue une valeur extrêmement élevée, que le Léman pourtant plus grand n'offre pas, du fait de sa configuration en arc, et de la direction de ses vents. Il faut s'attendre donc qu'à vent équivalent, Neuchâtel soit le plus agité ce que corroborent des témoignages oraux et écrits dignes de foi, faisant état par vents de bise exceptionnels de vagues de 2 mètres de haut dans sa région amont, autrement dit dans notre secteur. C'est dire qu'exceptionnellement, la surface du lac peut présenter un degré d'agitation d'une ampleur propre ordinairement au milieu marin, avec toute les conséquences sur le milieux, et les activités humaines auxquelles on peut s'attendre.

Voyons les modalités de la progression et de la formation des vagues. Sur les hauts-fonds de la région aval, dans le cas du courant de N-E défini plus haut, se développe un clapotis peu conséquent. Quelques kilomètres plus au sud le clapotis initial commence à s'organiser avec l'apparition de vaguelettes. Encore plus en amont des vagues se forment, et le fetch augmentant elles ne tarderont pas après quelques dizaines de kilomètres à donner des lames plus longues qui tendent vers

une onde cylindrique à profil sinusoïdalqui n'est rien d'autre qu'une houle. Les dimensions et la configuration du lac permettent donc le développement de caractéristiques de son agitation proches de celles du milieu marin.

Cette houle de N-E de direction constante perpendiculaire à l'axe du vent, arrive sur la côte d'Yverdon à Cheyres en formant un angle variable selon l'orientation du rivage. Il est de 30° environ d'Yverdon au nouveau port d'Yvonand, de 30° également du fond de la baie d'Yvonand à Cheyres et de 80°, autrement dit presque perpendiculaire à ce tronçon, du port d'Yvonand au fond de la baie. Nous verrons par la suite l'importance extrême de ce facteur de l'angle d'incidence des vagues par rapport à la ligne de rivage. Nous avons noté d'autre part, à la fois depuis la côte et depuis un bâteau que cette houle à quelque distance de la rive (de 150 à 100 m) tend à s'incurver pour devenir à quelques mètres de la berge beaucoup plus parallèle à cette dernière. (Figure 10 bis)

fig n° 10 bis.



Voici donc la houle rendue dans cette zone de transition que constitue la zone littorale.L'onde sinusoïdalequi déforme la surface du plan d'eau, inflige des mouvements, des tensions, des turbulences aux niveaux inférieurs. Bien entendu plus l'onde est ample et plus la masse d'eau perturbée par ces mouvements est conséquente. Par la force de vent de l'exemple choisi précédemment, nous pouvons nous attendre à des creux d'une cinquantaine de centimètres. Il est possible de déterminer

mathématiquement quelle tranche d'eau est perturbée par de tels creux. En fait de nombreux facteurs influent (vitesse du vent au contact de la surface, densité, longueur d'onde, rugosité des fonds), et les auteurs sont loin d'être unanimes sur la formule. En relation avec l'érosion ce qui va retenir notre attention, c'est à quelle profondeur et à quelle distance de la rive la déformation de surface engendrée par une onde de 50 cm, commence à perturber les niveaux superficiels de sédiments. En d'autres termes à partir de quel moment la houle acquiert une fonction érosive. Sans d'autres précisions qu'une estimation mathématique, une observation attentive, et une enquête auprès des pêcheurs, les sédiments superficiels qui se trouvent situés au-dessus de la courbe bathymétrique des 2 m, sont influencés par cette houle, très ordinaire au demeurant, d'un demi-mètre. C'est dire que même par temps moyen, vu la morphologie de notre lac, des km^2 de beine lacustre sont en proie à l'action érosive des vagues. A ce propos, Solleberger qui fait descendre très bas semble-t-il (jusqu'à 20 m de profondeur) la tranche d'eau sensible et influencée par les mouvements et déformation dus aux vagues, estime à 29% de la surface totale du lac, l'aire soumise à ces influences. Personnellement, nous pensons à moins. On peut estimer qu'à 150 m de la berge, devant Champ-Pittet, cette houle entreprend son action. Ceci du reste se marque visuellement dans le paysage, lorsque le lac devient laiteux, jaune verdâtre, bien qu'il ne faille pas trop se fier à cette délimitation chromatique pour déterminer le seuil d'érosion, du fait de tous les mouvements qui animent la masse d'eau. Par très gros temps, il ne fait pas de doute que la beine sur toute sa largeur, jusqu'au talus est touchée, et même au-delà de la courbe 425 m.

Ces lames longues, organisées en houle parviennent à la rive, douées d'une énergie supérieure à celle de vagues courtes qui s'amortissent très vite par frottement sur le plancher sédimentaire. Si la houle est forte à une certaine distance du rivage on note une première ligne de déferlement d'autant plus éloignée que l'amplitude de l'onde est conséquente. Par vent fort à très fort plusieures lignes d'écrêtage des lames peuvent être visibles, sur 150 à 200 m, avant le gros rouleau final du niveau de la rive. On considère que l'énergie de la houle commence à s'atténuer à partir de la première ligne de déferlement .

La majeure partie de l'énergie libérée se situe bien entendu dans le dernier rouleau au contact de la rive, et c'est à ce niveau que l'érosion est maximum. Voici donc décrits l'essentiel des mouvements verticaux affectant la surface, et la tranche d'eau, soumises aux effets dynamisant des vents.

D'autres mouvements touchent la surface du plan d'eau. Les pêcheurs les connaissent bien, qui voient leurs filets dériver de plusieurs centaines de mètres en une nuit, ce sont les mouvements horizontaux, les courants. Tous ne nous intéressent pas, tels ceux qui mettent en mouvement à certaines saisons et pour des raisons thermiques des masses considérables d'eau également ceux qui sont liés à la rotation de la terre. Par contre dès que des mouvements latéraux concernant la zone littorale, et nantis de certaines caractéristiques physiques, sont susceptibles de maintenir en suspension et transporter des matériaux, il faut s'attendre à leur voir jouer un rôle dans les principes généraux de l'érosion. Précisons que la zone littorale est très méconnue du point de vue de ses courants.

Les effets de ces mouvements sont plus difficiles à cerner que ceux des vagues. Moins spectaculaire, les modalités et les facteurs de leur activité sont complexes. Ils puisent leur énergie à partir des vents, mais surtout à partir des vagues. Ceux qui nous intéressent ici, dépendent indirectement de l'action des vents, à la différence des grands courants marins et sont intimement liés aux effets hydrodynamiques des vagues. Mais ce n'est pas tout, car des lames aussi déchaînées soient-elles n'engendrent pas forcément de courants. L'orientation du lac par rapport aux flux atmosphèriques, et surtout l'angle d'incidence de la houle sur notre portion de littoral en conjuguant leurs effets aux mouvements verticaux de la surface du plan d'eau, donnent naissance à des courants. "Le déferlement des lames obliquement au rivage provoque des transports d'eau parallèlement à la rive, dans le même sens que la houle, et leur maximum de vitesse se trouve dans la première ligne de rouleaux. Ces transports s'appellent "long shore currents" ".
(J. Larras) (Figure no. 11)

fig n°: 11

- Sens de déplacement des "long shore currents".

Légende :

: Courants latéraux.

: Vents de bise.

: Vagues et rouleaux déferlants.

- Coupe transversale dans la première ligne de déferlement.

Nous avions bien songé mesurer la célérité des courants littoraux grâce à un appareil de ce type simple, facile à réaliser soi-même et relativement bien adapté à des zones peu profondes. Malheureusement le temps nous a manqué. Nous pensons néanmoins qu'il s'agit là d'un axe d'investigation d'une extrême importance, pouvant donner bien à des études futures. Une analyse détaillée des courants peut fournir une idée des seuils d'érosion à partir desquels en fonction de la granulométrie, tel matériaux est susceptible d'être transporté, et par là à une estimation des volumes déplacés. Ainsi pourrait-on dire, dans l'état de nos connaissances la face cachée de l'érosion est imputable aux courants littoraux, et ces derniers brassent de façon occulte, en l'absence de plus de précision, des milliers de mètres cubes de matériaux.

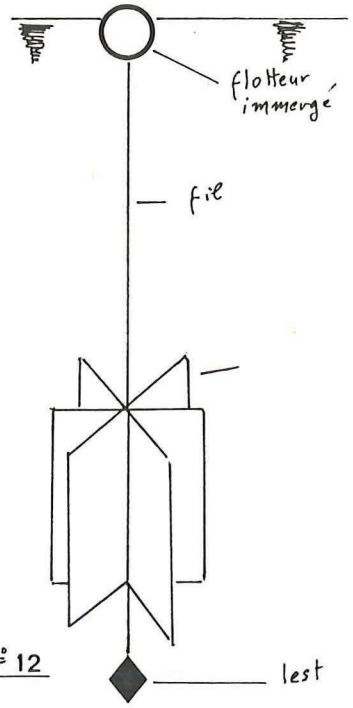


fig n° 12

Enfin, nous verrons dans la partie qui concerne les principes de l'érosion de la zone littorale que d'autres types de courants jouent un rôle de premier plan. Ce sont les courants de turbidité, liés également aux mouvements verticaux de la masse liquide pour ce qui est de la mise en suspension des particles sédimentaires fines, mais trouvant par la suite pour des raisons de physique pure leur énergie propre.

Il nous apparaît souhaitable à ce niveau de clarifier quelques notions, et mettre en évidence les liens certains qui existent entre toute une terminologie topographique désignant les différents secteurs d'une côte lacustre, et les modes hydrodynamiques caractéristiques liés à ces secteurs. (Figure no. 13)

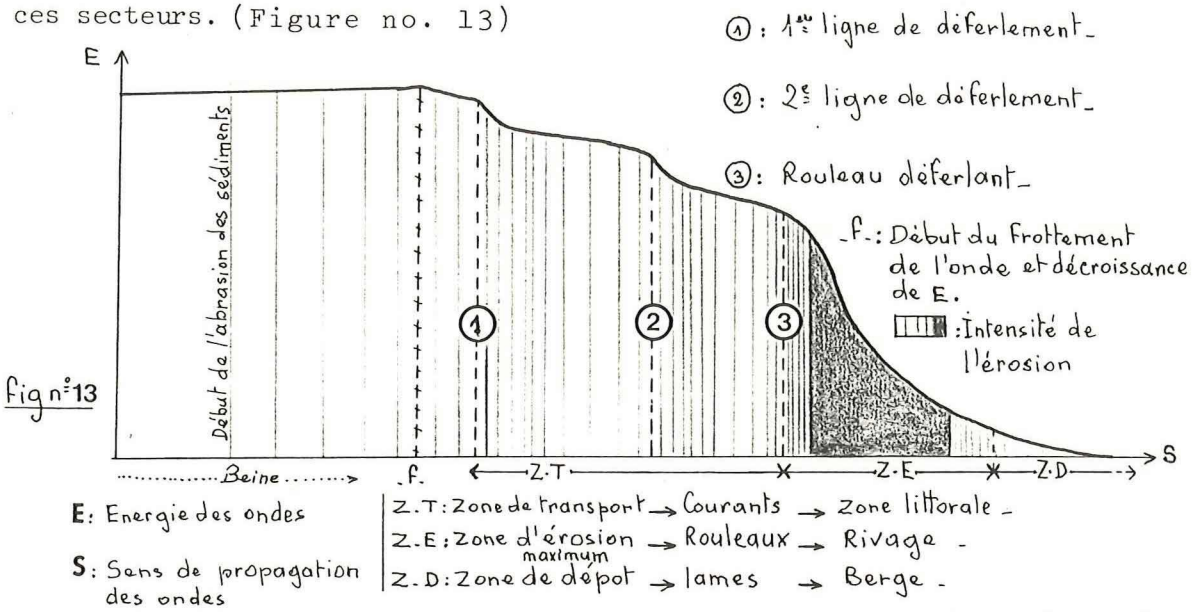


fig n°13

La zone littorale : Zone de transition peu profonde et toujours immergée couvre la beine jusqu'au mont. Au-delà débute la zone profonde. Vers la berge ce secteur s'arrête où commence le rivage, c'est-à-dire à la verticale de la dernière ligne de rouleaux. Selon la morphologie transversale de la côte une partie de cette beine peut échapper si elle est assez profonde à l'action érosive des vagues et courants. En l'occurrence, toute notre zone littorale est concernée par ces mouvements, où semblent dominer les transports de matériaux dus aux courants, plutôt que l'abrasion.

Le rivage ou la rive : se situe au contact terre-eau et concerne la zone alternativement couverte et découverte par les vagues. Sa partie amont sur la berge d'étend jusqu'à la limite atteinte par le déferlement des plus grosses lames. Vers l'aval sa limite se situe à la verticale du dernier rouleau. C'est la zone d'érosion maximum, liée à la zone de libération maximum d'énergie des vagues où domine nettement l'abrasion. C'est un écotone dans la terminologie écologique, situé à l'interface terre-eau, secteur sensible, spécifique, complexeet naturellement fragile présentant à la fois des caractères des milieux aquatique et terrestre.

La berge : constitue la partie émmergée de la côte. C'est un milieu terrestre susceptible momentanément d'être couvert par les eaux à la faveur d'inondations ou de différences de niveau des eaux du lac.

Pour clore cette partie, toutes ces considérations sur l'hydrodynanisme nous permettent d'envisager une figure de synthèse qui met en relation, l'énergie des lames, les zones où prédomine transport et abrasion en fonction de la zonation topographique et hydrodynamique définie ci-dessus. Cette figure est envisagée dans le cadre de la force des vents considérée dans l'exemple utilisé dans ce paragraphe. (Figure no. 13)

4.4. Facteurs chimiques et biologiques

Certains facteurs chimiques peuvent causer une érosion au niveau des roches et des sols. Le dioxyde de soufre (SO_2), polluant industriel que l'on trouve dans l'air, attaque les pierres des bâtiments et certains sols sensibles à l'acidification.

Dans notre cas, nous allons évaluer dans quelle mesure l'évolution de la composition chimique des eaux du lac peut avoir un action sur l'érosion de la rive.

Nous n'avons pas trouvé de données sur la chimie des eaux pour le secteur étudié, nous nous contenterons donc de données globales pour les eaux du lac obtenues auprès des laboratoires cantonaux.

De par son orientation priviligiée, par rapport aux vents dominants, le lac de Neuchâtel subit un brassage plus prononcé que les autres plans d'eau de Suisse. Ainsi la fertilisation des eaux n'est pas accompagnée d'une diminution de la concentration en oxygène. Celle-ci oscille autour de 10 mg/l (à 1 m du fond).

La concentration en phosphore des eaux du lac atteint actuellement 70 µg P total/l. Elle a augmenté de 230% entre 1962 et 1973. Ces dernières années, elle continue d'augmenter régulièrement. La charge en phosphore apportée par les principaux affluents est estimée à 167 t/an. Les stations d'épuration riveraines en déversent en plus 59 t/an. D'autres sources diffuses sont difficiles à estimer.

En ce qui concerne l'azote nitrique, on a mesuré une augmentation de 30% entre 1962 et 1973, liée aux fumures. On mesure des concentrations de 3 mg/l à 1 m du fond. Dans l'espace de 12 ans, le lac a évolué du stade oligotrophe au stade entrophe.

Ces résultats sont confirmés par des mesures biologiques de la composition de la faune benthique qui a évolué, depuis 1919 jusqu'à nos jours, vers une prédominance des espèces eutrophes. La persistance d'espèces oligotrophes montre que le lac pourrait redevenir oligotrophe si les apports en fertilisants diminuent (Lang et Cuvit, 1981).

L'entrophisation fait sentir son effet au niveau de la végétation aquatique. Les macrophytes des zones littorales prolifèrent (ex.: Potamo-

geton pectinatus), et cette prolifération s'accompagne d'un appauvrissement en espèces typiques des eaux oligotrophes.

Une modification se répercute aussi au niveau des algues périphytiques des zones littorales (1 à 2 m de profondeur). Les algues filamenteuses (Cladophora) tendent à abonder.

Au niveau du phytoplancton, le niveau trophique agit aussi par une prolifération d'algues microscopiques (un exemple bien connu: le sang des Bourguignons dans le lac de Morat). L'évolution de la flore lacustre est actuellement à l'étude et elle est un bon témoin de la qualité de l'eau.

L'enthrophisation se répercute aussi au niveau de la roselière par une fragilisation des tiges suite à une diminution des tissus de soution (sclérenchyme) (Klötzli, 1973). La conséquence de cet affaiblissement est une moindre résistance des roseaux aux facteurs mécaniques, d'où le recul de la roselière par l'attaque progressive, et la mise à nu par déchaussement du lacis de rhizomes.

Au niveau de la dune, les fertilisants du lac et la décomposition de matière organique entrainent une nitratophisation qui se manifeste au niveau de la flore, par l'apparition de tout un cortège de plantes nitrophiles, dominé notamment par l'ortie et le liseron.

