4.1

Laboratoire de Recherches
Hydrauliques, Hydrologiques et
Glaciologiques de l'Ecole
Polytechnique Fédérale de Zurich

EROSION DE LA RIVE SUD DU LAC DE NEUCHATEL

Rapport final

Grande Cariçaie, Groupe d'étude et de gestion
à Champ-Pittet près d'Yverdon

Rapport 956/2F

Zurich, octobre 1993

Laboratoire de Recherches
Hydrauliques, Hydrologiques et
Glaciologiques de l'Ecole
Polytechnique Fédérale de Zurich

EROSION DE LA RIVE SUD DU LAC DE NEUCHATEL

Rapport final

Grande Cariçaie, Groupe d'étude et de gestion à Champ-Pittet près d'Yverdon

Rapport 956/2F

Zurich, octobre 1993

TABLE DES MATIERES

1. Introduction 3
2. Bases de travail 4
   2.1 Impressions recueillies lors de la reconnaissance des sites du 7 décembre 1990 4
   2.2 Matériau formant le fond du lac 10
   2.3 Documents cartographiques 13
3. Modifications de la rive entre Estavayer et l'embouchure de la Broye 15
   3.1 Mise en valeur des données cartographiques 15
      3.1.1 Généralités 15
      3.1.2 Analyse des résultats déterminés dans les intervalles d'observation 19
   3.2 Mise en valeur des profils de rive 21
   3.3 Modifications de la rive survenues entre 1835 et 1987 dans le secteur de la commune de Gletterens. 23
   3.4 Impressions générales 26
4. Investigations complémentaires concernant le tronçon de rive Yverdon-Estavayer 28
   4.1 Mise en valeur de nouveaux profils de rive 28
   4.2 Comparaison des résultats avec ceux donnés dans le premier rapport partiel 32
5. Image d'ensemble de l'érosion des rives 33
   5.1 Longueurs des tronçons de rive ayant subi des modifications 33
   5.2 Modifications de la superficie des terres touchées 34
6. Synthèse et appréciation finale de l'érosion de la rive sud du lac de Neuchâtel 38
   6.1 Tronçon de rive Yverdon-Estavayer 38
   6.2 Tronçon de rive Estavayer-Broye 39
   6.3 Aspects typiques des tronçons de rive Yverdon-Estavayer et Estavayer-Broye 41
   6.4 Configuration de la beine, mouvement des vagues et transport de sédiment 41
   6.5 Observation future des rives 43
   6.6 Mesures recommandées pour la protection des rives 44

Sources 46

Annexe 1: Modifications de la superficie des terres et du lac

Annexe 2: Evolution des roselières lacustres

1. Introduction

Le présent rapport traite des modifications de la rive sud du lac de Neuchâtel survenues depuis 1880 entre Estavayer et l'embouchure de la Broye. Il fait suite au rapport de la VAW 956/1D (décembre 1989), respectivement 956/1F (février 1990) concernant l'étude réalisée pour le secteur Yverdon-Estavayer. Comme première démarche, celle-ci devait permettre d'expliquer les causes et le mécanisme de l'érosion observée de la rive. Le recul du rivage en fonction du temps dans le secteur indiqué a été analysé et son ampleur montrée sur cartes topographiques. Des prévisions quant au développement possible du processus ont été faites. Le rapport 956/1 présente une analyse de la situation actuelle dans le secteur ouest de la Grande Cariçaie. Il fournit des bases de décision pour les démarches futures à entreprendre et pour l'élaboration de scénarios d'évolution de la rive. L'acquisition de données topographiques plus précises, par levé bathymétrique de la rive sud dans son ensemble, a été recommandée en première priorité. Ces données sont en effet indispensables à la poursuite des observations et à la prise éventuelle de mesures constructives appropriées.

La deuxième partie de l'étude qui est présentée ici complète la première. L'état de la rive dans le secteur s'étendant d'Estavayer jusqu'à la Broye a été analysé et également fixé sur carte. Le degré d'érosion atteint dans des profils de rive choisis comme référence est montré à l'aide de diagrammes "temps-distance". Les informations complémentaires recueillies dans l'intervalle séparant les deux parties distinctes de l'étude générale ont été exploitées et prises en considération dans les réflexions faites. L'état du secteur ouest de la rive (rapport 956/1) a été comparé à celui du secteur est (rapport 956/2). Finalement, la synthèse des résultats exprimant les pertes en superficie de terrain ainsi que le répertoire des tronçons en phase d'érosion donnent une image quantitative des modifications touchant la rive de l'ensemble de la Grande Cariçaie.

Le mandat concernant la réalisation de cette deuxième partie de l'étude a été remis le 7 janvier 1991 au Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques (VAW) de l'EPFZ par le Groupe d'étude et de gestion (GEG) de la Grande Cariçaie.

2. Bases de travail

2.1 Impressions recueillies lors de la reconnaissance des sites du 7 décembre 1990

Le 7 décembre 1990, une reconnaissance en bateau partant du port de Portalban a été faite par Messieurs Rollier, Bourdier (GEG) et Chervet, Huber, Raemy (VAW) (figure 1). La rive du lac a été longée tout d'abord en direction de Champmartin et de Cudrefin. Puis, après retour au point de départ, la reconnaissance a été poursuivie au sud-ouest de Portalban vers Gletterens, Chevroux et finalement Forel (installations militaires). Le temps hivernal était particulièrement froid, avec des températures situées nettement en dessous du point zéro. Les rayons du soleil n'ont pas pu percer la couche de brouillard élevé.

Les photographies 1 à 15 choisies témoignent des impressions recueillies. Les emplacements des prises de vue, no 1 à 15, sont montrés à la figure 1. Des tronçons de rive intacts mais aussi des dégâts dus à l'érosion sont visibles. Des observations analogues à celles concernant le secteur Yverdon-Estavayer (rapport 956/1 de la VAW) ont également été faites ici: racines de grands arbres dénudées par le retrait de la rive, bois couché après basculement, roseaux endommagés ou détruits par les corps flottants échoués, rhizomes morts sous la surface du plan d'eau. Ces photographies ne permettent toutefois pas d'évaluer le taux d'érosion annuel ni de constater un accroissement éventuel de la surface des roselières.

Différents types de rive peuvent être définis:

a) rives boisées, à prédominance d'aulnes. Ces rives présentent des dégâts évidents dus à l'érosion, visibles aux arbres déracinés et aux buissons endommagés. Des exemples sont montrés sur les photos 1, 5, 6, 9, 12, 13 et 14. Lors d'un processus naturel antérieur, les roselières ont probablement été supplantées par le boisement.

b) rives constituées de roselières paraissant encore intactes dans leur majorité mais souffrant toutefois localement de l'érosion (photo 15). Par l'action des vagues, les traces de dégâts sont plus vite estompées en bordure des roselières que dans les zones boisées.

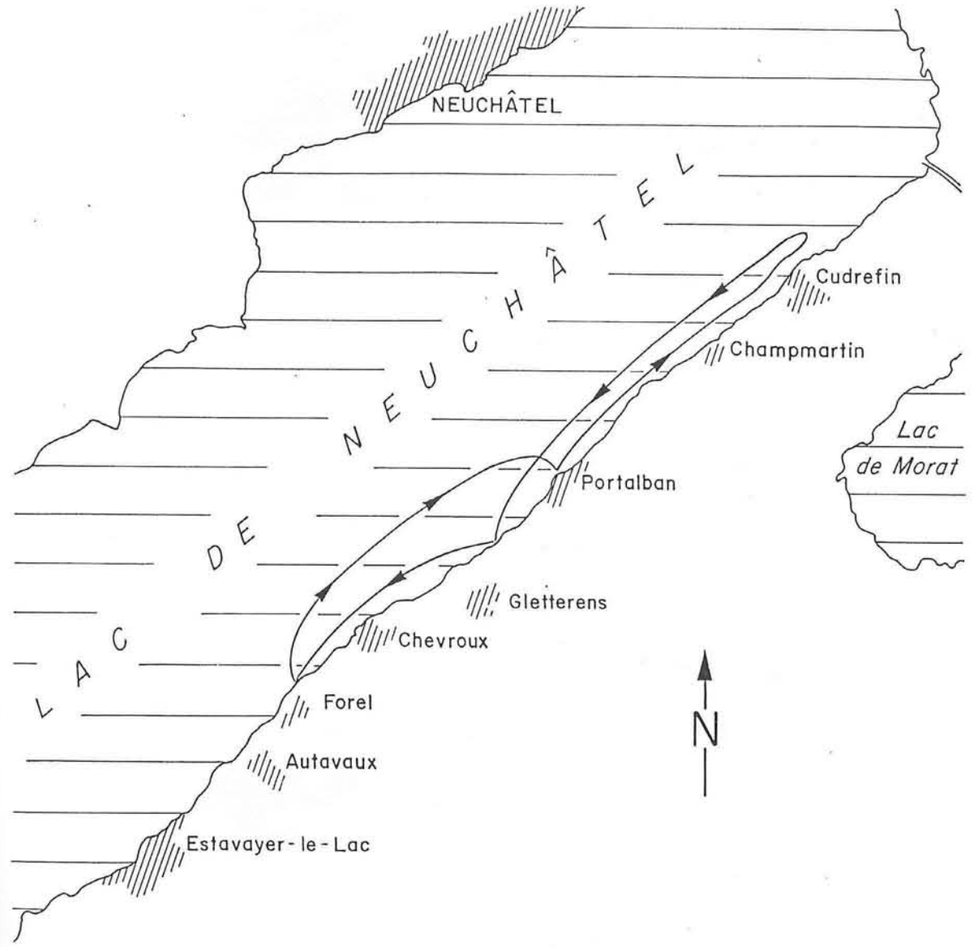


Figure 1:
Lac de Neuchâtel: itinéaire de la reconnaissance du 7.12.90

Photo 1: Baie formée par les roselières, à 2 km au nord-est de Portalban, Les arbres déracinés visibles à droite témoignent de l' importante érosion dont souffre la rive.

Photo 2: Roselières lacustres.

Photo 3: Front d' érosion marqué sur la rive sablonneuse de la Grève de Cudrefin.

Photo 4: Dégâts causés à la végétation par l' abaissement de la rive.

Photo 5: Privés d' assise, de nombreux arbres basculent.

Photo 6: dito photo 5.

Photo 7: Ceinture de roselières intactes au nord-est de Cudrefin. A l' arrière-plan, les digues du canal de la Broye s' avançant dans le lac sont visibles.

Photo 8: Rive à l' est de Cudrefin.

Photo 9: Racines des arbres dénudées par l' affouillement dû à l' effet des vagues. Vue prise à l' est de Cudrefin.

Photo 10: dito photo 9.

Photo 11: Vue prise vers l' ouest près des installations militaires de Forel. A cet endroit, la rive est constituée de molasse dont on remarque les affleurements.

Photo 12: Extrémité sud-ouest de la ceinture de roselières longeant la rive entre Chevroux et Forel.

Photo 13: Rive endommagée entre Forel et Chevroux.

Photo 14: Arbres déracinés entre Portalban et Chevroux.

Photo 15: Rhizomes morts jonchant le fond

c) rives à molasse affleurante qui ne se sont guère modifiées au cours du temps (photo 11, près de Forel).

2.2 Matériau formant le fond du lac

Comme dans le secteur Yverdon-Estavayer, le fond du lac entre Estavayer et l'embouchure de la Broye est essentiellement constitué de sable fin. Ce sable est un produit de l'érosion des grès composant les hauteurs du plateau molassique de Suisse occidentale situées au sud du lac. Les roches de cette molasse d'eau douce inférieure (Aquitanien) émergent en formant les falaises près de La Corbière, Autavaux et Forel [1].

La courbe granulométrique d'un échantillon de sable prélevé au sud de Cudrefin est montrée sur la figure 2. Pour comparaison, celle du sable trouvé à Cheyres est également donnée. Avec un diamètre moyen $d_m = 0.42$ mm, le sable de Cudrefin est à peine plus grossier que celui de Cheyres caractérisé par la valeur $d_m = 0.36$ mm. Les deux endroits de prélèvement sont distants de 22 km environ.

Des résultats d'analyse identiques peuvent être tirés de l'étude complémentaire concernant l'exploitation de sable près d'Estavayer par la firme Siporex [2]. Cette étude décrit entre autres la configuration de la beine dans les zones d'exploitation de sable. Ces zones se trouvent sur des deltas sous-lacustres délimitant la beine à quelque 800 m de la rive (photo 16). La morphologie très particulière de ces deltas a été relevée par échosondeur. On constate que les talus en direction nord sont inclinés à 30 %, tandis qu'en direction ouest leur pente n'excède pas 3 à 5 %. Cette asymétrie pourrait être provoquée par l'action différenciée des courants de retour sur la beine, causés alternativement par les vagues dues au vent d'ouest ou à la bise et qui entraînent le sable vers le large. Il est également possible que le matériau, prélevé en cas de crues à la roche molassique et transporté par les ruisseaux se jetant dans le lac entre Estavayer et Forel, ait une certaine influence sur la formation des deltas. L'orientation des dunes,

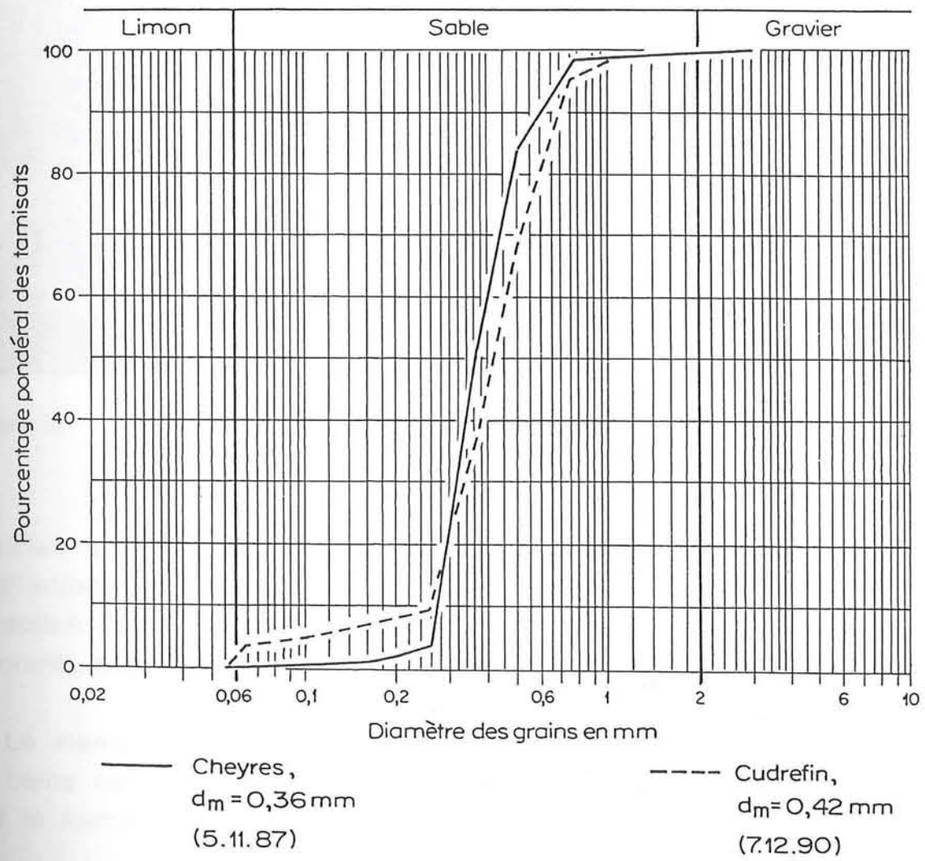


Figure 2:
Courbes granulométriques du matériau du fond du lac prélevé à Cheyres et à Cudrefin.