Le dépérissement en fin d'année de la flore aquatique et l'accumulation de débris végétaux au niveau du rivage forme le fumier lacustre qui se dépose sur les plages, et autour des roselières lacustres. En conditions aérobies, on a une minéralisation de ce fumier, avec libération d'éléments azotés qui fertilisent l'eau. Le phénomène renforce l'enthrophisation déjà existante. Nous nous étions demandés si la décomposition de la matière organique, qui libère des acides humiques et fulviques, serait à même d'attaquer les sédiments carbonatés de la rive. Ce processus est cependant immédiatement bloqué, car ces acides sont neutralisés sous forme de complexes avec les ions calcium. Les facteurs chimiques des eaux du lac n'ont donc pas une action directe sur l'érosion, mais ils contribuent à la fragilisation de la végétation qui fixe les berges, ancre les dunes, en donnant une certaine tenue à la rive, face à l'érosion.

5. ANALYSE DES PROCESSUS D'EVOLUTION DE LA COTE

Le facteur historique est une donnée fondamentale. Les principes actuels qui ordonnent l'évolution de cette côte, sont issus, et ne s'expliqueraient pas sans tenir compte de ce boulversement complet de l'état initial du lac par la Correction. D'autre part, les caractéristiques physico-mécanique du milieu, le prédisposent à subir, plus que tout autre grand lac Suisse, les contraintes de facteurs exceptionnellement agressifs. Par opposition, on ne peut pas dire que les facteurs pourtant efficients que sont la pression humaine et l'état bio-chimique, sont de nature phénoménale. Somme toute le lac de Neuchâtel est l'un des moins pollué de Suisse, et l'autoroute N-1, ne traversera jamais la Grande-Cariçaie. Les principes du recul de la ligne de rivage, et l'évolution de la zone littorale dépendent donc essentiellement de la Correction, des données physiques, et des facteurs mécaniques du milieu.

La Baie d'Yvonand constitue un secteur particulier qui échappe aux modalités d'évolution des zones alentours. Ce que nous mettrons en relief dans le chapitre consacré à la zone littorale.

5.1. Les principes du recul de la ligne de rivage

5.1.1. Les principes mécano-physiques généraux.

Replaçons nous dans la situation climatique donnée en exemple précédemment, (vents de bise assez constants de force 4 à 5). A quelques mètres de la berge, déferle en rouleau une bonne vague qui se brise avec force, puis inonde la zone émergée de la rive avec ses roseaux. On constate qu'elle possède encore assez d'énergie pour donner l'assaut à la base de la dune. Les forces qui se dégagent de ce mouvement mille fois répété sont évidentes pour tous. Voyons comment l'énergie déployée par cette lame déferlante est transmise pour lui

permettre d'acquérir da fonction érosive. Le rouleau amène selon une trajectoire au rivage une masse d'eau considérable, animée de ce mouvement enroulé caractéristique. Les pressions et la dynamique interne de la masse liquide en action, suffisent à arracher et mettre en mouvement les particules solides qui composent le substrat du rivage. A leur tour ces particules douées d'une certaine énergie cinétique sont capables d'abraser les différents niveaux de matériaux de la rive. Cette fonction érosive de la lame déferlante ne peut avoir lieu que lorsqu'elle est nantie de suffisament d'énergie pour dépasser le seuil d'érosion de la zone considérée, qui correspond au degré de cohésion et de résistance des éléments constituants du rivage à l'action des vagues.

Les sédiments mis en mouvement dans le rouleau vont réagir différemment selon leur masse et leur forme. Les coquilles de mollusque par exemple, légères et offrant une surface importante de prise aux mouvements hydrodynamiques seront sans peine transportées bien à l'intérieur du rivage. Les sables moyens très denses d'origine cristalline (feldspaths, quartz) sur lesquels l'eau a peu de prises, seront tout de même mis en mouvement dans le rouleau et rejetés sur la rive. C'est leur retour qui n'est plus assuré énergétiquement par la lame. Ainsi ils sont déposés,remaniés certes à chaque vague, mais il en arrive plus sur la rive qu'il n'en repart. Ces accumulations de sables moyens et denses ne peuvent s'opérer que par gros temps car elles réclament de la part des vagues énormément d'énergie. Ainsi se forment la dune littorale et les bancs de sable émergés. Les particules plus fines, micas, sédiments carbonatés ou minéraux argileux facilement mis en suspension sont sans cesse repris par les vagues qui lessivent le rivage. Une faible proportion se laisse piéger dans les sables cristallins de la dune, l'essentiel repart vers le large au grès des courants.

C'est donc un tri remarquable qui s'opère au niveau du rivage. C'est aussi à ce niveau, suite au brassage considérable de

matériaux, que se décident et s'organisent les profils transversaux de la zone côtière. (Voir figure no. 14)

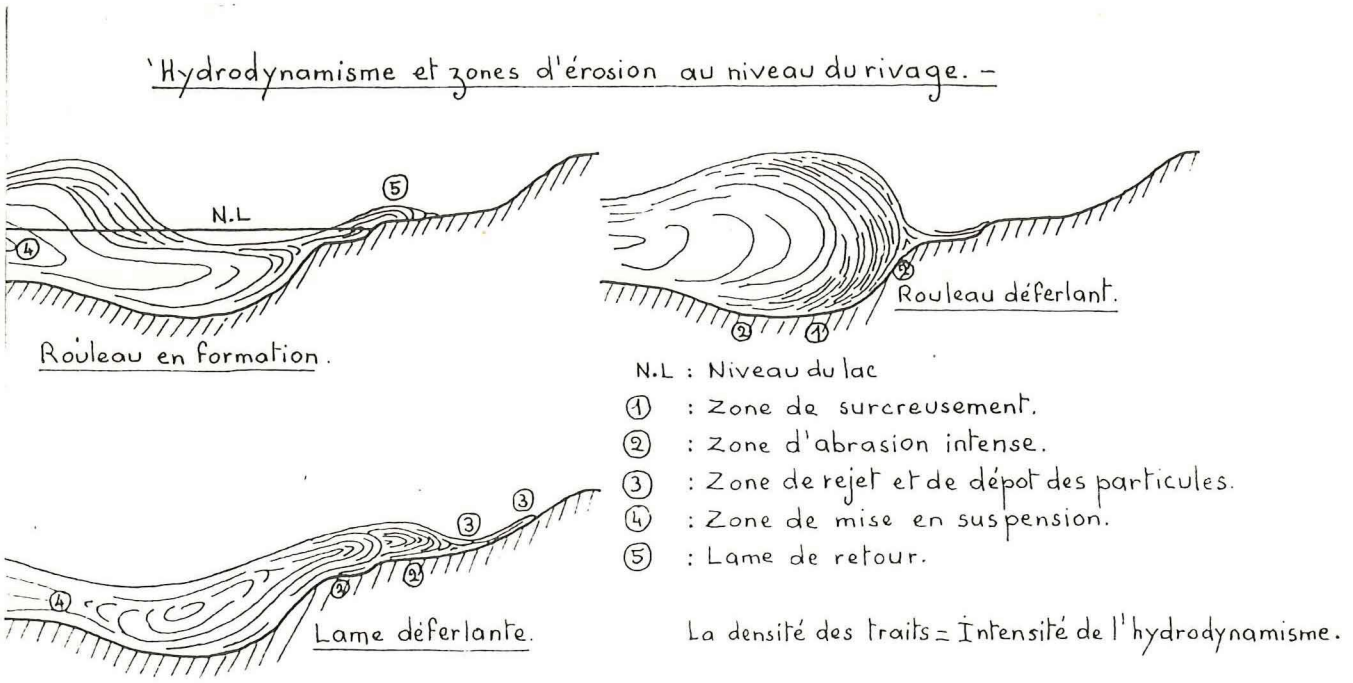


Fig n°: 14

Le recul du rivage est régenté par trois principes, l'abrasion. le dépôt et la mise en suspension. mais pour s'exercer pleinement comme c'est le cas dans notre secteur, il faut que la rive présente une prédisposition naturelle à l'érosion. Cette dernière est fonction de trois faits primordiaux.

La profondeur des eaux au niveau du rivage doit être importante. C'est elle qui permet à la houle de ne pas s'épuiser par frottement sur les fonds littoraux, et d'arriver avec toute sa vigueur à quelques mètres du rivage avant que ne déferle à très courte distance de la berge le dernier rouleau. D'Yverdon au port d'Yvonand et dans la région de Cheyres, il suffit de faire cinq pas vers le large pour se

retrouver avec de l'eau jusqu'au ventre. Paradoxalement à 50 m du bord il peut ne pas y avoir davantage de fond. Ce rivage qui descend raide jusqu'à 1,50 m en quelques mètres et dont la profondeur se maintient sensiblement par la suite sur des dizaines de mètres est caractéristique d'un déséquilibre. (Voir profils nos. 1 à 7 et 19, 20 en annexe)
Ce déséquilibre est à mettre aussitôt en relation avec cette course effrénée que le lac mine avec ses rives dans le but de recouvrir l'état d'équilibre de ses profils antérieurs.

Notons au passage que tout près du bord, à la verticale de la dernière ligne de déferlement, où commence en fait le rivage, il y a un surcreusement lié aux effets du dernier rouleau; déploiement maximum d'énergie, avec comme conséquence abrasion maximum et très faible redéposition. Ce creux parallèle au rivage, nous l'avons représenté sur la figure no.

Un autre fait particulier de ce secteur est fourni par l'angle d'incidence que font les vagues et la rive. En plus des effets frontaux décrits plus haut, les 30° d'incidence dont nous avons déjà parlé, rendent le processus érosif encore plus vicieux. car ils déterminent une dynamique supplémentaire latérale. C'est dire qu'à l'abrasion, au dépôt et à la mise en suspension, nous pouvons rajouter le transport de particules parallèlement au rivage selon un processus désigné sous le terme de "jet de rive". Le déferlement des lames qui forment un angle oblique avec la rive, arrache un peu de sable du fond, le remonte vers la limite supérieure du flot dans la direction des vagues déferlantes. Ce sable peut être repris

dynamiquement dans le retour de lame, de nouveau remonté à la limite des flots et sinsi de suite. A chaque allée et venue les particules auront progressé latéralement de quelques centimètres. Ainsi s'opère un transport dans le même sens que la houle. Phénomène que nous avons maintes fois vérifié sur le terrain. (Figure 15)

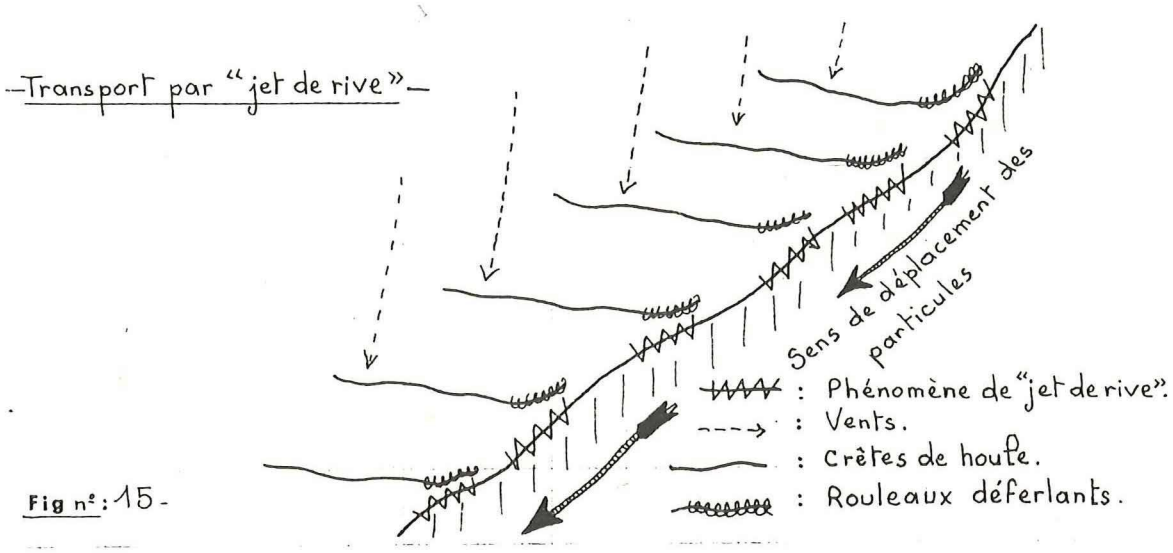


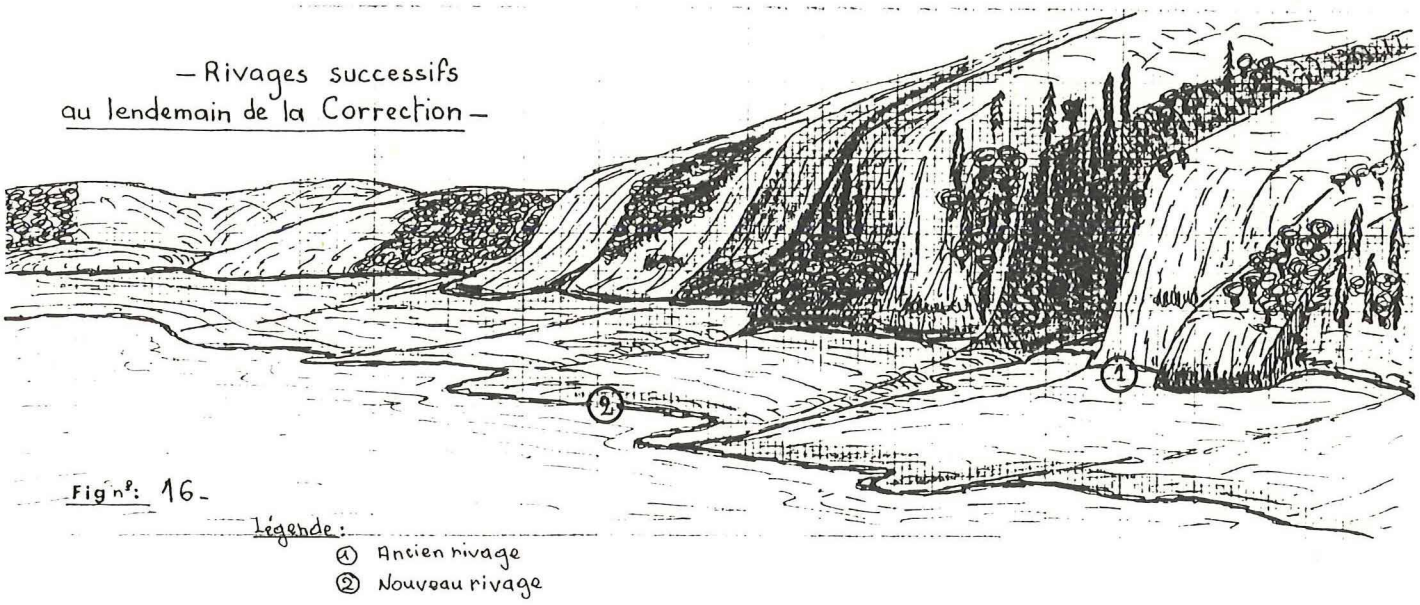
Fig n°: 15 -

Enfin il faut dire deux mots du substrat que les vagues paraissent si enclines à digérer. Nous le savons, il s'agit de l'ancien sédiment lacustre déposé pendant les quelques millénaires qui nous séparent de la fin du Wurm. Très carbonaté, cette craie lacustre contient en outre des sables siliceux détritiques provenant de l'altération de la molasse Le tout forme néanmoins un composant extrêmement meuble offrant une très faible résistance à l'abrasion, ce qui explique la célérité du mouvement de recul du rivage. Sur la rive droite, mais plus au nord vers Forel, la molasse affleure directement au contact de l'eau. Dans ce secteur à l'échelle humaine, on peut dire que le rivage est stabilisé.

5.1.2. Histoire des débuts de l'érosion du nouveau rivage corrigé

Avant de donner une explication des différents types de rivages longitudinaux et transversaux rencontrés,

nous allons remonter dans le temps et essayer d'imaginer les prémices des processus d'érosion au lendemain de la Correction. C'est une comparaison détaillée de la carte Siegfried et de la carte actuelle, qui nous permet d'émettre les hypothèses suivantes. Avant la Correction la ligne de rivage de ce secteur de la rive droite suit en gros le pied de la falaise molassique. Nous pouvons très approximativement en avoir une idée à partir de la carte actuelle grace aux courbes de niveau. Lorsque de 3 m le niveau s'abaisse, il reste encore une filiation entre la ligne de rivage établie au milieu de la beine nouvellement exondée, et l'ancienne du pied de la falaise. Cette filiation se marque par un parallèlisme très relatif, aujourd'hui complètement disparu après 90 années d'intense remaniement. (figure no. 16) et de rectification.