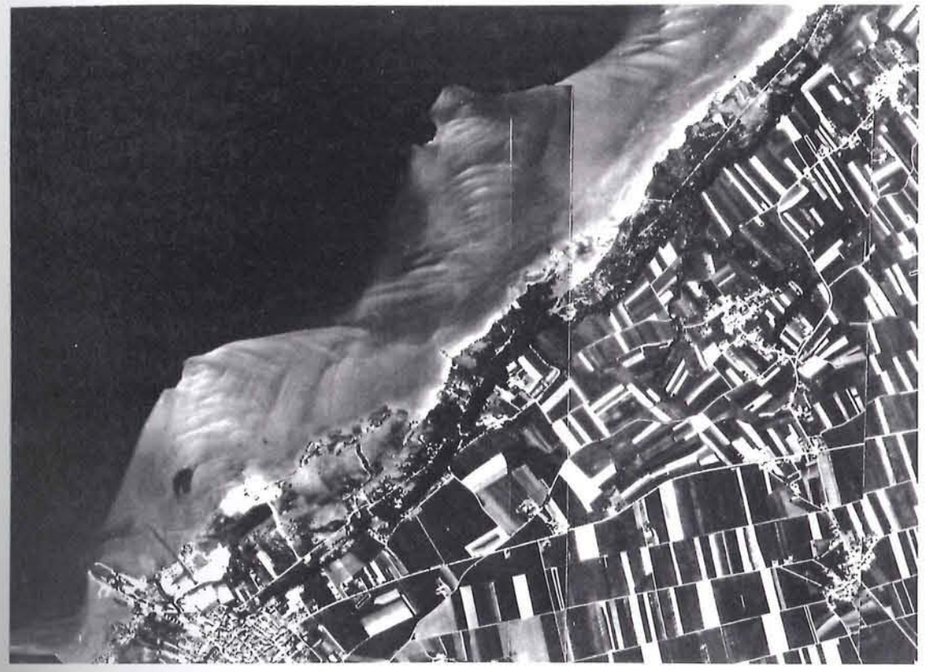


Photo 16 Vue aérienne de la beine, prise en 1968 à Estavayer, et montrant les deltas formés par le vent du sud-ouest ou par la bise. Les zones d'exploitation sont visibles à la pointe de ces deltas.

visibles à la surface de ceux-ci, montre que le transport solide s'effectue tantôt en direction générale Nord-Est, tantôt en direction Sud-Ouest, selon la nature des vagues et ainsi des courants engendrés.

Le manque actuel d'informations détaillées sur la dynamique de la beine ne permet pas de donner une explication plus exhaustive sur la formation et l'évolution de ces deltas.

De manière générale, dans toutes les zones sablonneuses des eaux peu profondes (profondeur inférieure à 2 m) et au-delà jusque dans la partie supérieure du mont, le fond du lac est caractérisé par la présence de rides formées déjà par les faibles vagues de quelques mètres de longueur. Ces rides témoignent des mouvements continuels du sédiment (photo 17).

Photo 17
Rides formées par les vagues dans la zone des eaux peu profondes, près de Forel

2.3 Documents cartographiques

Des copies des cartes topographiques mentionnées dans le tableau 1 ont pu être obtenues auprès de l'Office fédéral de topographie à Berne. Celles-ci ont été utilisées pour évaluer le déplacement de la rive. Les positions de la ligne de rive données dans différentes éditions annuelles des cartes ont été relevées et comparées entre elles. Les cartes disponibles, avec une échelle de 1:25'000 et une équidistance des courbes de niveau de 10 m, n'ont par contre pas permis d'analyser l'évolution de la topographie de la zone des rives.

Tableau 1: Répertoire des cartes topographiques utilisées

a) Données concernant la carte Dufour 1:25'000

XII	XII	XII
Subdivision 5	Subdivision 1	Subdivision 2
1835-1856	1835-1849	1835-1855

b) Lac de Neuchâtel 1880, 1:25'000, P. Manuel, A. Durheim

c) Atlas Siegfried 1:25'000

St. Aubin 325	Villars 311	Sugiez 312
		1879
		1879/80
1890	1890	
		1893
1894	1894	1894
1894/96		
1899	1899	1899
1899/00	1899/8	
1899/06		
		1903
		1903/08
		1906
		1906/15
1907		
1907/08		
	1911	
	1911/14	
	1911/17	
	1911/19	
1912		
1912/13		
1912/14		
1912/17		
1912/19		
		1915/17
		1915/19
1928/32	1928/32	
		1930/33
1937/40	1937/40	
	1946/49	1946/49
1946/42	1946/52	1946/52

d) Cartes nationales de la Suisse 1:25'000

Payerne	Neuchâtel	Murten
1184	1164	1165
	1956	1956
1957		
1964		
1968	1968	1968
1975	1975	1975
1981	1981	1981
1987	1987	1987

3. Modifications de la rive entre Estavayer et l'embouchure de la Broye

3.1 Mise en valeur des données cartographiques

3.1.1 Généralités

Les modifications de la rive survenues depuis 1835 ont été déterminées par comparaison des positions de la ligne de rive tirées des cartes mentionnées sous 2.3. La période totale d'observation a été subdivisée en 5 intervalles, à savoir:

Tableau 2. Les cinq intervalles d'observation et les cartes topographiques utilisées

Intervalle de temps	Genre de carte topographique
A 1835 - 1880	Carte Dufour. Pendant cette période, l'abaissement du niveau du lac (1876-1879) a été réalisé dans le cadre de la 1ère correction des eaux du Jura (1868-1891)
B 1880 - 1894	Feuille Manuel/Durheim Début de l'érosion et des tassements
C 1894 - 1927/33	Carte Siegfried Progression des modifications de la rive
D 1927/33 - 1956/57	Carte Siegfried Progression des modifications de la rive
E 1956/57 - 1987	Carte nationale de la Suisse 2ème correction des eaux du Jura (1962 - 1973)

Les résultats de l'investigation, qui portent sur les modifications de la superficie des terres et du lac, sont présentés en couleur dans les annexes 1A à 1E. La position de la ligne de rive à différents stades d'évolution ressort des figures 3a et 3b.

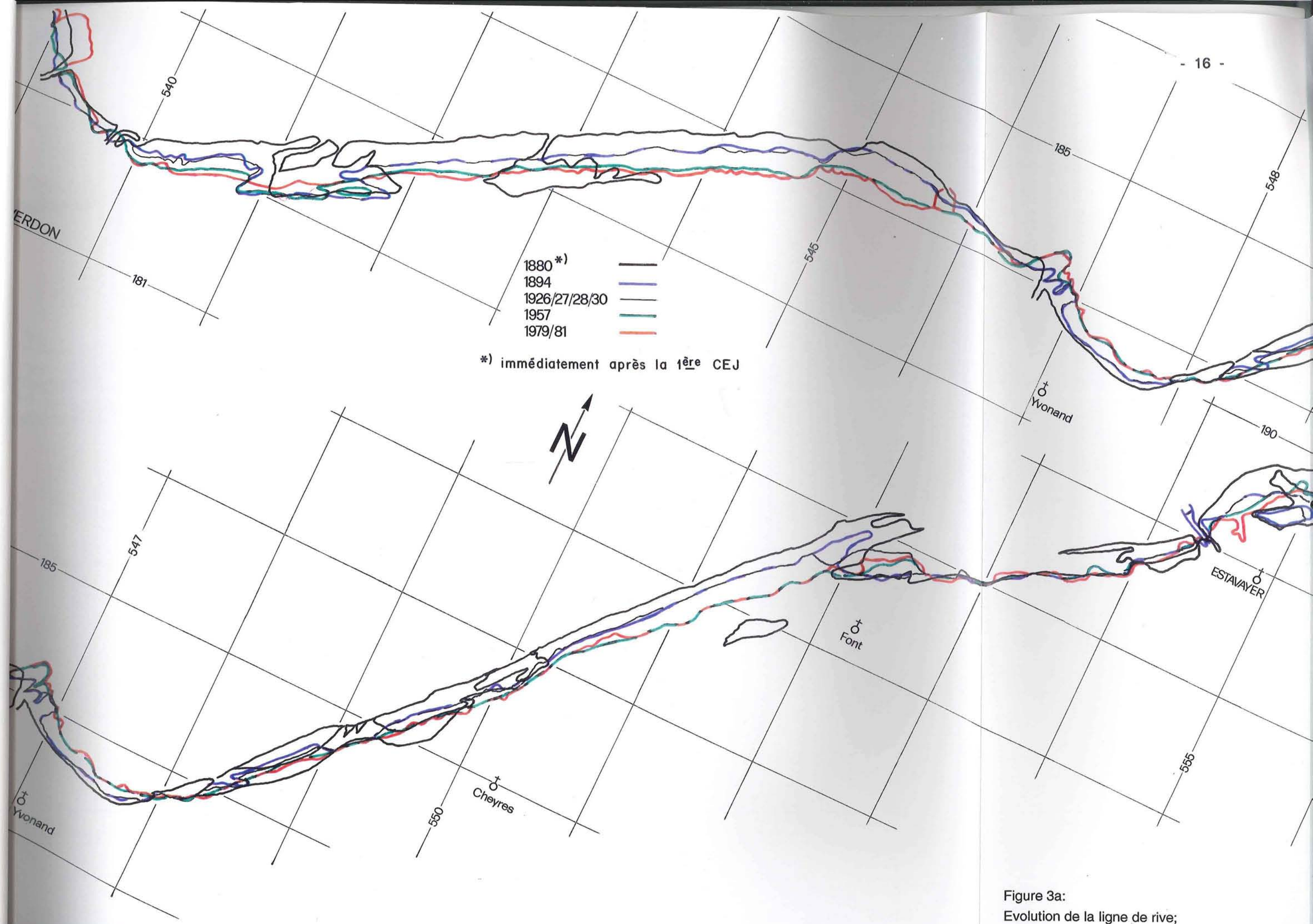


Figure 3a:
Evolution de la ligne de rive;
situation au 1:25'000 entre Yverdon et Estavayer

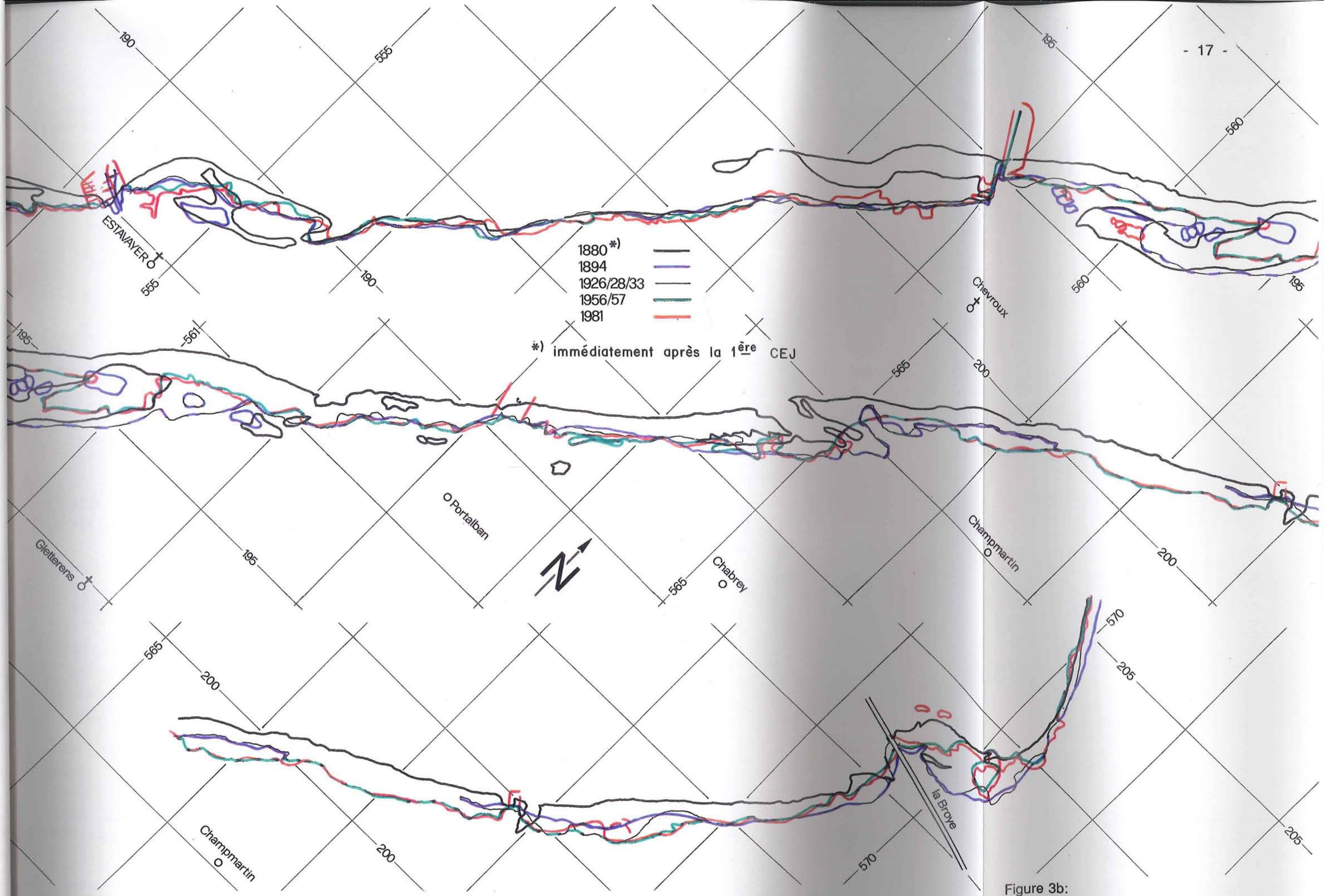


Figure 3b:
Evolution de la ligne de rive ;
situation au 1:25'000 entre Estavayer et la Broye

Toutefois, les indications données dans ces annexes doivent être comparées entre elles sous certaines réserves, ceci pour les raisons suivantes:

- la définition de la ligne de rive est difficile lorsque celle-ci traverse la ceinture de roselières. Au cours des décennies, les topographes chargés de l'établissement et de la mise à jour des cartes n'ont sans doute pas tous fixé la position de la ligne de rive selon les mêmes critères.

- des distorsions et des décalages, inhérents à la copie Xerox en format A3 des calques originaux, peuvent se traduire par des erreurs allant jusqu'à 2.5 mm dans l'impression du papier, soit quelque 62.5 m en nature.

- un décalage temporel, non connu mais pouvant s'étendre à plusieurs années, sépare le moment du relevé de la ceinture de roselières de celui de la parution de la carte.
  En cas de mise à jour partielle sans nouveau relevé de la ligne de rive, la position de cette dernière paraît inchangée dans les éditions consécutives des cartes alors que vraisemblablement elle aurait pu se déplacer entre-temps.

- les niveaux du lac pour lesquels les lignes de rive reportées dans les cartes ont été définies ne sont pas connus. Ils sont différents d'une édition à l'autre des cartes.

- pendant la durée de la campagne topographique, le niveau du lac est soumis à des variations. Sur les berges de faible pente, la position de la ligne de rive peut ainsi présenter des écarts allant jusqu'à plusieurs mètres.

Considérée sur de petits intervalles de quelques années, la position de la ligne de rive définie est imprécise. Mais, comme la période d'observation s'étend à plus de 100 ans, il ne fait aucun doute que l'ordre de grandeur et la tendance des résultats obtenus sont cohérents.

3.1.2 Analyse des résultats déterminés dans les intervalles d'observation

Vers la fin de la période 1835 - 1880 (intervalle A, annexe 1A), soit entre 1876 et 1879, le niveau du lac a été abaissé d'environ 3 m. La zone des eaux peu profondes exondée et asséchée par cette intervention est indiquée en couleur verte dans l'annexe 1A. Entre les axes de coordonnées 555 et 570, la superficie de cette zone s'élève à 11,12 km^2 tandis que la longueur de la rive (y compris celle des anses) atteint 27.34 km.