A l'analyse, les premières cartes Siegfried du début du siècle démontrent dans la mesure où l'on peut s'y fier, une évolution très nette des profils en long de la rive, comme si le travail primordial de l'érosion avait été d'abord de rectifier les profils longitudinaux du nouveau rivage. (figure no. 17)

-Rectification longitudinale de la ligne de rivage, au lendemain de la Correction - (Année 1900)
(d'après carte Siegfried)

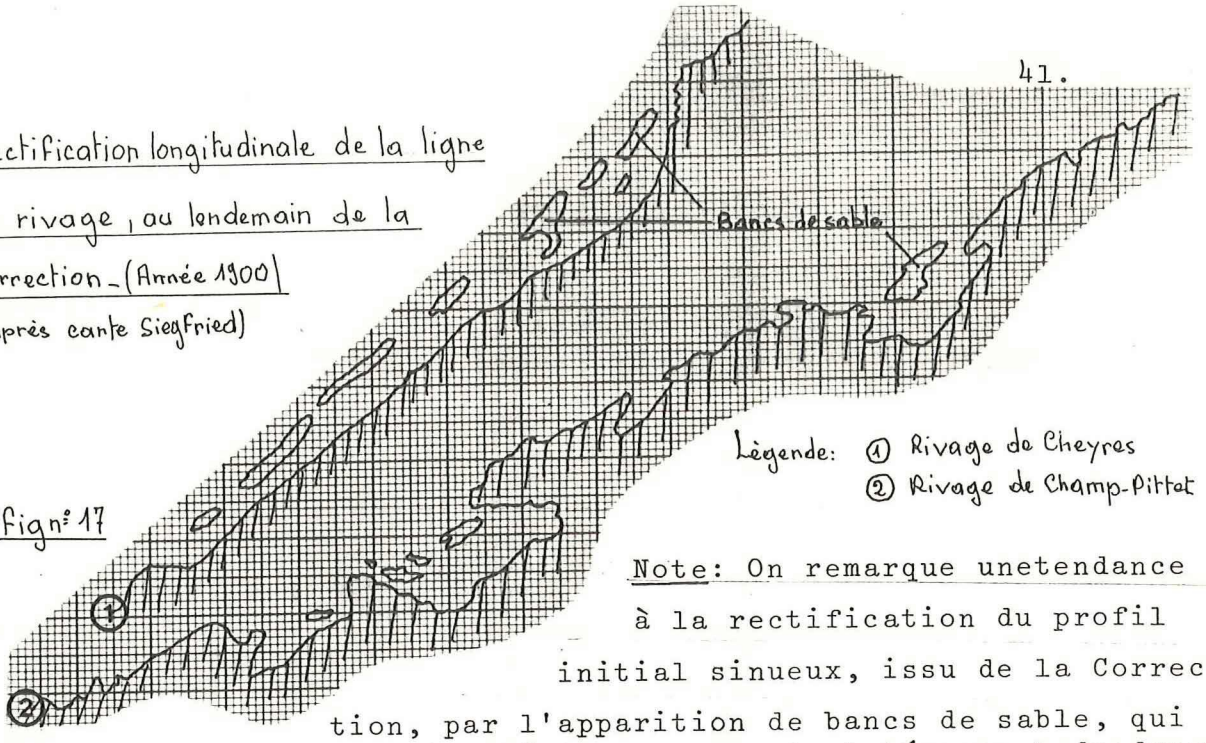
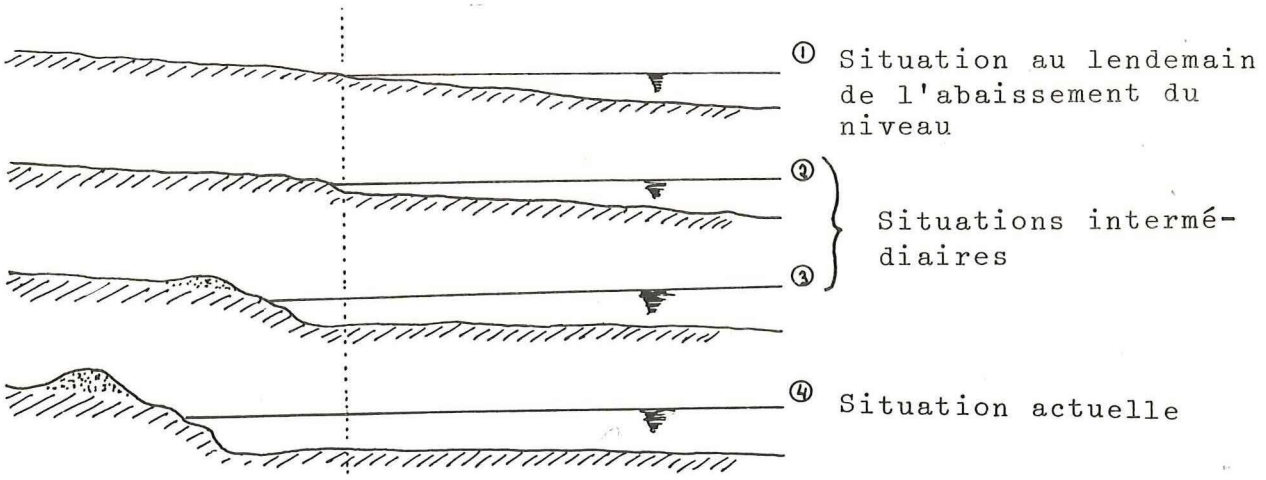


fig n° 17

Note: On remarque unetendance à la rectification du profil initial sinueux, issu de la Correction, par l'apparition de bancs de sable, qui mettent en relief la primauté des mouvements latéraux; hydrodynamiques ou de transport de matériel.

Ceci du reste pourrait s'expliquer par la primauté des mouvements hydrodynamiques latéraux sur les verticaux, car nous pouvons bien penser qu'au lendemain de la Correction, le profil transversal de la beine et du rivage n'avaient aucune caractéristique d'un profil d'érosion. Bien au contraire cette beine devait offrir un profil très équilibré, au pendage très faible. C'est pourquoi nous avons parlé dans le chapitre de l'évaluation quantitative et dynamique d'un certain laps de temps qui permette une mise en place des facteurs concourant à l'érosion. Le principal étant l'aménagement d'un profil de beine permettant à la houle de conserver toute son énergie jusqu'à proximité du rivage. Mais pour ce faire des milliers de m^3 de sédiments auront dû être d'abord dégagés. (figure no. 18) Mise en place d'un rivage d'érosion



5.1.3. Evolution longitudinale des rivages

L'évolution longitudinale du profil de la rive dans la région de Champ-Pittet est issue de la situation particulière engendrée par l'angle d'incidence de la houle par rapport au rivage. Cette évolution est directionnelle, conformément au sens général des lames. Nous avons observé tout au long de cette rive assez homogène, l'impact d'une érosion différentielle selon que l'on se trouve sur un mini cap ou dans une crique. (voir figure no. 2) Les secteurs d'érosion maximum correspondent à l'amont des caps et l'aval des criques (par rapport au sens de la houle). Que les caps soient touchés, cela ne doit pas surprendre dans la mesure où ils constituent de par leur position avancée une zone particulièrement exposée. Pour les criques cela paraît plus paradoxal, mais à y regarder de près, on s'aperçoit qu'à l'aval précisément, elles offrent un court secteur de leurs rives quasiment perpendiculaire aux vagues. Sur le terrain nous avons vu les vagues s'engoufrer à l'aval de ces mini-baies et pénétrer profondément sur ces berges basses caractéristiques des zones les plus touchées. L'orientation de la vague et le mouvement demi-circulaire de l'eau qui lèche le pied de la lune, dans leur action érosive tendent néanmoins à perpétuer indéfiniment ce profil longitudinal des mini-caps et des criques. Le profil évolue à la fois dans le sens de la houle, et vers l'intérieur. (figure no. 19)

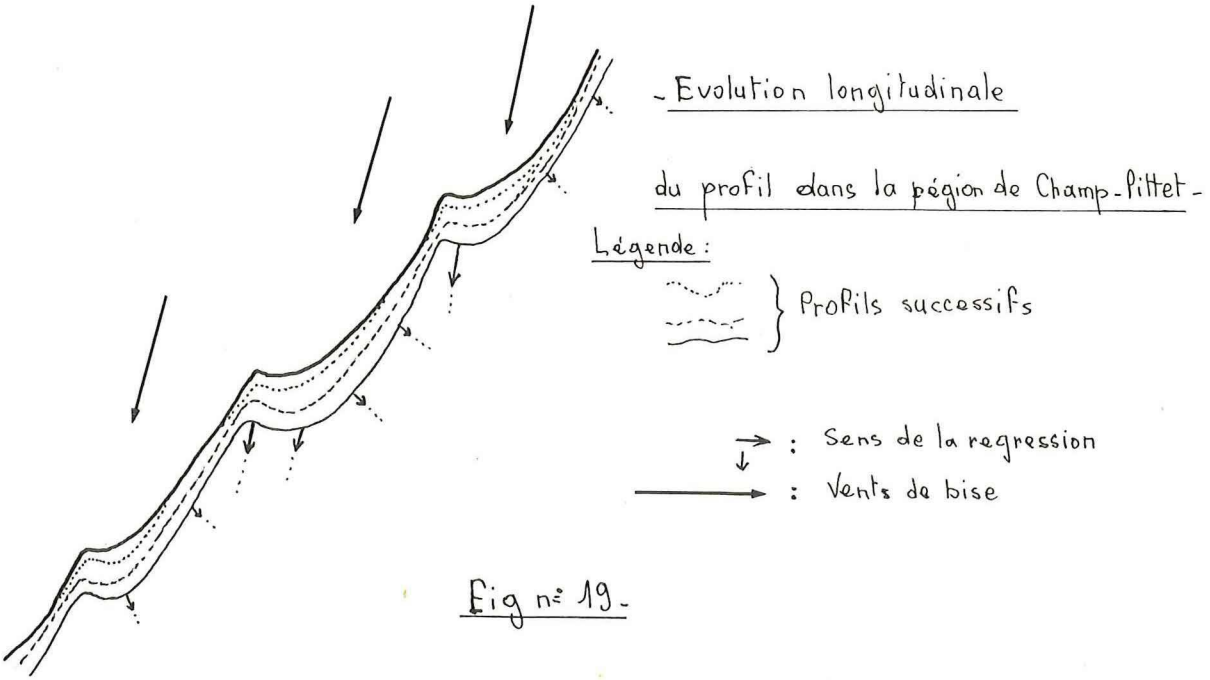


Fig n° 19.

Dans la région de Cheyres, l'évolution longitudinale dépend aussi de l'angle formé avec le rivage par les vagues de bise. L'érosion montre également un sens préfèrentiel mais ceci est moins marqué physionomiquement sur cette portion de côte. N'oublions pas que les vagues de vent d'ouest disposent d'une dizaine de kilomètres de fetch pour se former; ceci contrebalançant cela du point de vue de l'érosion. La succession de caps et de criques n'a pas la belle régularité précédente. Celle-ci semblent moins déterminée par l'hydrodynamisme que par les faits ponctuels, tel que l'ancrage par les racines d'un arbuste, d'un petit promontoire offrant ainsi une meilleure tenue aux agents mécaniques. Néanmoins, les mécanismes qui régentent l'évolution de ce secteur montent de nombreuses similitudes avec la région précédente, compte tenu de la composante ouest, et de ces effets.(Fig. 20)

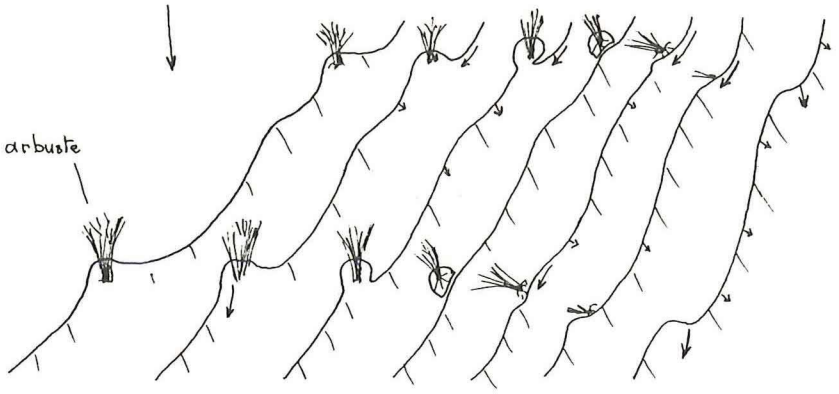


fig n° 20

Légende : : Sens de l'évolution du rivage

: Vents de bise

5.1.4. Le recul transversal des rives

Les manifestations du recul transversal d'un rivage sont nombreuses, mais il y en a une qui domine et qui ne peut pas tromper c'est son profil. Si le substrat qui compose la berge est meuble, et si le profil immergé du rivage est abrupt, il y a déséquilibre, et l'on se trouve en présence d'un profil typique d'érosion. C'est ce que l'on observe sur nos séries de profils (voir en annexes les pro-

fils ainsi que la carte de localisation des sites d'experimentation). Tous ceux qui concernent les secteurs de Champ-Pittet dans la zone d'alternance cap - criques (profils de 1 à 6) et Cheyres (19 et 20) sont de ce type. La pente est telle que même par temps calme, les sédiments fins et meubles ont tendance à fluer millimètres après millimètres vers le plancher du rivage qui se situe en moyenne à 1,20 ou 1,50 m de profondeur selon les niveaux du lac. Il suffit d'enfoncer ses pieds dans ce sédiment instable pour observer ce mouvement de fluage. Ceci assombrit d'un jour nouveau les conditions d'altération de ces rivages d'érosion au profil caractéristique: même par temps calme, autrement dit à longueur d'année, l'érosion n'offre une seconde de répit à ce type de rives. Il aurait répit s'il pouvait avoir accumulation et comblement du creux de la dernière ligne de déferlement, mais comme nous le savons les vagues qui se chargent de la mise en suspension, et les courants du transport, déblayent régulièrement à chaque coup de vent ces tentatives de rééquilibrage.

D'autres manifestations du recul transversal sont en prise directe avec les conditions physiques locales de la rive et à l'échelle du mètre bien souvent. A Cheyres par exemple la micro-falaise peut être complètement sapée à sa base, prête à s'effondrer alors qu'à dix mètres de là, la même falaise protégée momentanément par un arbuste ne montrera pas ce sapement. Plus loin encore le profil d'érosion sera encore différent parce que précisément tout un monceau de la berge ce sera éboulé récemment.

Du côté de Champ-Pittet la rive est toute échancrée. A l'échelle du mètre, ce n'est pas du tout un recul linéaire. Telle touffe de roseaux aux rhizomes vigoureux maintient un un mini-promontoire alors que de part et d'autre deux échancrures d'un mètre entaillent la berge. Il suffit de ces disparités pour que l'érosion s'en saisisse, l'exploite, et en tire le meilleur parti, souvent en accentuant la découpe

pour allonger son champ d'action.

Dans le même secteur, les berges basses qui ont à subir le déferlement à leur surface des vagues au moindre coup de vent, sont dévorées par l'érosion. Lessivage superficiel de la berge avec mise à nue des rhizomes. C'est à leur niveau de plus, que l'on trouve les rouleaux de macrophytes (photos nos 19, 21) courbant les derniers roseaux valides, et les gros déchets qui labourent cette pauvre surface.

Enfin le rivage immergé tout près de la berge peut présenter une succession de marches, constituées par les niveaux de rhizomes. Sous l'effet de l'hydrodynamisme ces marches sont sapées par dessous et leur terminaison est toute éfrangée par les rhizomes mis à nu et mourant progressivement.

Nous pourrions multiplier les explications ponctuelles des morsures de l'érosion en descendant encore d'un niveau dimentionnel. L'important est de retenir que transversalement à partir de l'effet unique des vagues, l'érosion de la ligne de rivage revêt mille facettes, et que le recul n'est que la somme conjuguée de ce grignotage, et c'est bien là le problème, car comment faire face à cette multiplicité d'éléments.