Entre 1880 et 1894 (intervalle B, annexe 1B), soit peu après l'abaissement du niveau du lac, la superficie des terres à nouveau englouties est de 3.063 km^2. Cette valeur reflète l'effet de l'érosion sur 3.482 km^2, diminué par celui d'un atterrissement sur 0.419 km^2. Des quelque 29.18 km de rive indiqués dans la carte de 1894, 28.25 km se rapportent à un déplacement en direction des terres, respectivement 0.93 km à un déplacement vers le large. Cette grosse perte de terrain n'est probablement pas due uniquement à l'érosion des vagues. Des tassements du sol exondé, constitué de sable fin et saturé d'eau, devraient avoir contribué à un retrait des terres avant que commence l'érosion due aux vagues. Le fait que cette érosion ait été la plus forte peu après l'abaissement du niveau du lac et qu'elle ait diminué par la suite peut être expliqué d'une manière plausible: la largeur de la beine longeant la rive étant la plus faible au début du phénomène d'érosion, les vagues déferlent pratiquement sans être freinées par le fond. Une quantité supérieure d'énergie impliquée dans l'érosion de la rive est ainsi disponible. Encore trop peu développée, la végétation n'a pas été à même d'offrir une protection naturelle suffisante. La progression du mont vers le large due au dépôt des matériaux érodés et ainsi l'élargissement de la beine ont ralenti par la suite le processus d'érosion de la rive.

Lors de la période comprise entre 1894 et 1928/33 (intervalle C, annexe 1C), la rive semble ne s'être que très peu modifiée. L'érosion de 0.224 km^2, à caractère local, touche essentiellement la rive près de Cudrefin et, dans une moindre mesure, celle près de Chevroux. L'atterrissement de 0.103 km^2 a

eu lieu en partie à l'intérieur des terres, où de petites surfaces d'eau, autrefois isolées par l'abaissement du niveau du lac, ont été comblées par la végétation croissante du marais. La zone riveraine de Gletterens est soumise à l'atterrissement, en particulier la Baie d'Ostende dont les dimensions se voient progressivement réduites par l'accroissement de l'importante ceinture de roselières qui l'entoure (voir aussi paragraphe 3.3). Les faibles modifications des rives déterminées dans l'intervalle de temps C par la comparaison des différentes lignes de rive pourraient être dues au fait que les cartes Siegfried utilisées n'ont pas été systématiquement mises à jour à cette époque. En particulier, il est possible que certains tronçons de rive n'aient même été relevés qu'une seule fois.

Entre 1928/33 et 1956/57 (intervalle D, annexe 1D), les modifications des rives sont plus prononcées. Avant la première parution de la nouvelle carte nationale (depuis 1956/57), le relevé des rives a vraisemblablement été mis à jour. L'érosion a touché 0.554 km^2, l'atterrissement 0.881 km^2. L'augmentation des terres atteint ainsi globalement 0.327 km^2. Les zones marquantes d'érosion, avec recul de la rive atteignant jusqu'à 150 m, se situent devant Cudrefin et Champmartin. Un déplacement de la ligne de rive en direction des terres moins prononcé mais atteignant tout de même 100 m a été observé dans les secteurs Chabrey-Portalban, Chevroux, Forel-Autavaux et devant Estavayer. Par contre, l'atterrissement a poursuivi son action dans la région de Gletterens, où les dimensions de la Baie d'Ostende se sont encore réduites pendant cette période (paragraphe 3.3). Des atterrissements marquants se sont également produits dans d'autres anses, à savoir à l'ouest et à l'est des digues du canal de la Broye à son embouchure dans le lac, entre Champmartin et Chabrey, et à l'est d'Estavayer. Il est probable que ces atterrissements soient dus à l'extension des ceintures de roselières et des zones de marais, respectivement à celle de la végétation. Seule une faible partie du terrain gagné sur le lac a été formée à la suite de mouvements de sédiment provenant du fond ou de l'érosion de la rive. Il est sans autre possible que des surfaces, désignées comme

terre ferme dans la carte nationale, soient temporairement submergées en cas de hautes eaux.

De 1956/57 à 1987 (intervalle E, annexe 1 E), la comparaison des cartes ne montre que de faibles variations des rives. Les zones d'érosion sont situées devant Estavayer et Forel, dans une moindre mesure à Cudrefin. On ne peut définir avec certitude s'il s'agit à Estavayer de modifications dues en partie à des travaux (construction du port, dragage de voies de navigation, etc.). Un gain de terrain est constaté dans les petites anses. Il est dû principalement à l'accroissement des roselières, entre Estavayer et Autavaux, à Chevroux, à Portalban et à Cudrefin. Egalement dans l'intervalle d'observation E, les indications tirées des cartes ne sont pas absolument représentatives des modifications réelles survenues sur chaque tronçon de rive. Les causes possibles de cette divergence ont déjà été discutées sous 3.1.1.

3.2 Mise en valeur des profils de rive

L'évolution locale des rives peut être représentée de manière appropriée sous la forme de diagrammes "temps-distance" pour différents profils en travers choisis.

Huit profils ont été examinés sur le tronçon de la rive situé entre Estavayer et l'embouchure de la Broye. Leur emplacement est défini dans les annexes 1A à 1E. Ils sont tous orientés en direction Nord-Ouest et coupent en deux les angles formés par les axes de coordonnées suivants:

Tableau 3: Emplacements des profils de rive choisis.

Profil no	Position du profil ≡ bissectrice des axes de coordonnées
1	191/557
2	193/558
3	194/560
4	195/562
5	197/563
6	198/565
7	200/566
8	201/568