TRANSECTS SEDMENTOLOGIQUES DANS LA BEINE DE CHAMP-PITTET

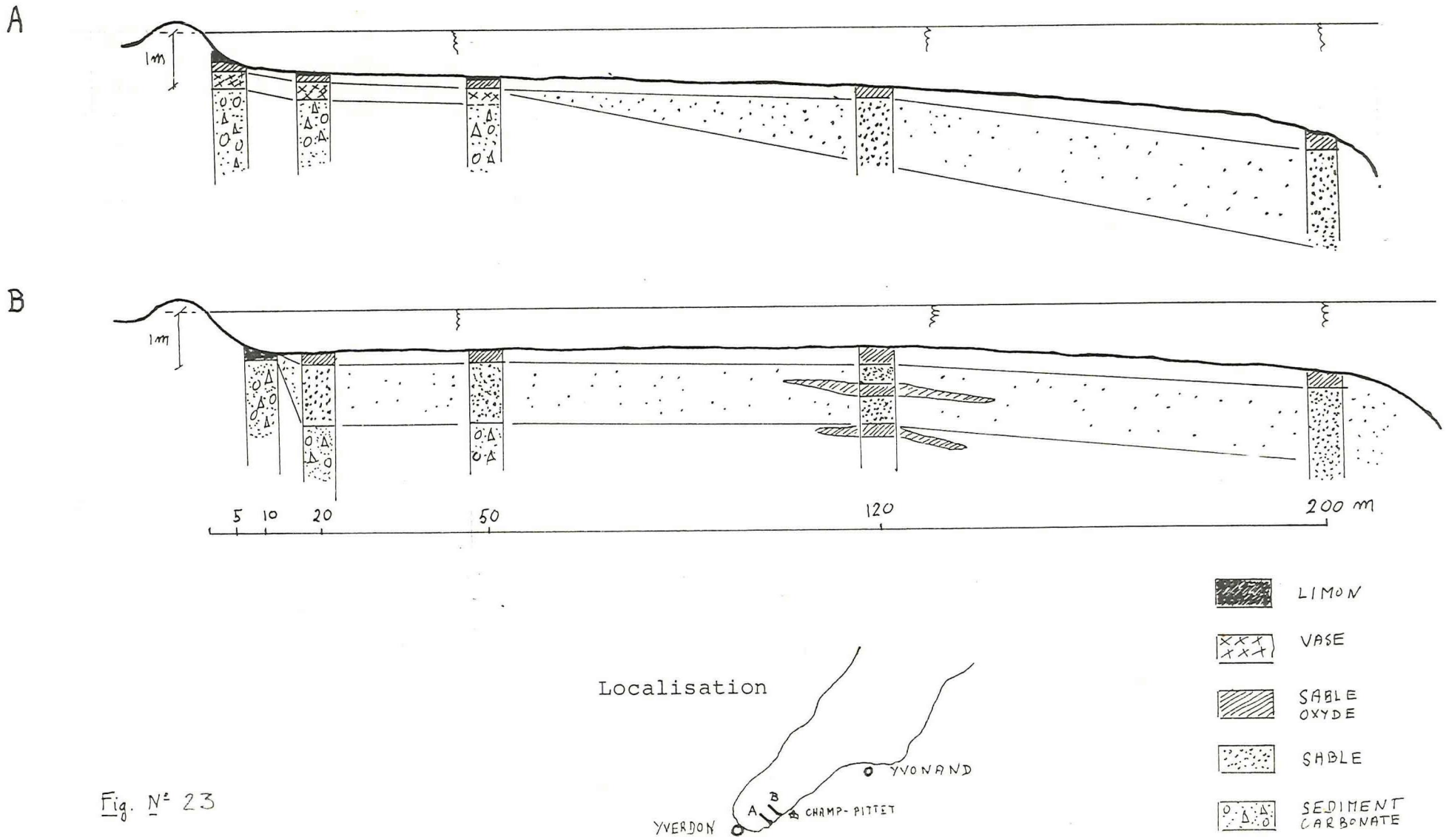


Fig. N° 23

5.2. Principes d'évolution de la zone littorale

5.2.1. Situation zonale, hydrodynamique et sédimentologique générale

Après avoir décrit les phénomènes d'érosion au niveau du rivage en fonction de l'hydrodynamisme, nous allons maintenant aborder le dynamisme des processus qui se situent sous l'eau, au niveau de la zone littorale, où le matériel arraché à la rive subit maintes transformations.

D'après le témoignage de riverains, il arrive que par tempête toute la zone littorale devienne trouble, en raison de la remise en suspension d'une fraction des sédiments de la beine. Par temps plus calme, l'action des vagues réagit plus qu'au niveau de la zone la plus proche de la rive.

Ces observations nous conduisent à subdiviser la beine en deux zones :

- La beine d'érosion proche du rivage, affectée au moindre coup de vent par les vagues et les courants.

- La beine d'alluvions, qui s'étend jusqu'au talus, soumise seulement par très gros temps aux mouvements hydrodynamiques. (figure no.)

- Schéma d'une côte d'érosion

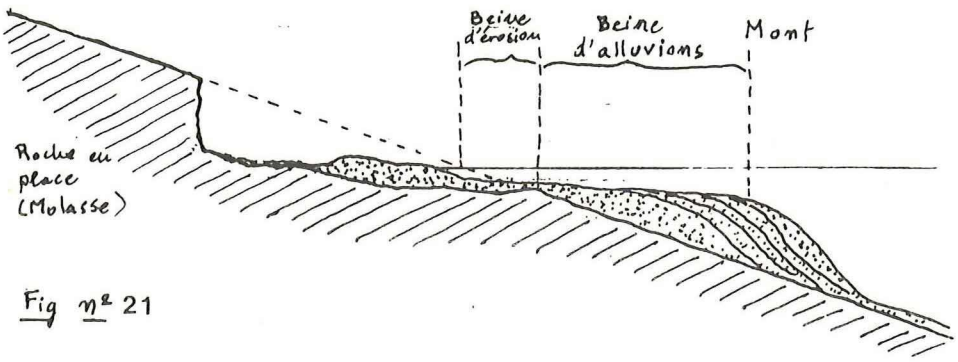


Fig nº 21

La beine d'érosion est essentiellement recreusée dans l'ancien sédiment lacustre carbonaté (Ca CO_3) emprisonant des minéraux détritiques souvent siliceux provenant de l'altération de la molasse ou de la moraine. L'hydrodynamisme vertical engendré par les vagues remanie ce sédiment dont une fraction reprise par les mouvements latéraux sera susceptible de migrer. Sur la beine d'alluvions, ces éléments vont se déposer en couches, selon un gradient granulométrique vertical et un gradient horizontal, en fonction de l'hydrodynamisme des vagues et des courants. Les courants de vagues littéraux (long shore currents) sont à l'origine de la migration de tonnes de sable le long de la côte vers l'amont du lac, qui iront engraisser les beines et ces plages des zones calmes, des baies d'Yverdon et d'Yvonand. Le banc de sable qui a formé les étangs de Champ-Pittet, constitue une des matérialisation de ces importants transports latéraux. (figure no. 22)

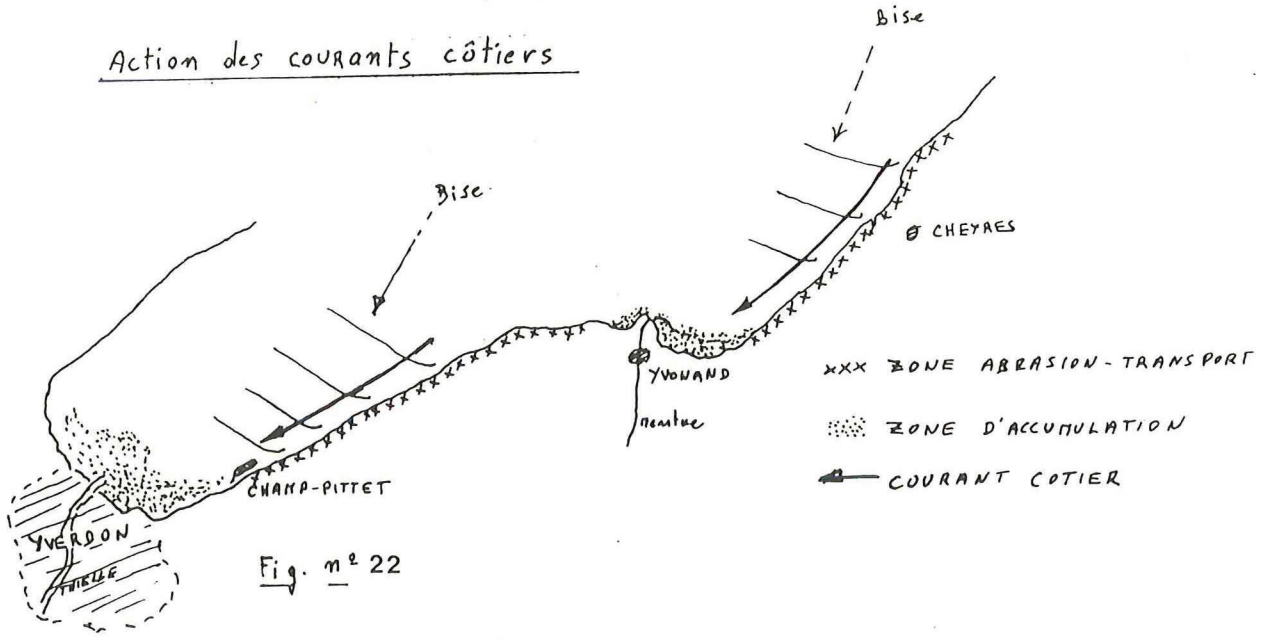


Fig. nº 22

L'examen comparatif de cartes bathymétriques anciennes et récents des régions d'Yverdon et Yvonand, fournit des indications intéressantes sur les modifications de profil des beines depuis la fin du siècle dernier. Faire la part à ce propos entre ce qui est transporté longitudinalement par les courants, et l'apport alluvionnaire de la Mentue et de la Thielle, semble être un exercice compliqué. La sédimentation de ces zones calmes tient en fait de ces deux facteurs complémentaux. Dans la nuit du 15 au 16 août 1982 la Mentue est sortie brusquement de son lit. Le lendemain, juste à l'ouest de son delta un banc de sable apporté par la crue était bien visible. Peu de temps après, à la faveur d'un coup de bise le banc avait migré vers la plage qui se trouve elle aussi à l'ouest, à peine décelable des sédiments sablonneux préexistants.

Nous avons constaté que les éléments fins qui constituent pourtant l'essentiel du substrat des berges ne se retrouvent pas au niveau de la beine d'alluvions, ni même sur les plages qui montrent une tendance à l'engraissement. Il est très probable que ces derniers, mis en suspension par période agitée, passent le talus et descendent vers les zones profondes en raison des courants de turbidité dont ils sont animés. Cette eau chargée de particules très fines, acquiert une densité supérieure aux masses d'eau environnantes et tend à descendre sur le revers du talus par simple gravité. D'après Sollberger, en d'autres endroits du lac, on constate une diminution de la granulométrie avec la profondeur, ce que nous attestons aussi dans notre secteur.

Pour mettre en évidence les effets des facteurs hydrodynamiques au niveau de la beine, nous avons procécé à des transects sédimentologiques dans les trois zones étudiées, Champ-Pittet, Yvonand et Cheyres. La technique la plus fréquemment utilisée a été le carottage effectué à la main depuis la beine peu profonde, ou par un plongeur à quelque distance de la rive. Ces carottages se révèlent bien adapté aux zones de sédiments meu-

bles. (photo no. 24 et 26). Le bennage, autre technique a permis de prélever des échantillons en certaines zones pierreuses profondes. La granulamétrie a été déterminée par le moyen de séries de tamis. (photos nos. 27 et 28).

5.2.2. La beine de Champ-Pittet

Dans la région de Champ-Pittet deux transects parallèles ont été effectués au niveau de la beine et jusqu'au talus. (Figure no. 23) Une des données importantes tirée de ceux-ci, concerne d'après la nature de sédiments et leur organisation, une limite que l'on peut fixer entre 20 et 50 m de la rive, qui correspond au passage de la beine d'érosion à la beine d'alluvions. Dans la beine d'érosion, l'ancien sédiment carbonaté peut se trouver directement en contact avec des limons et des vases riches en matière organique sans passage par un niveau intermédiaire de sables. (voir premiers carottages des transects A et B) C'est dire que les conditions hydrodynamiques n'autorisent aucun dépôt et que l'abrasion règne en maître. Ces conditions ne sont pas sans rappeler celles qui s'exercent directement sur le rivage. Nous pouvons considérer que c'est depuis cette beine d'érosion que se profile et s'organise le recul de la rive par le maintient permanent d'une zone profonde permettant à la houle de conserver toute son énergie jusqu'au rivage. Quant aux vases et limons que l'on rencontre flottant sans la moindre tenue directement sur l'ancien sédiment carbonaté, leur présence ne s'explique que par temps calme, les moindres mouvements de l'eau les remettant en suspension avant qu'ils ne se redéposent de façon aléatoire au gré des courants. A la différence, la beine d'alluvions est caractérisée par l'apparition de dépôts de sable s'épaississant jusqu'au mont, ou leur épaisseur peut être considérable (plusieurs mètres). C'est ce que montre le prélèvement effectué à 120 m (transect B) où l'accumulation par couche apparaît nettement. La pente moyenne de la beine

est de l'ordre de 1,5% ce qui est faible.

5.2.3. Le cas particulier de la Baie d'Yvonand

En baie d'Yvonand on a obtenu un très long profil de 1200 m (figure 24) avec la pente la plus faible 0,5%. Des accumulations importantes de sable se rencontrent jusqu'à la rive qui est elle-même sableuse. Il n'y a donc ici qu'une seule beine,une beine d'alluvions ce qui du point de vue de l'hydrodynamisme oppose fondamentalement cette région à celles de Cheyres et Champ-Pittet. Sans beine d'érosion les processus de recul du rivage sont incapables de s'amorcer, il semblerait même à l'analyse de l'évolution de la ligne de rivage que le secteur s'engraisse faiblement. (voir les profils transversaux de rivage No. 11 à 18 en annexe). Vers le large la granulométrie subit des modifications. Jusqu'à 250 m, la fraction de 250μ domine. (photo no. 27 et 28. A 400 m nous commençons à trouver quelques galets et des éléments très fins. A partir de 1000m le sol semble pavé de cailloux molassiques dont l'origine reste une énigme. Il ne semble pas qu'il s'agisse de moraine dans la mesure où aucun de ces galets n'est cristallin. S'agit-il déjà de l'assise molassique de la beine, pavée d'éléments détachés ? L'absence de sable à cette distance de la rive est-elle à mettre en rapport avec des mouvements hydrodynamiques, qui fait exceptionnel dans notre région, sont parallèles à la côte, et qui pousseraient ceux-ci vers le fond de la baie.

5.2.4. La beine de Cheyres

Dans la région de Cheyres, nous n'avons pas procédé à un transect complet de la zone littorale. Cette dernière montre un facies de beine d'érosion assez semblable à celle de Champ-Pittet. (Figure 25 transect B) L'activité de la houle provoque le lessivage des constituants carbonatés du sédiment de la micro-falaise, et leur dépôt au large. Les

TRANSECT SEDIMENTOLOGIQUE EN BAIE D'YVONAND

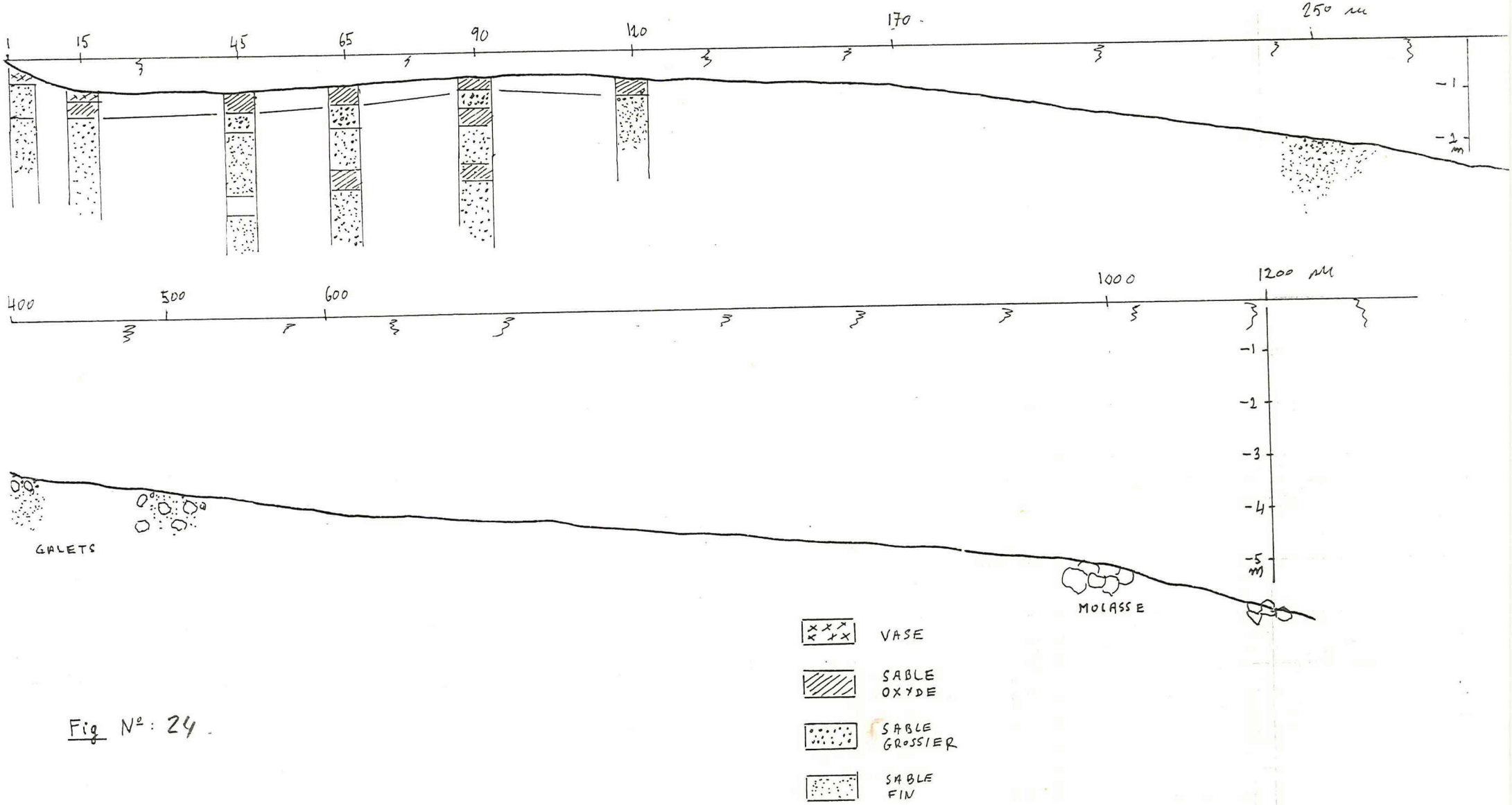


Fig N°: 24.

TRANSECT SEDIMENTOLOGIQUE A CHEYRES

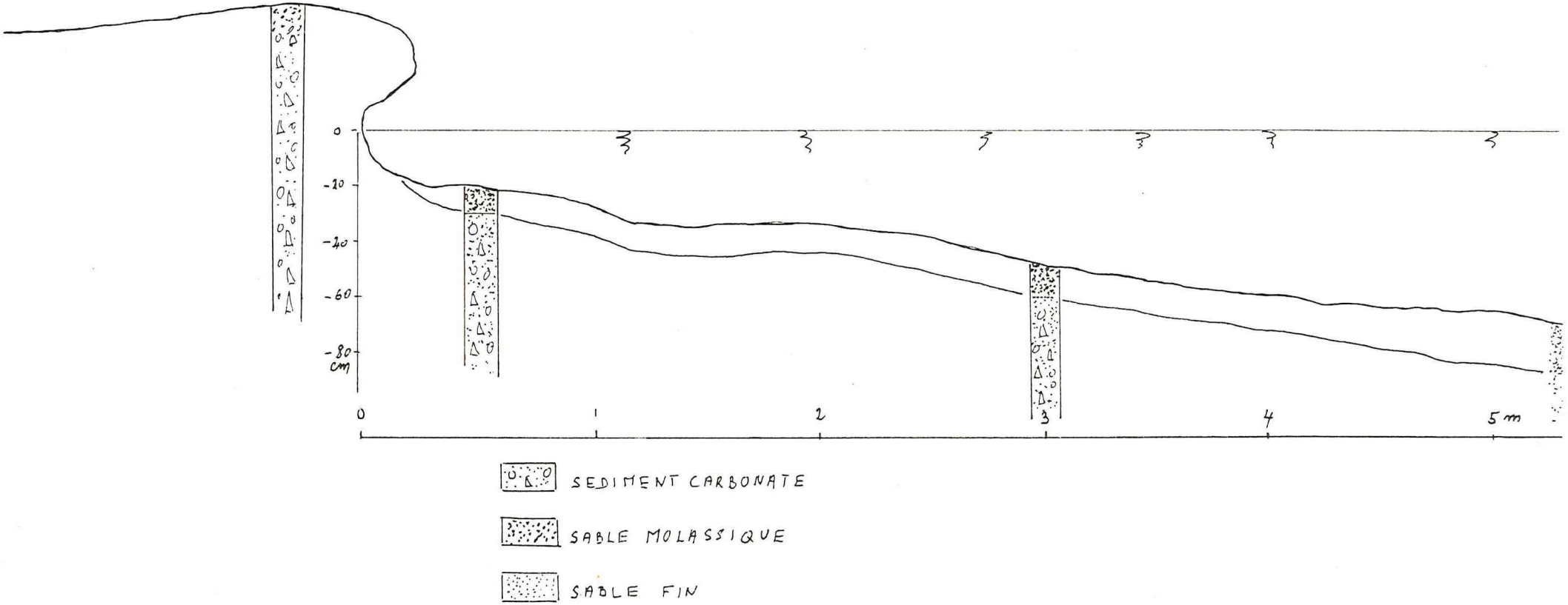


Fig Nº: 25

minéraux détritiques restants, principalement des quartz mais aussi des feldspaths et micas de granulométrie variables se dispersent et constituent un faciès superficiel vaseux de faible cohésion. Lorsque le gradient granulométrique augmente le sable superficiel grassier est capable de rester en équilibre avec le milieu en constituant une couche superficielle qui semble s'épaissir vers le large. A l'analyse, le pourcentage d'éléments moyens dans le sédiment de falaise permet d'affirmer que la constitution de ce dépôt résultait déjà à l'époque d'apport latéraux dûs aux courants. Voir tableau ci-dessous.

Echantillon	% $CaCO_3$	Granulométrie
micro-falaise	46,6	moyenne à fine
sables superficiels	2,0	élevée
vase superficielle	23,3	moyenne

Une des idées clef de tout ce paragraphe concerne la limite, beine d'accumulation, beine d'érosion que l'on arrive dans l'espace à déterminer approximativement à partir de l'analyse des sédiments. Les processus qui gènèrent le recul du rivage prennent leur source à ce niveau. Maintenant si l'on tient à prendre le problème de la défense du rivage à sa base, c'est ici que l'on sera conduit à intervenir.

6. PROPOSITIONS D'INTERVENTION

Bien sûr il faut intervenir, sinon à quoi bon envisager une gestion écologique de la Grande-Cariçaie, à quoi bon protéger la zone des atteintes extérieures quant le mal vient de l'interieur. Ce mal qui emporte année après année des hectares d'espaces naturels de valeur inestimable non seulement pour les oiseaux et la flore, mais surtout pour tous les citadins de ce pays qui sur ces rives viendront tôt ou tard ressourser leurs équilibres psychiques et moraux, en se mettant momentanément au vert. Alors que faire? D'abord sur la nature de l'intervention il ne servirait à rien d'envisager à court terme un replatrage des rives par nous ne savons quels moyens. C'est dire que nous ne croyons pas à une action ponctuelle au gré des coups de bise, ce n'est ni un port à colmater, ni un chemin à réempierrer. Cette douzaine de kilomètre de rives uniques, méritent, en ce qui nous concernent nous ne faisons qu'éclairer et suggérer, que des gens compétents, écologistes et ingénieurs envisagent sérieusement des moyens de conservation. Il reste le problème principal à glissement-politique-aisé, qui est de connaître et d'estimer la valeur d'une pareille étendue de marais. Au prix de l'hectare de prairie à marisque la région a toute les chances de disparaître sous les flots. Il nous paraît plus actuel et plus opportun d'évaluer la valeur récréative de ces berges pour les Fribourgeois et les Bernois qui manquent de lac (celui-ci est le grand lac le plus proche de chez-eux) ou la valeur de détente par ces temps de stress. La valeur naturelle de ce patrimoine n'est plus à faire, c'est en son nom que l'autoroute N-1 a changé d'idée.

Voici ce que nous suggérons.

6.1. Au niveau de la zone littorale

Ne pas s'attaquer aux effets au coup par coup, ce serait illusoire devant l'ampleur du processus. Ne pas s'attaquer

non plus aux berges quant le mal vient du grand large. Ce qui revient à prévoir un plan d'ensemble dans l'esprit de celui qui a prévalu pour le sauvetage de la rive du côté des lotissements de VD 8. Ce qui revient aussi à s'attaquer aux causes, c'est-à-dire aux vents principalement et à leurs effets secondaires: les vagues et la fuite des sédiments par les courants.

Ces considérations nous amènent au niveau de la beine par 2 ou 3 m de fond dans le secteur de transition entre la beine d'accumulation exceptionellement soumise à l'hydrodynamisme, par très gros temps seulement, et la beine d'érosion sans cesse sollicitée par les vagues. C'est à partir de ce secteur que se décide le recul du rivage. Nous pensons à des empierrements de bons rochers (attention aux assises dans du sédiment meuble) n'émergeant que par très bas coefficient pour des raisons esthétiques, et dont le sommet avoisinerait la côte 428,90 m. Il ne s'agit pas d'un ouvrage continu et parallèle à la côte mais d'une série de digues immergées d'une cinquantaine de mètres chacune, décallées et aparllèles entre elles, et enfin et surtout perpendiculaires à l'axe du vent dominant qui est la bise. (figure no. 26)

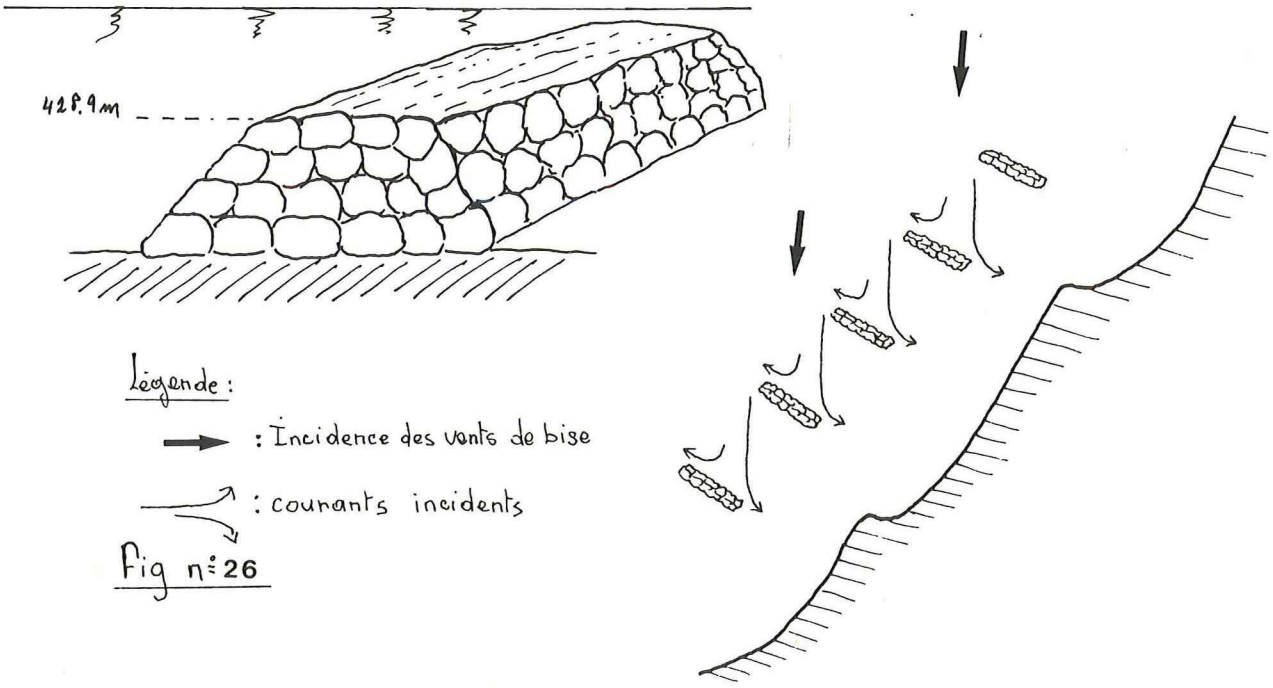


Fig n° 26

Nous voulons croire à priori dans la mesure où ce n'est pas notre spécialité que d'une part de tels ouvrages, dont il reste à déterminer l'espacement et le décalage les uns par rapport aux autres, auraient pour effet de casser les houles moyennes et grosses spécialement en hiver où les eaux sont basses. D'autre part en direction de la côte les courants résultants entre ces épis immergés finieraient d'anihiler les dernières vagues réussissant à franchir l'obstacle. Vers l'extérieur ces courants incidents perturberaient de la même façon le sens d'écoulement des mouvements de houle épargnant du même coup des efforts sur l'épi suivant. Enfin ces empierrements qui laissent de larges espaces ouverts pour la circulation de l'eau ne créeraient pas un effet de lagon préjudiciable pour la qualité biologique et physico-chimique de l'eau.

Comme autre moyen en amont de ces épis et au milieu d'eux, nous aurions vu deux îles, autres que des rêves d'enfant, mais bien deux unités remplissant de multiples fonctions. (figure no. 27) La première étant comme pour les épis de rompre les houles, mais avec plus d'ampleur, les îles mesurant une longueur du moins égale au double. De par leur structure, les deux alignements empierrés dissymétriques dans le sens transversal et parallèles qui constitueraient l'enveloppe protectrice de chaque île créeraient un volume intérieur considérable qui pourrait être avantageusement comblé par des mètres cubes de roseaux provenant de la fauche des marais avant que d'autres débouchés leur soient trouvés. Il faudrait veiller techniquement à éviter la fuite des roseaux par les interstices entre les rochers. Ce comblement végétal mélangé avec de la terre pourrait servir de support à une végétation basse, moyenne et élevée produisant sur les vents une perturbation salutaire de leur flux par effet de haie.

Dans une toute autre perspective nous aurions beaucoup de chance aussi de voir jouer à ces îles tranquilles et isolées

un rôle de premier plan pour la faune avicole. Enfin d'un point de vue esthétique, de par leur dissymétrie transversale, la berge visible depuis la côte serait précisément celle qui se trouve en pente douce donc celle à l'allure la plus naturelle.

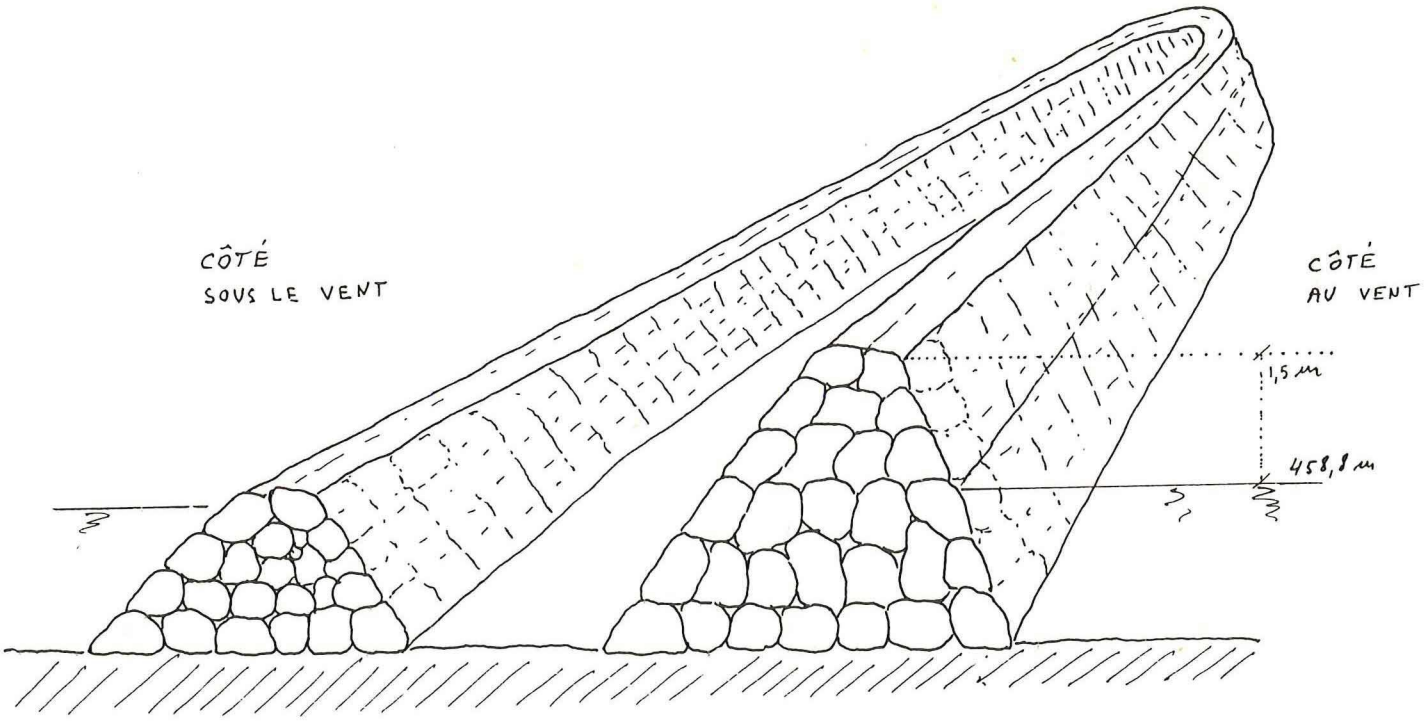


Fig. N° 27

6.2. Au niveau des mentalités

Il peut paraître paradoxal d'intervenir au niveau des mentalités pour préserver du recul un rivage. Et pourtant! Tout ce qui est bon pour le lac est bon pour sa rive. Tout ce qui concoure à faire aimer ce lac, connaître ses zones naturelles, ignorées au demeurant par la grande majorité, peut contribuer à les sauvegarder. Car enfin elles peuvent être sauvées non tant par de grosses sommes d'argent que par un certain engagement. Et cet engagement appartient à l'opinion publique, voilà sa richesse. Donc faire connaître avant tout. Simplement. Dans l'esprit de ce magnifique sentier-nature tout proche du Château de Champ-Pittet, ou de ces petites revues bien illustrées, bien écrites, qui donnent la parole aux dernières loutres.