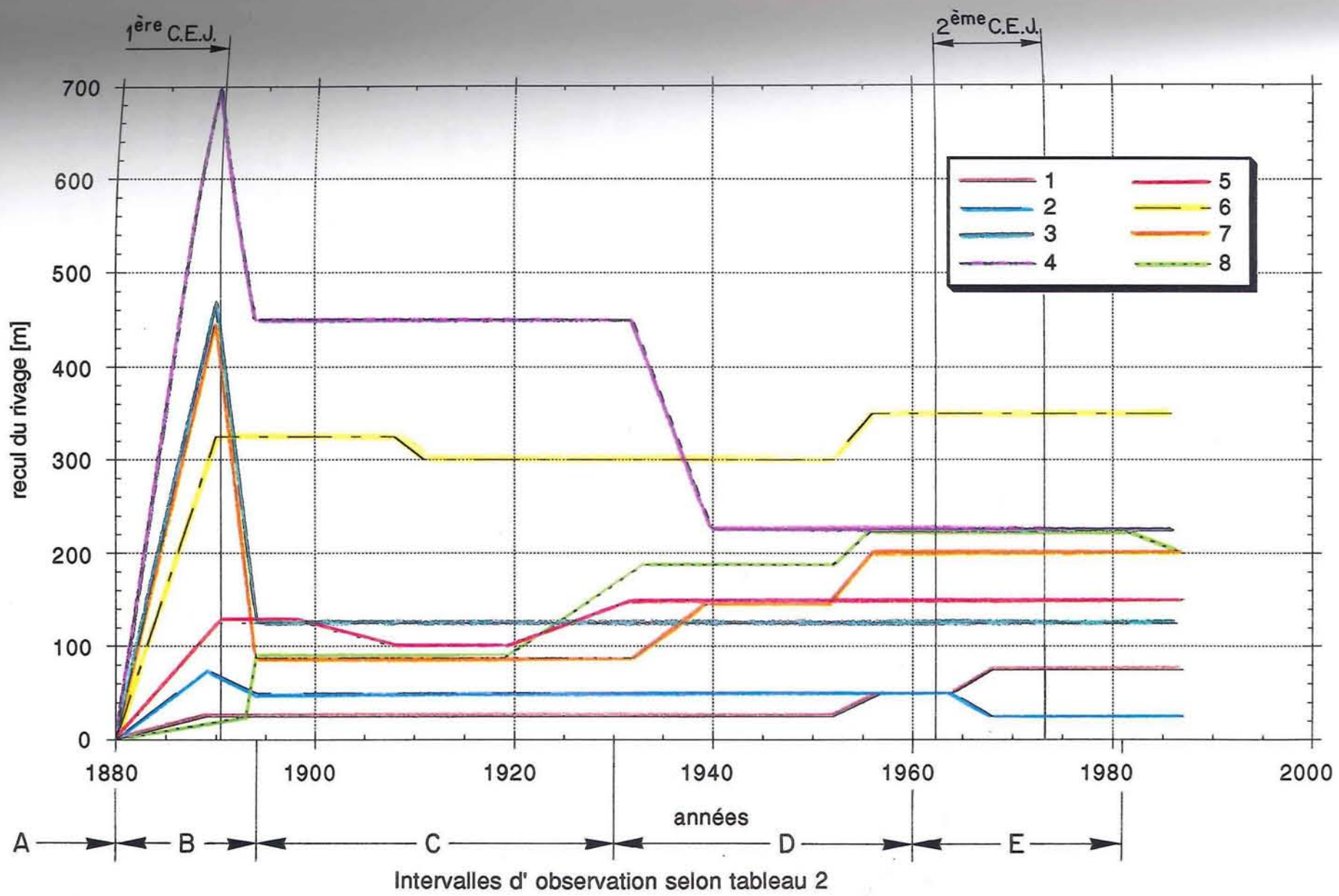


Figure 4: Recul du rivage, observé pendant la période allant de 1880 à 1987, dans 8 profils en travers, situés entre Autavaux et Cudrefin

Dans les diagrammes de la figure 4, un tronçon de courbe ascendant signifie une érosion de la rive tandis qu'un tronçon descendant correspond à un avancement de celle-ci vers le large, donc à un atterrissement.

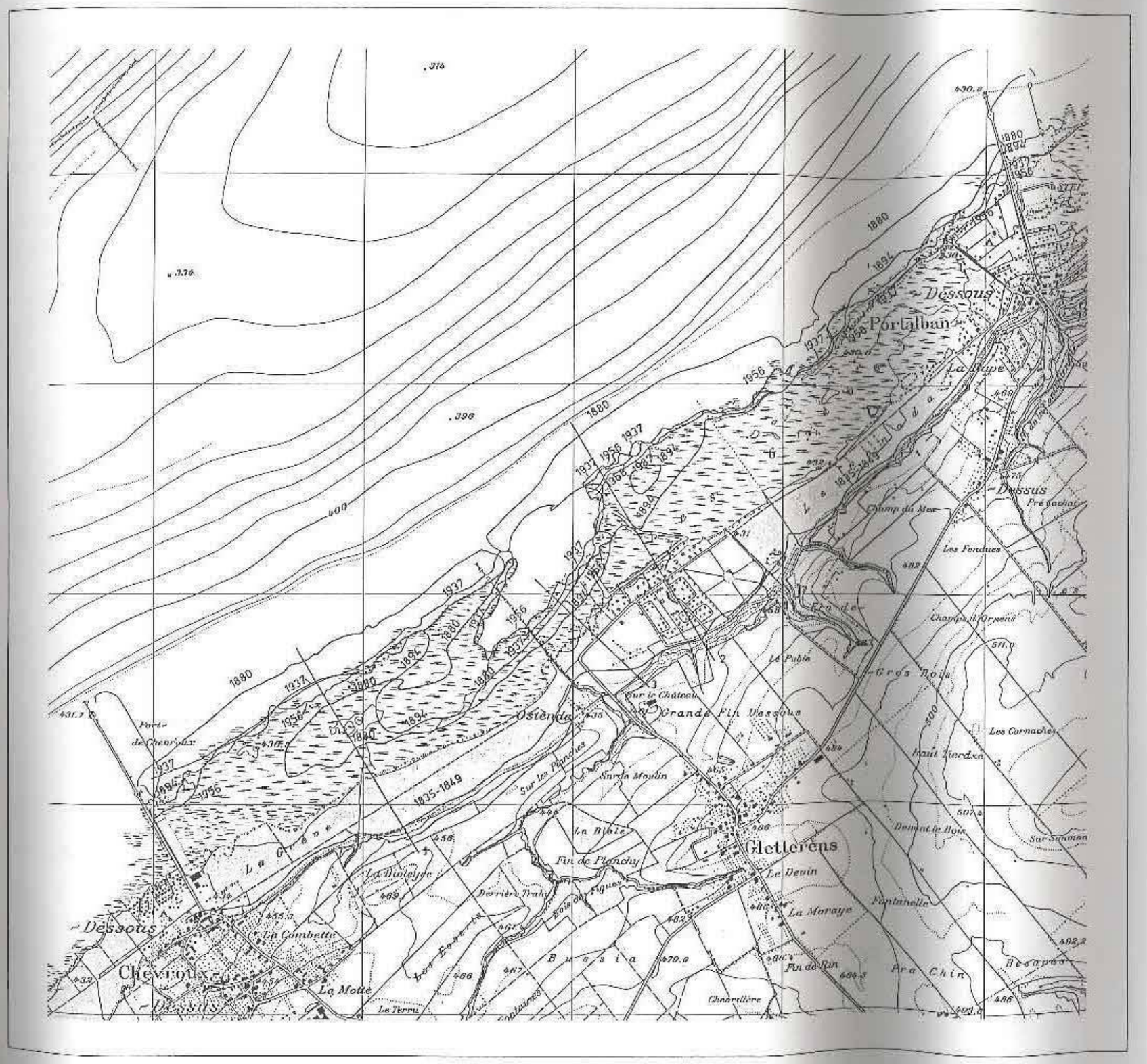
Comme déjà mentionné sous 3.1.2, les plus grandes modifications de la rive ont eu lieu entre 1880 et 1894. Les plus faibles modifications de la rive survenues au cours des 100 dernières années ont été observées à Forel, dans la zone caractérisée par la présence de molasse affleurante (profils 1 et 2). Les autres profils n'ont également subi que de petites variations pendant les décennies écoulées (les courbes sont quasi horizontales sur de larges intervalles de temps). Seul le profil 4, qui montre une forte érosion vers 1940, constitue une exception. Pour les raisons mentionnées sous 3.1.1, les profils de la figure 4 sont entachés d'imprécisions. Ils ne peuvent servir qu'à montrer la tendance, à long terme, de l'évolution de la rive.

3.3 Modifications de la rive survenues entre 1835 et 1987 dans le secteur de la commune de Gletterens.

Lors d'une étude datant de février 1991, le bureau d'ingénieurs Müller & Perrottet à Fribourg a examiné l'évolution de la rive du lac, plus particulièrement dans la Baie d'Ostende située sur la commune de Gletterens [3]. Les résultats obtenus ont été portés dans un plan à l'échelle 1:10'000, donné dans le présent rapport sous format réduit (échelle 1:20'000) à la figure 5.

L'étude en question est basée sur la position de la ligne de rive tirée des cartes topographiques des années 1835, 1849, 1880, 1894, 1937, 1956, 1968 et 1987. Il s'agit ainsi des mêmes cartes que celles utilisées pour examiner l'ensemble de la rive sud du lac (tableau 1).

De la figure 5, on constate en premier lieu que la ligne de rive s'est avancée, selon l'endroit considéré, d'environ 600 à 1100 m



COMMUNE DE
GLETTERENS

RAPPORT D'IMPACT
SUR L'ENVIRONNEMENT

EVOLUTION DES RIVES
DE 1835 A 1987

Echelle 1: 20'000

MÜLLER & PERROTTET
CH-1700 FRIBOURG
février 1991

LEGENDE

1880 Position de la rive, avec l' année

Figure 5:
Modifications de la rive à Gletterens.
Situation au 1:20'000

vers le large pendant la période allant de 1835 à 1880. Cet effet est essentiellement dû à l'abaissement du niveau du lac consécutif à la 1ère correction des eaux du Jura.

Jusqu'au prochain état relevé (1894), la ligne de rive située hors de la Baie d'Ostende a subi un retrait de 100 à 200 m vers les terres. A l'intérieur de celle-ci, ce retrait a atteint jusqu'à 250 m. Par contre, dans la partie sud-ouest de la Baie, on constate une progression de la rive, la superficie du plan d'eau ayant diminué d'environ 3 ha.

Jusqu'en 1937, l'extension des roselières a réduit considérablement les dimensions de la Baie, alors que les autres tronçons de rive ne se sont plus guère modifiés.