C'est une démarche aujourd'hui plus facile qu'hier dans la mesure où la sensibilité et le besoin d'espaces naturels s'affirment de plus en plus comme contre-poids de la vie moderne. C'est une opportunité qu'il faut saisir et qui peut autoriser quelques projets audacieux, dont celui-ci auquel nous avons songé = Après avoir lu dans la presse (voir en annexe) un compte rendu sur une expérience pilote, menée dans le petit village de Chavannes les bois sur un essai d'adoption de lessives sans phosphate et qui semble-t-il donne beaucoup d'espoir avant des résultats tangibles, nous avons pensé que la même expérience, tout en tenant compte d'un milieu assez différent, aurait pu être étendu à la Ville d'Yverdon. Pourquoi la ville d'Yverdon et bien pour plusieurs raisons. D'abord pour une raison historique; c'est une ville qui a derrière elle une solide tradition de lutte en faveur de l'environnement. Ensuite Yverdon est une ville moyenne où l'expérience revêtirait une autre ampleur, très significative au plan des résultats obtenus et où la campagne de sensibilisation resterait à l'échelle des possibilités militantes d'un petit groupe d'individus bien décidés. En dernier lieu la situation géographique de la ville, tout en amont, donne une

importance particulière, vis à vis de la santé bio-chimique du lac, à ses rejets d'eaux usées.

Pour que la campagne réussisse, il faudrait conjointement que les habitants puisent la force de leurs motivations en visionnant quelques films ou expositions sur leur lac afin qu'ils aient clairement à l'esprit que c'est un des mieux conservé et un des moins pollué de Suisse, et donc que l'expérience en vaut la peine. Pour la valorisation de leur action, qu'ils sachent bien qu'ils seraient des pionniers en la matière, dignes d'être suivis par beaucoup d'autres.

CONCLUSION

En fournissant des éclaircissements sur les processus qui conduisent au recul du rivage, et à moyen terme à la disparition de cette partie de la Grande-Cariçaie, nous espérons avoir su convaincre de la necéssité de sauvegarder ce milieu exceptionnel. Laisser mourir cette rive, quand elle peut être sauvée pourrait passer pour de la non-assistance, et ce serait sûrement mourir un peu soi-même. Nous souhaitons aussi avoir démontré en passant, que ces zones naturelles de plus en plus rares, qui étaient jadis des havres de quiétude sont en passe de devenir aujourd'hui des zones de décompression pour chacun d'entre nous. Du point de vue du rôle social qu'elle sont appelées à jouer il ne fait plus aucun doute qu'il faille les protéger en s'en donnant les moyens.

REMERCIEMENTS

A Kristine, Jacqueline, Jean-Louis,les pêcheurs d'Yvonand et le gardien de port de Grandson.

A notre directeur de mémoire - B. Frochot

A l'équipe de Pro-Natura-Helvetica

Au directeur de l'Institut du Génie de l'Environnement - Y.-L. Maystre

Et à toutes les personnes dont les noms suivent:
Mme Pokorny
Mrs Burrus
Moret
Vedy
Gogel
Lang
Richard
Grattier
Jacques
Dupraz
Bureau Bonnard et Gardel

BIBLIOGRAPHIE

I. Documents de base

ROULIER, C. (1980). Plan de protection des rives du lac de Neuchâtel. Etude préliminaire de l'érosion de la rive sud du lac de Neuchâtel; étude No. 10, non publiée.

QUARTIER, A. (1948). Le lac de Neuchâtel. Mém. Soc. Géographie, Neuchâtel, 164 p.

SOLLBERGER, H. (1974). Le lac de Neuchâtel, ses eaux, ses sédiments, ses courants sous-lacustres. Thèse, fac. sciences , Université de Neuchâtel.

ROLLIER, M., ANTONIAZZA, M. et ROULIER, C. (1981). Plan de protection de la rive sud-est du lac de Neuchâtel. Ligue Suisse pour la protection de la nature, Bâle.

II. Documents généraux

Plan directeur de la rive sud du lac de Neuchâtel et des rives du lac de Morat. (1982) Office des constructions et de l'aménagement du territoire, Fribourg et Service de l'aménagement du territoire, Lausanne.

La Grande-Cariçaie, la rive sud du lac de Neuchâtel. (1980). Brochure Pro Natura Helvetica.

ANTONIAZZA, M. (1979). Les oiseaux nicheurs des marais non boisés de la rive sud-est du lac de Neuchâtel. Inst. Zool. Univ. Neuchâtel.

ANTONIAZZA, M. et al. (1980). Biogéographie appliquée à la région du lac de Neuchâtel. Estimation de la valeur naturelle du écosystèmes riverains. Bull. Soc. Neuch. Géographie 25, 21-50.

BURRUS, D. (1980). Etude Sédimentologique de la bise de Corsier-PORT. Travail de diplôme d'Ingénieur-Géologue, Laboratoire de Limnogéologie, Université de Genève.

DUSSART, B. (1966). Limnologie, Ed. Gauthier-Villars, Paris, 676 p.

LARRAS, J. (1956). Effets de la houle et de clapotis sur les fonds de sable. Grenoble, La houille blanche, 4°.

LARRAS, J. (1957). Plages et côtes de sable. Paris, Eyrolles, 117 p.

LARRAS, J. (1961). Cours d'hydraulique maritime et travaux maritimes. Paris, Dunod, 459 p.

PRIMAULT, B. (1964). Etude mésoclimatique du Nord Vaudois, en vue de son aménagement régional. Lausanne, Office cantonal vaudois de l'Urbanisme.

PRIMAULT, B. (1972). Etude mésoclimatique du canton de Vaud. Lausanne, Office cantonal vaudois de l'urbanisme.

RICHARD, J.-L., ROLLIER, M., ANTONIAZZA, M. (1982). Plan de protection des rives naturelles du lac de Neuchâtel. Schwiz. 8. Forstwes. 133, 65-72.

VERNET, J.P. (1978). Cours de sédimentologie, doc. du lab. limno. Univ. Genève.

III. Publications

BAUER, S.W., GRAF, W.H., TISCHER, E. (1977). Les courants dans le Léman en saison froide. Une simulation mathématique. Bull. Tech. Suisse Romande, 19, 239-250.

BRUSCHIN, J. et KLÖTZLI, F. (1977). Draguages lacustres et recul des roselières. Assoc. interna. de recherches hydrauliques. XVIIIe Congrès, Baden-Baden, Séminaire 6, p. 821-826.

DUBOIS, J.-P. et SCHETTY, O. (1976). Evolution de l'état sanitaire de la baie d'Auvernier (lac de Neuchâtel) de 1962 à 1973. Neuchâtel, 1976.

GOGEL, R. (1973). Evolution du rivage à Champ-Pittet. Publ. int. 14 pp.

GRAF, W.F. (1977). Réservoir sédimentation. Ecole polytechnique de Lausanne, Communication du Lab. d'hydraulique, No 35.

KLÖTZLI, F. (1971). Biogenous influence on aquatic macrophytes, especially Phragmites Communis. Hidrobiologica, 12.

KLÖTZLI, F. et ZUST, S. (1973). Conservation of reed-beds in Switzerland. Pol. Arch. Hydrobiol. 20.

KLÖTZLI, F. (1973). Uber Belastbarkeit und Produktion in Schilfröhrichten. Verhande. Ges. f. Ökologie, Saarbrücken.

LACHAVANNE, J.-B., CHOULAT, C. et MUNTEANU, A. (1974). Evolution de la basse plaine du Rhône, objet naturel d'importance nationale. Travail de diplôme de 3e cycle, EPFL, Génie de l'Environnement. Résumé: Bull. Tech. Suisse Romande, No. 18, 1975 et No. 1, 1976.

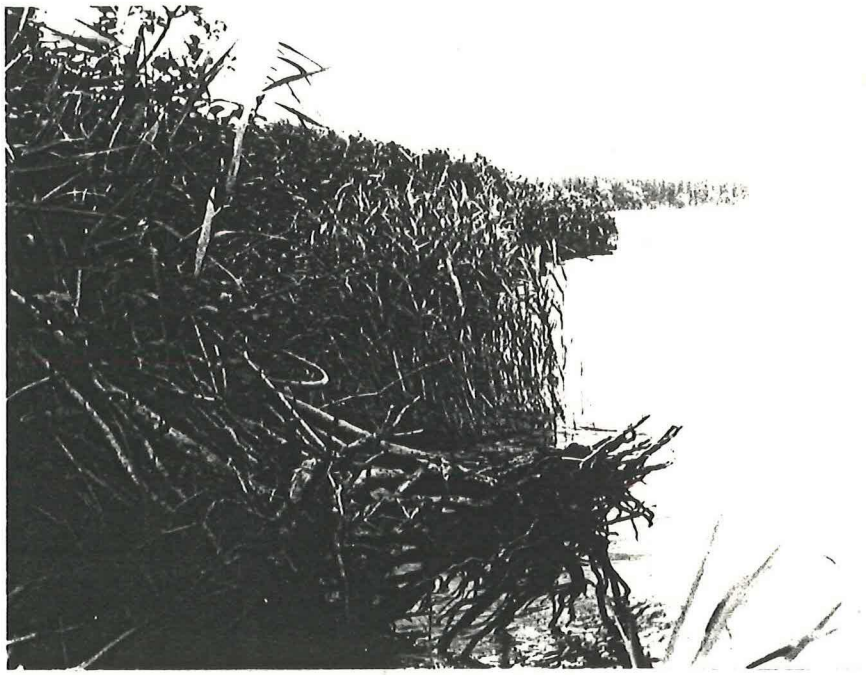
LACHAVANNE, J.-B. (1980). Les manifestations de l'entrophisation des eaux dans un grand lac profond: le Léman (Suisse). Schweiz. Z. Hydrol. 42, 127-154.

LACHAVANNE, J.-B. (1982). Influence de l'entrophisation des eaux sur les macrophytes des lacs suisses: résultats préliminaires. Royal Botanical Society of Belgium, Brussels, pp. 333-339.

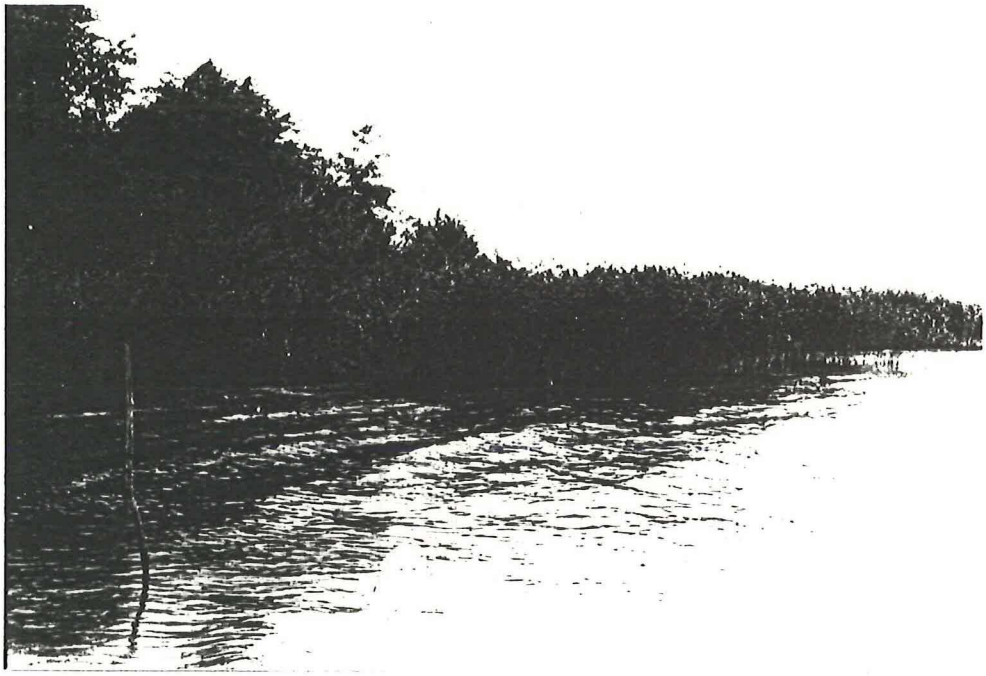
LANG, C. et CUVIT, L. (1981). Degré d'entrophisation du lac de Neuchâtel en 1979-80 et du lac de Morat en 1980 évalué à partir de la faune des sédiments. Lab. d'hydrobiologie, Conservation de la faune, Lausanne.

MORET, J.L. (1980). Les Grangettes. A propos de la régression des rodelières lacustres. Rapport, Institut de Botanique, Lausanne.

- PLANCHE :