Entre 1937 et 1956, la rive a évolué de façon différente selon les endroits considérés. Dans la Baie, la surface des roselières a plutôt eu tendance à augmenter alors que les terres bordant le lac directement se sont retirées de 50 m et plus, ce qui représente une vitesse d'érosion de l'ordre de 2 m par année. A certains emplacements, il est pourtant possible de constater un avancement de la rive vers le lac.

L'évolution de la rive jusqu'à 1968, respectivement jusqu'à 1987, ne s'est manifestée que dans une zone restreinte à l'est de la Baie et paraît peu significative (figure 5).

En général, on remarque que la dynamique des processus morphologiques a baissé d'intensité depuis 1937 sur le tronçon considéré. L'étendue du plan d'eau dans la Baie est restée depuis pratiquement inchangée. La rive du lac proprement dite tend à se retirer sous l'effet de l'érosion, bien que localement des mouvements contraires soient aussi visibles.

3.4 Impressions générales

Le tronçon de rive situé entre Estavayer et l'embouchure de la Broye n'est pas soumis à une évolution uniforme. Il est en grande partie bordé de roselières lacustres, ce qui n'est pas le cas dans le Haut-Lac entre Yverdon et Estavayer où les roseaux poussant dans le lac n'existent que par secteurs. Les modifications survenues entre 1979 et 1987 dans les zones de roselières lacustres ont été évaluées par le GEG sur la base de photographies aériennes et cartographiées [4]. Des copies de ces cartes sont contenues dans l'annexe 2 (feuilles 2A à 2F) du présent rapport.

Sur le tronçon partiel La Corbière - Forel - Chevroux, le bilan des modifications récentes de la rive est équilibré. Pendant la période de 1956/57 à 1987, tant des zones à régression que d'autres à progression des roselières ont été observées (annexe 1E). Des constatations identiques découlent de la mise en valeur des photographies aériennes concernant le secteur C défini par le GEG (annexe 2). Particulièrement à Forel, où la molasse affleure, logiquement la rive s'est peu modifiée.

Les ceintures de roselières à Chevroux, et spécialement le long des grèves de Cudrefin, montrent une plus grande activité. Dans ces zones, les surfaces gagnées par la progression des roselières n'ont toutefois pas pu compenser celles perdues par la régression. Sur de grandes distances, le retrait des roselières lacustres a atteint plus de 50 m, ce qui correspond à une moyenne d'environ 4 m par an. Cependant on a pu constater, pendant la même période d'observation, que les conditions nécessaires à la croissance et à l'extension des roselières sont localement encore existantes.

Les causes de la régression des roselières sont peu claires. Intentionnellement, on a évité de parler ici d'érosion. En effet, il n'est pas encore certain que le transport des sédiments en eau peu profonde causé par les vagues soit la raison principale du dépérissement des roseaux. Des relevés de profils de rive, réalisés à différents stades de développement des roselières, n'étaient pas disponibles comme base de comparaison et d'appréciation. A l'aide du levé bathymétrique de la beine fait en 1992 et celle de mesures

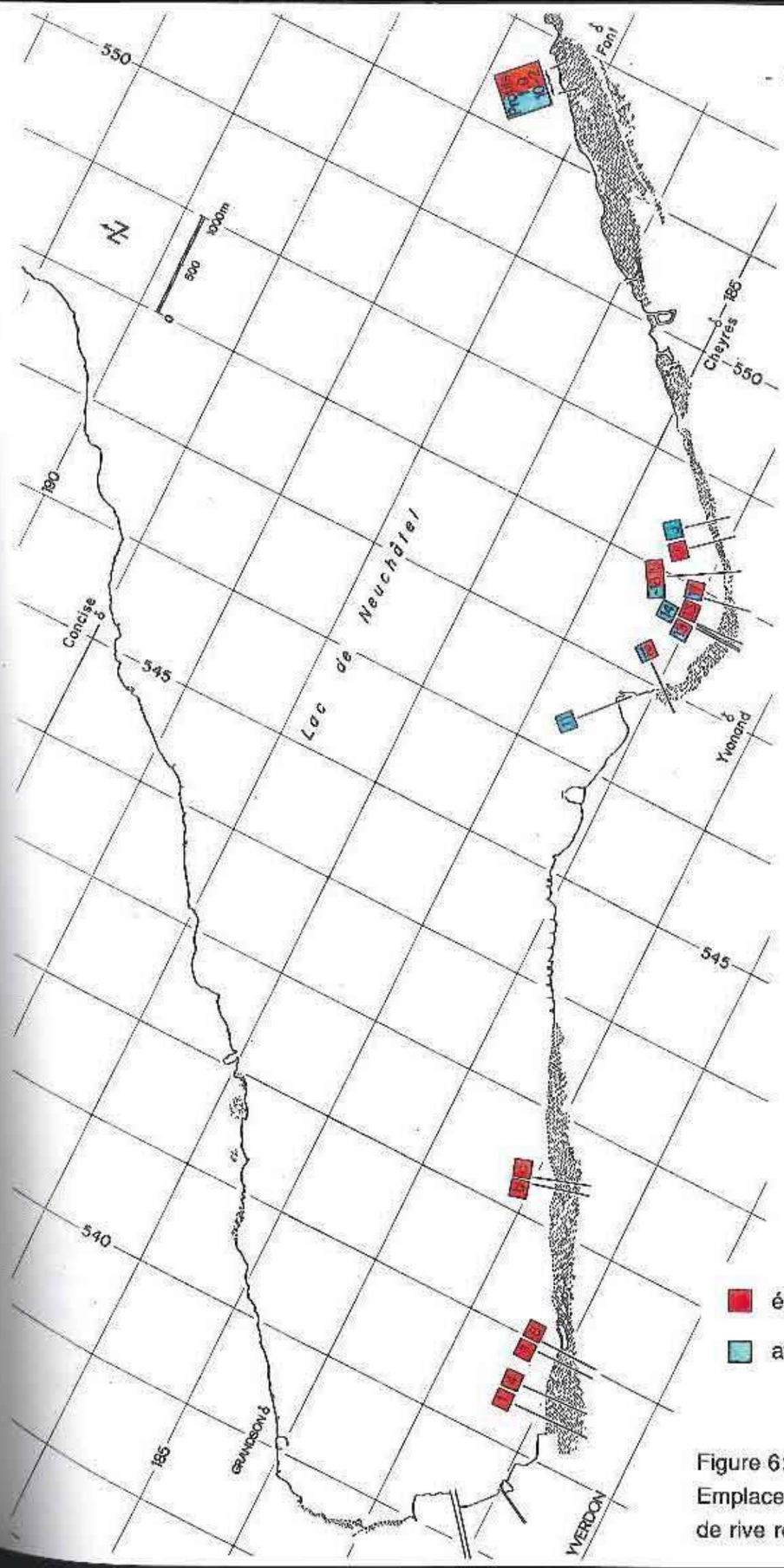


Figure 6:
Emplacements des profils de rive relevés

complémentaires ultérieures, il sera possible de donner une réponse plus précise aux questions encore en suspens.

4. Investigations complémentaires concernant le tronçon de rive Yverdon-Estavayer

4.1 Mise en valeur de nouveaux profils de rive

Au cours des années 1983 à 1989, le GEG a effectué de nouveaux relevés des rives naturelles à différents endroits, à savoir à Champ-Pittet, dans la baie d'Yvonand et à la hauteur de Font. Les emplacements des profils de rive choisis sont visibles dans la figure 6.

L'observation à long terme des profils de contrôle peut présenter des difficultés pour les raisons suivantes:

- la localisation de l'implantation des piquets de repérage des profils est rendue difficile par les conditions de visibilité souvent insuffisantes

- les piquets de repérage peuvent être disloqués et disparaître sous l'effet de l'érosion due aux vagues

- l'utilisation de 2 piquets par profil pour en mieux définir la direction serait nécessaire

- il n'est pas aisé de tenir une latte de mensuration dans l'eau, particulièrement en présence de vagues.