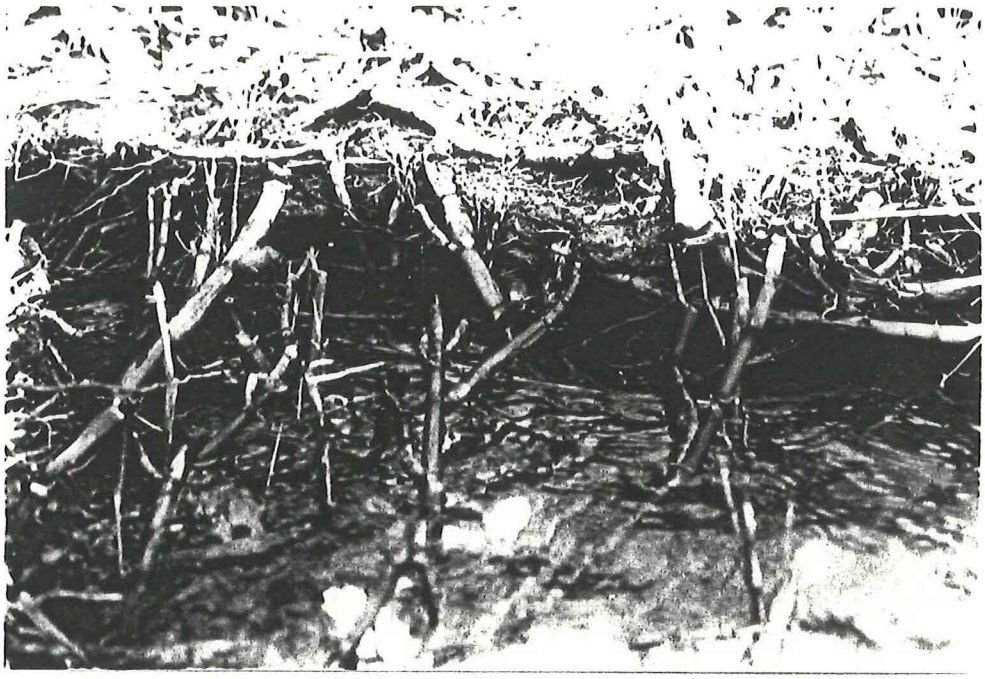
- 1 -



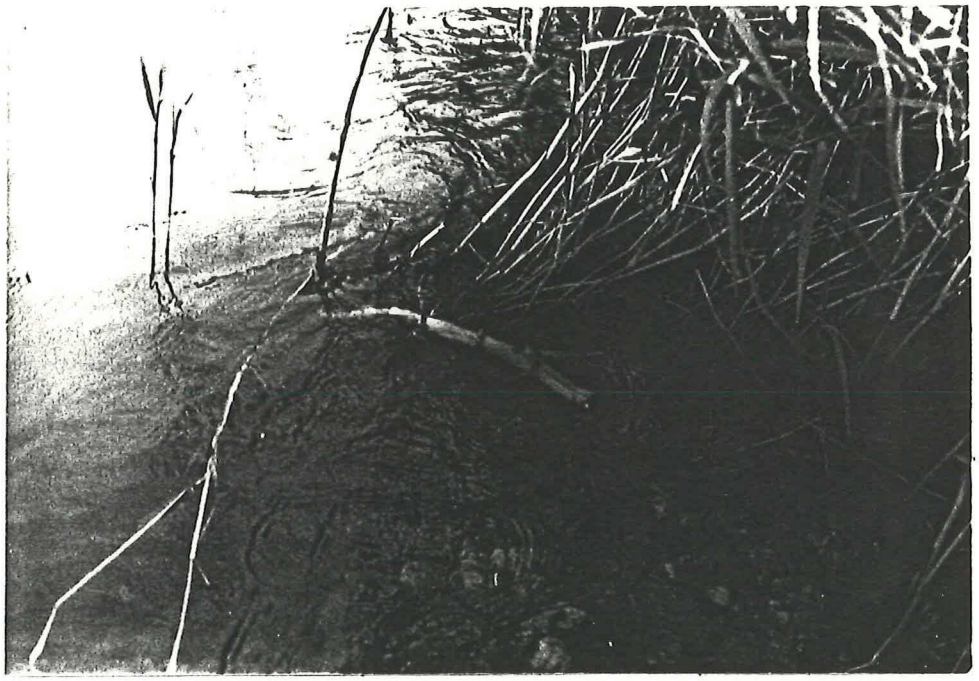
- 2 -

- 3 -

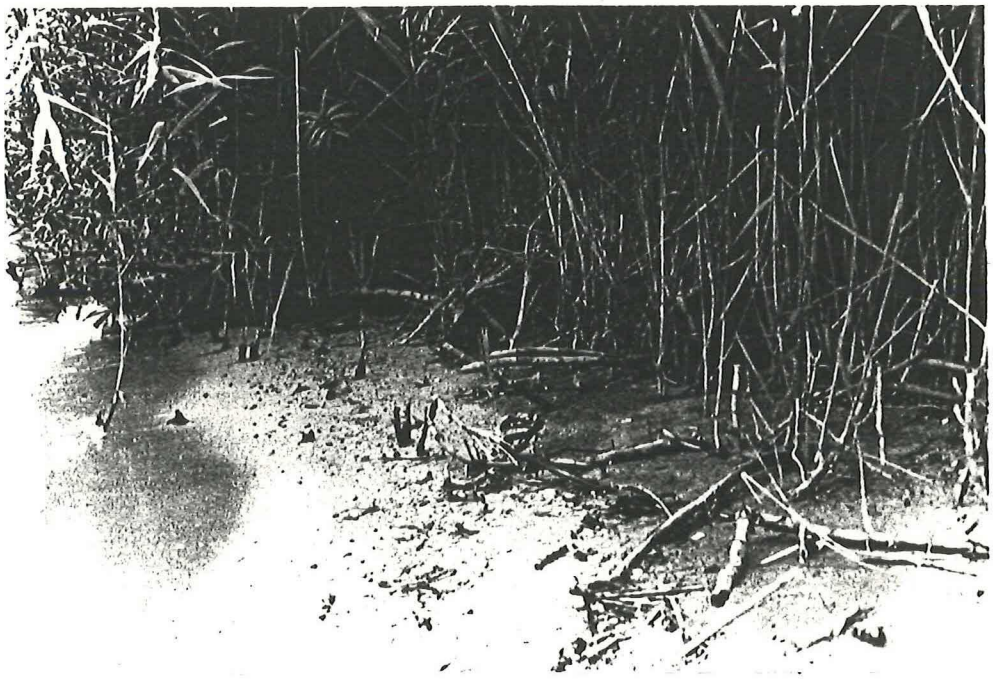
- PLANCHE II



- 4 -



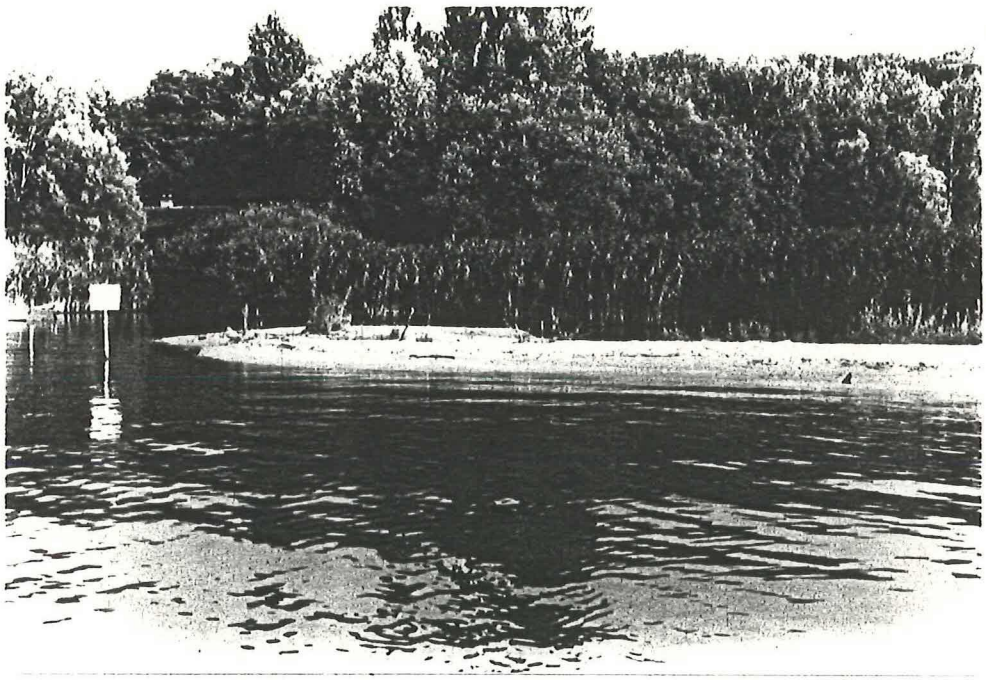
- 5 -



- 6 -

- PLANCHE :

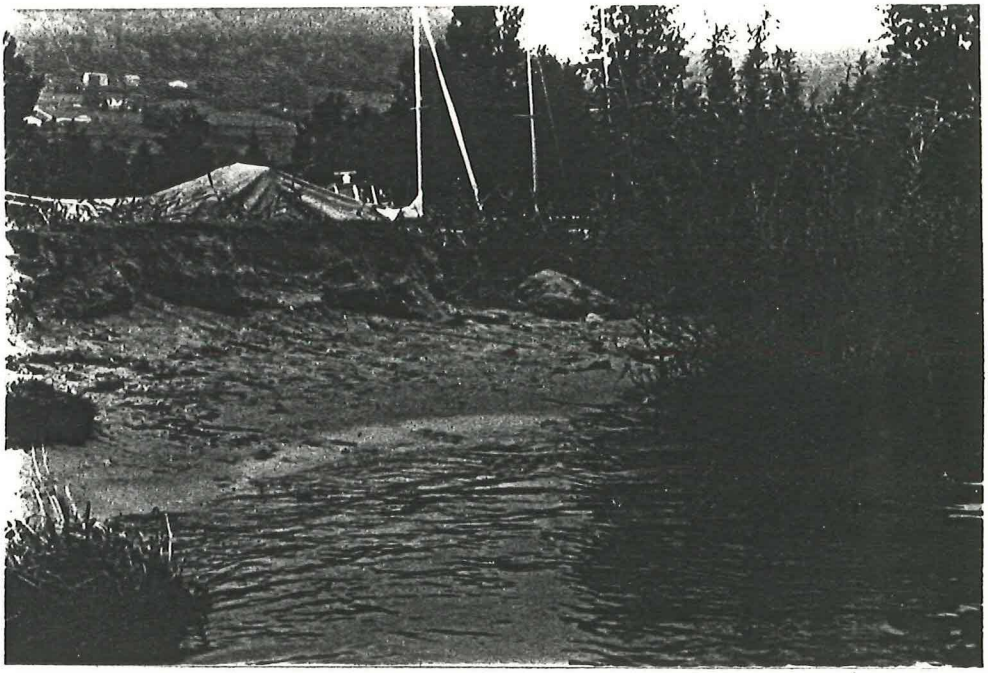
-7-



- 8 -

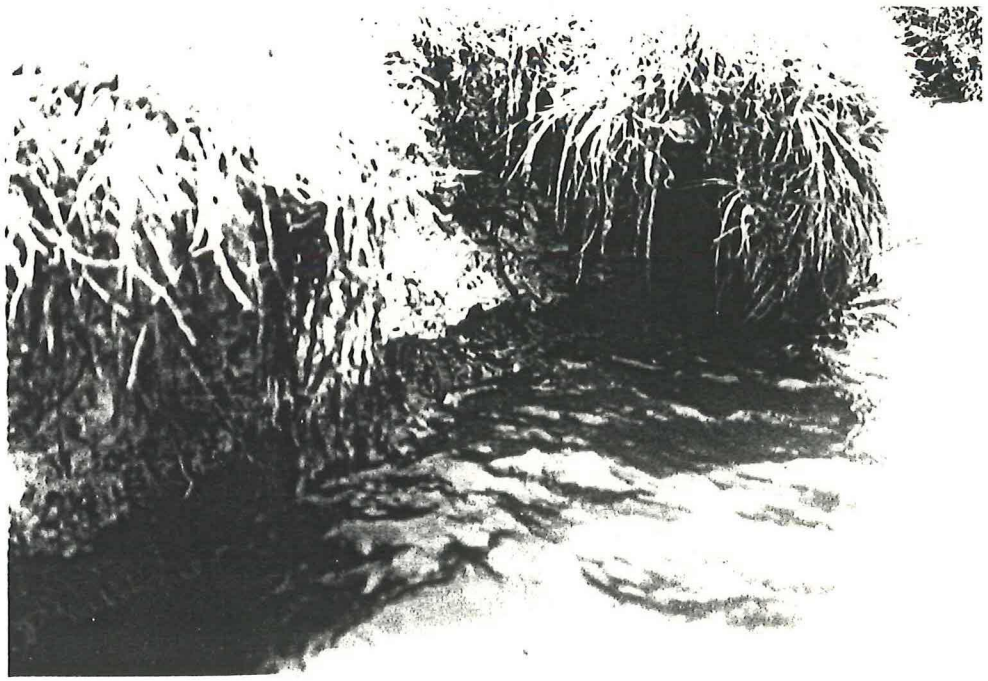
- 9 -

- PLANCHE IV



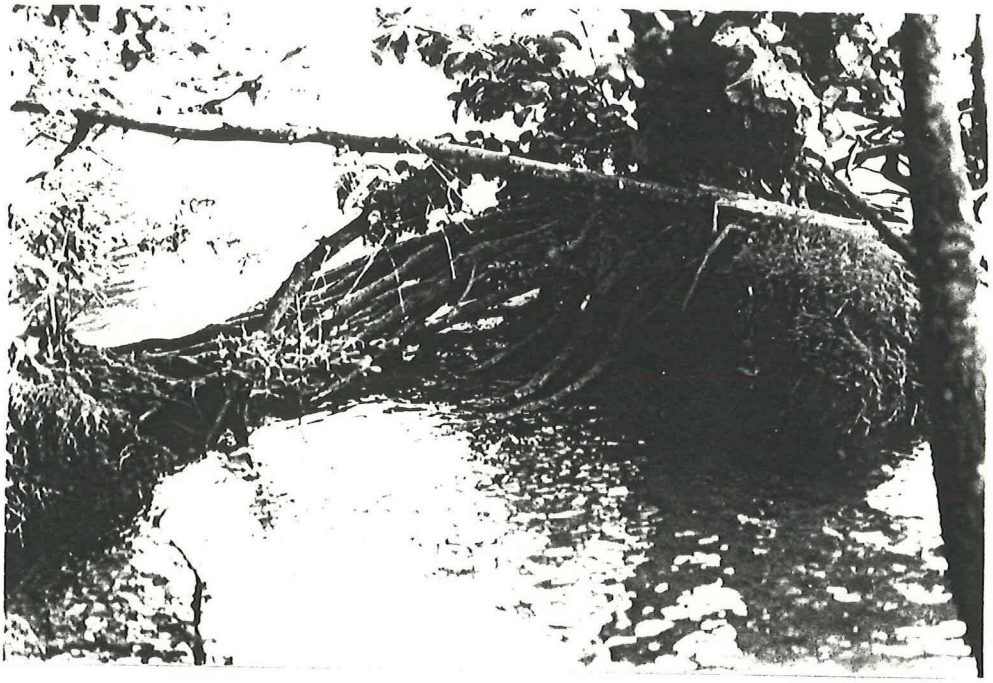
- 10 -

- 11 -



- 12 -

- PLANCHE V

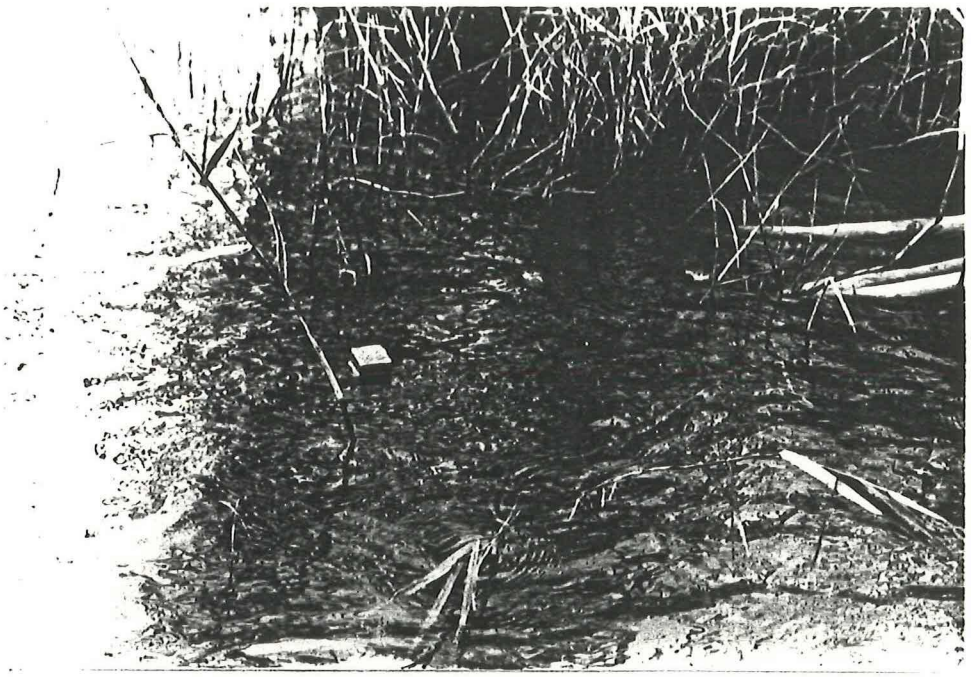


-13 -

-14 -

- 15 -

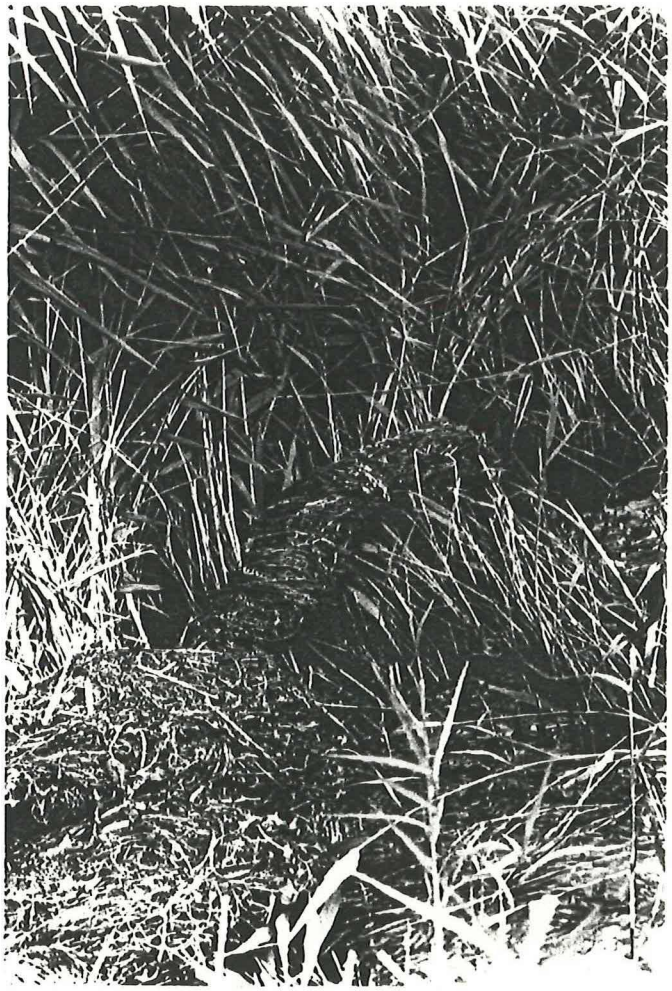
- PLANCHE V

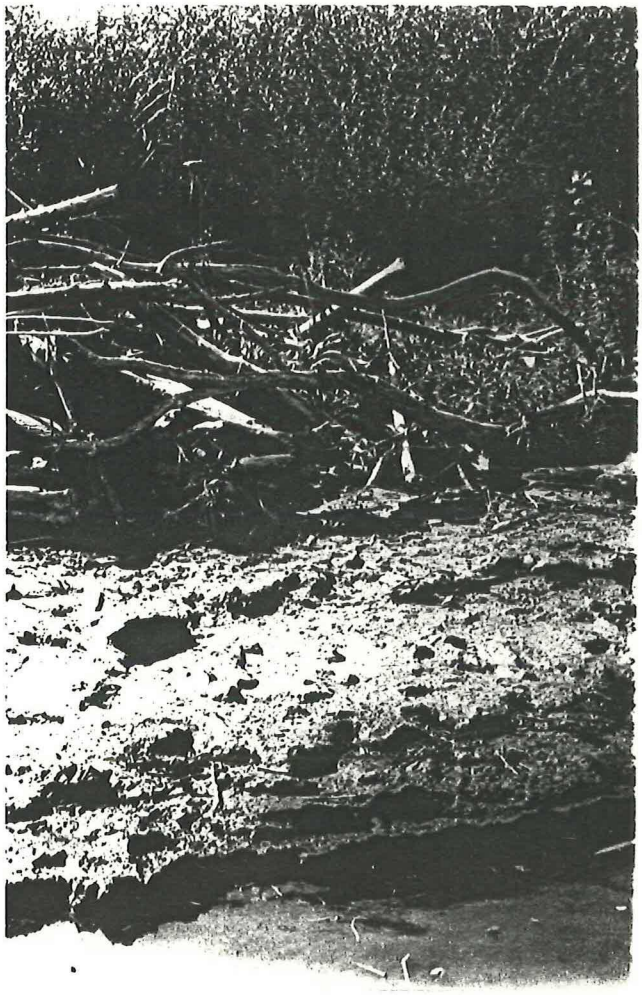


-16-

-17-

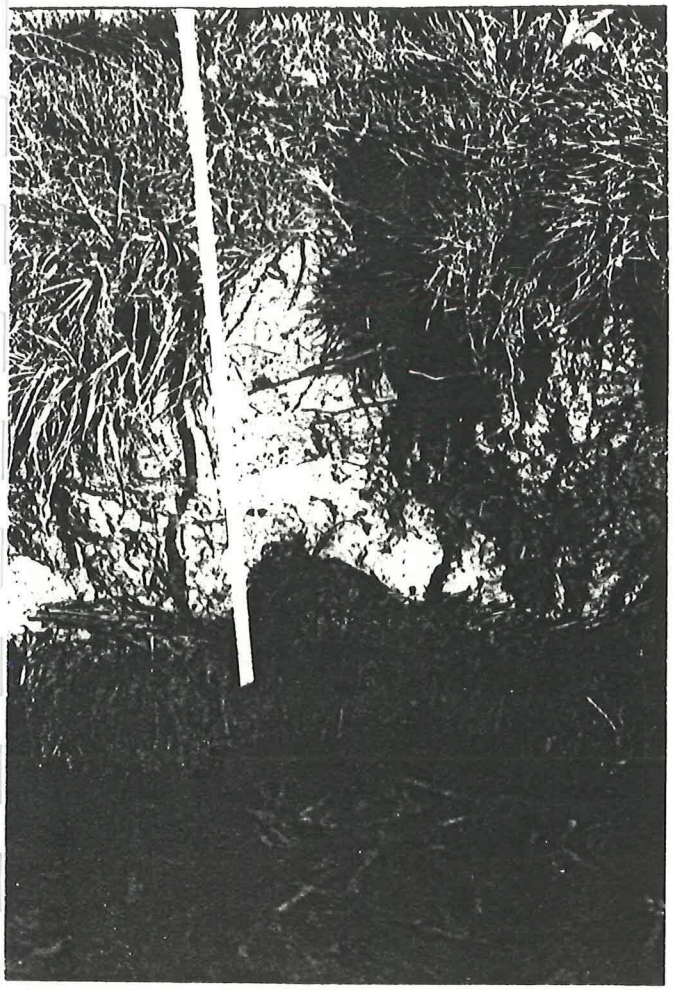
- 18 -



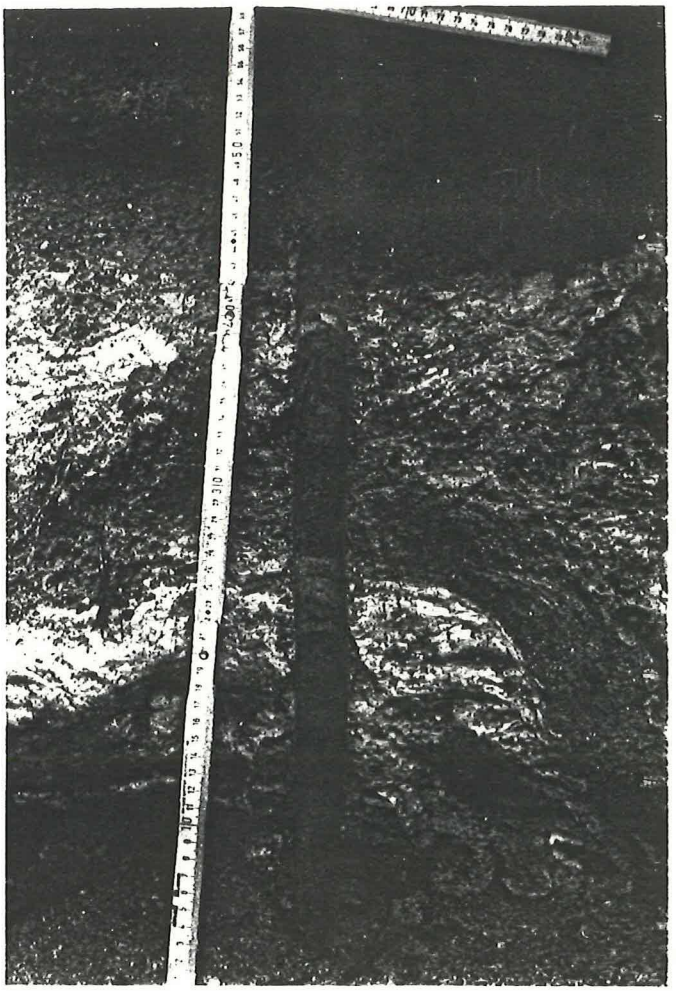


-19- - PLANCHE VII - -20-

-21-

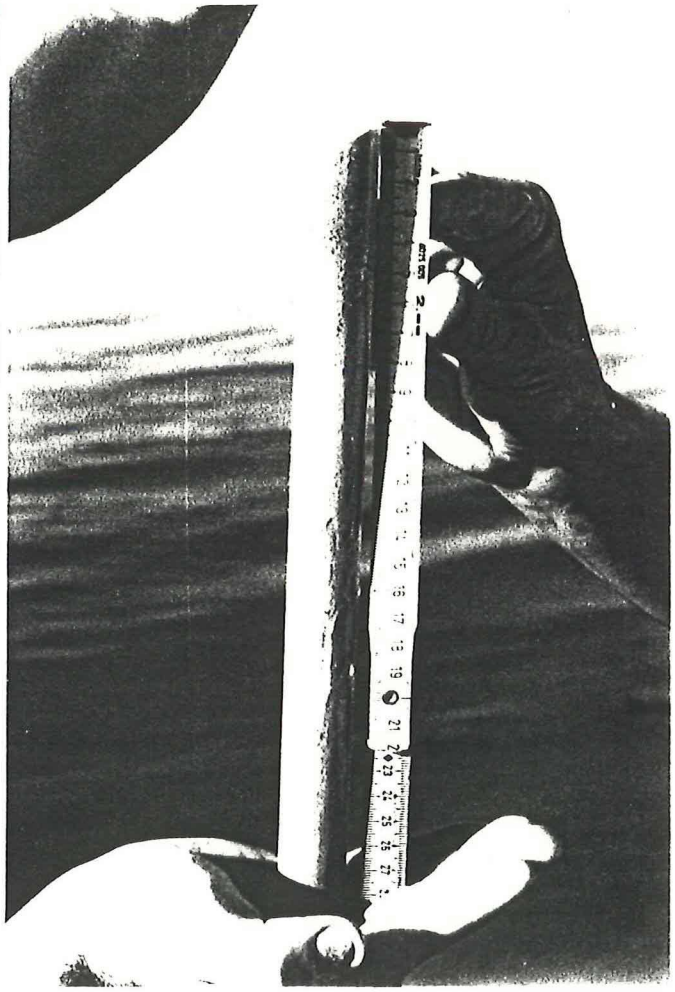


-22-



-23-

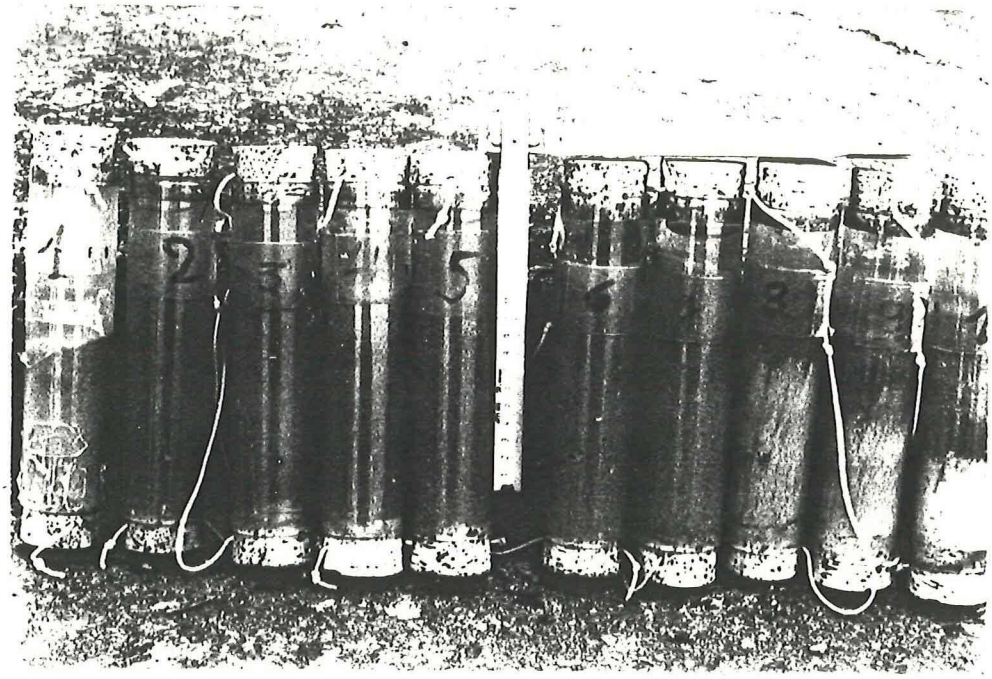
PLANCHE VIII



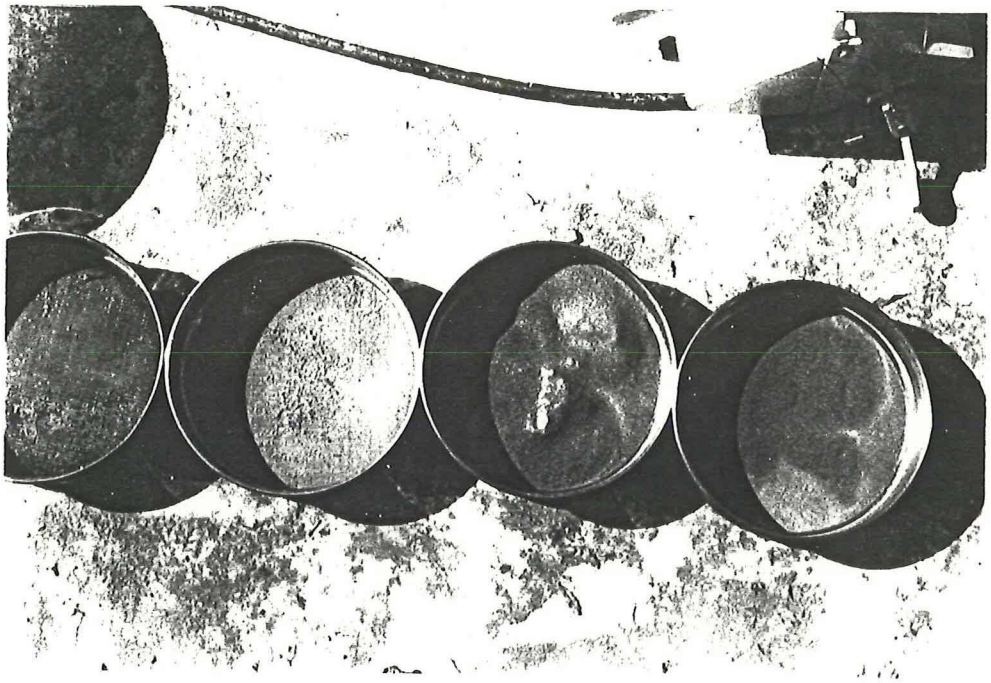
-24-

-25-

PLANCHE I



26

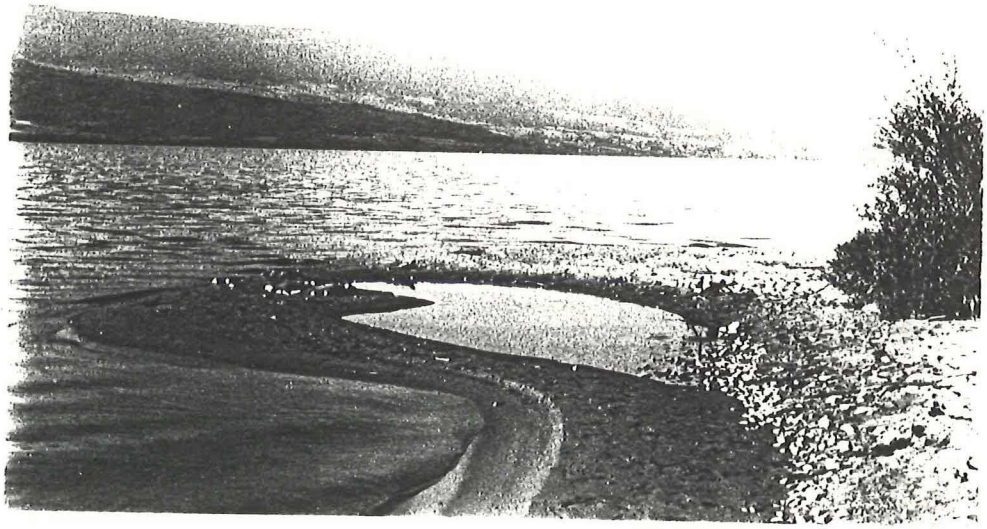


27

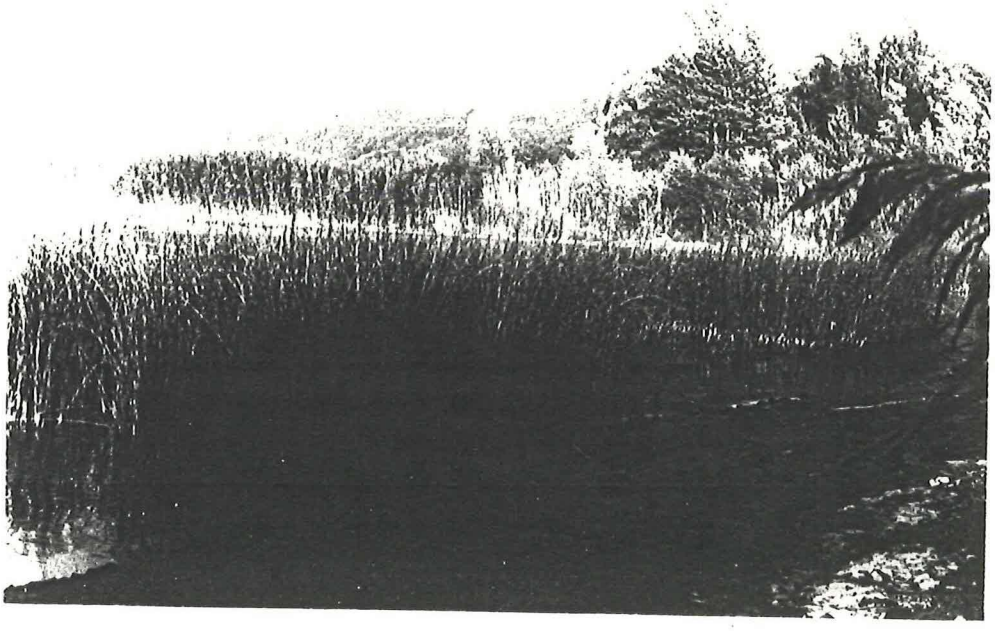
28

PLANCHE X

29



30



31