De ce fait, les relevés des profils n'ont été poursuivis que pendant peu d'années. Les résultats obtenus sont donnés dans les figures 7a, 7b, 7c. Ces diagrammes montrent le déplacement de la ligne de rive définie par le niveau moyen du lac (429.30 m s.m.) en fonction de la durée d'observation. Un déplacement vers les terres (érosion) est désigné dans la représentation par une valeur négative, tandis qu'un avancement de la rive vers le lac (atterrissement) est indiqué par une valeur positive.

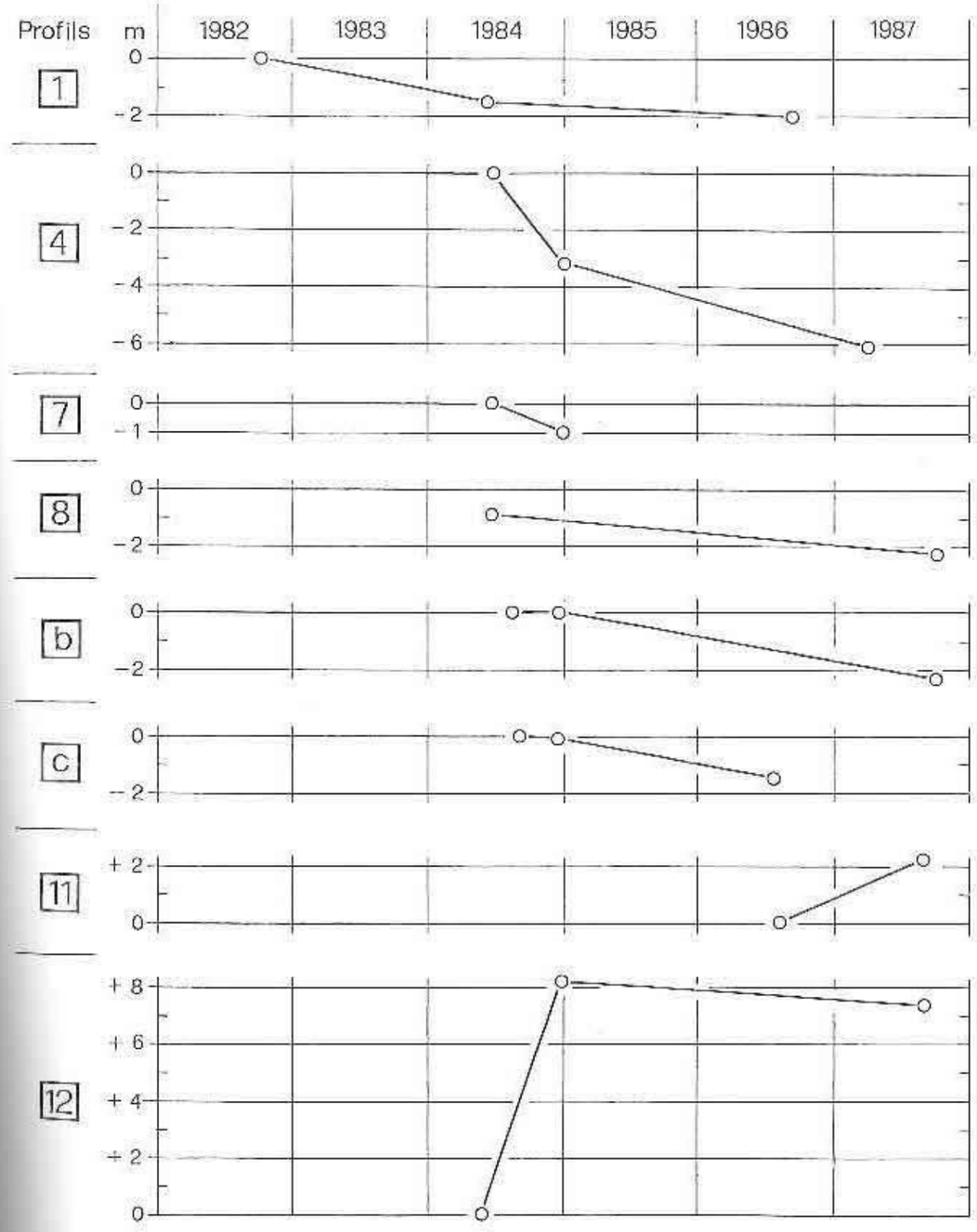


Figure 7a:
Déplacement de la ligne de rive en fonction du temps
(à niveau moyen du lac: 429,30 m s.m.)

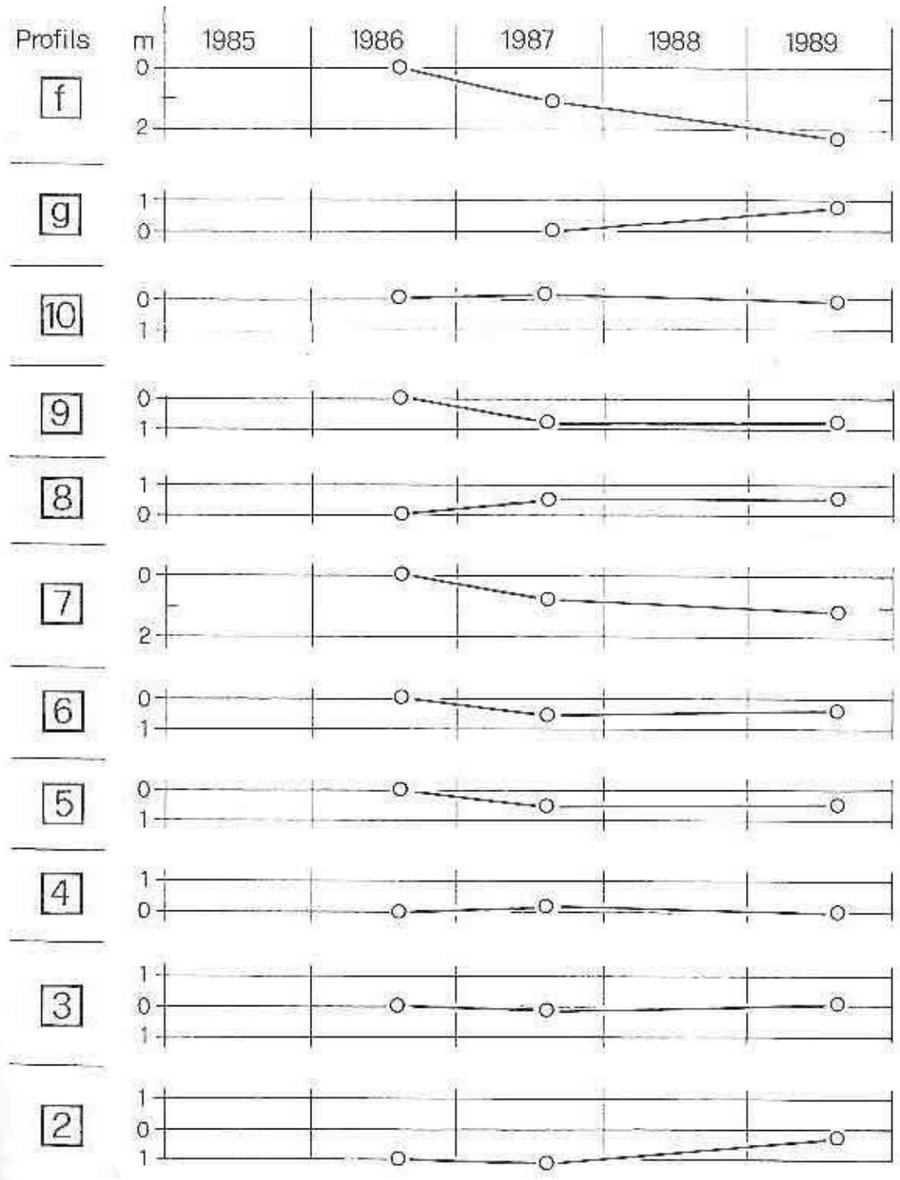


Figure 7b:
Déplacements de la ligne de rive en fonction du temps
(à niveau moyen du lac: 429,30 m s.m.)

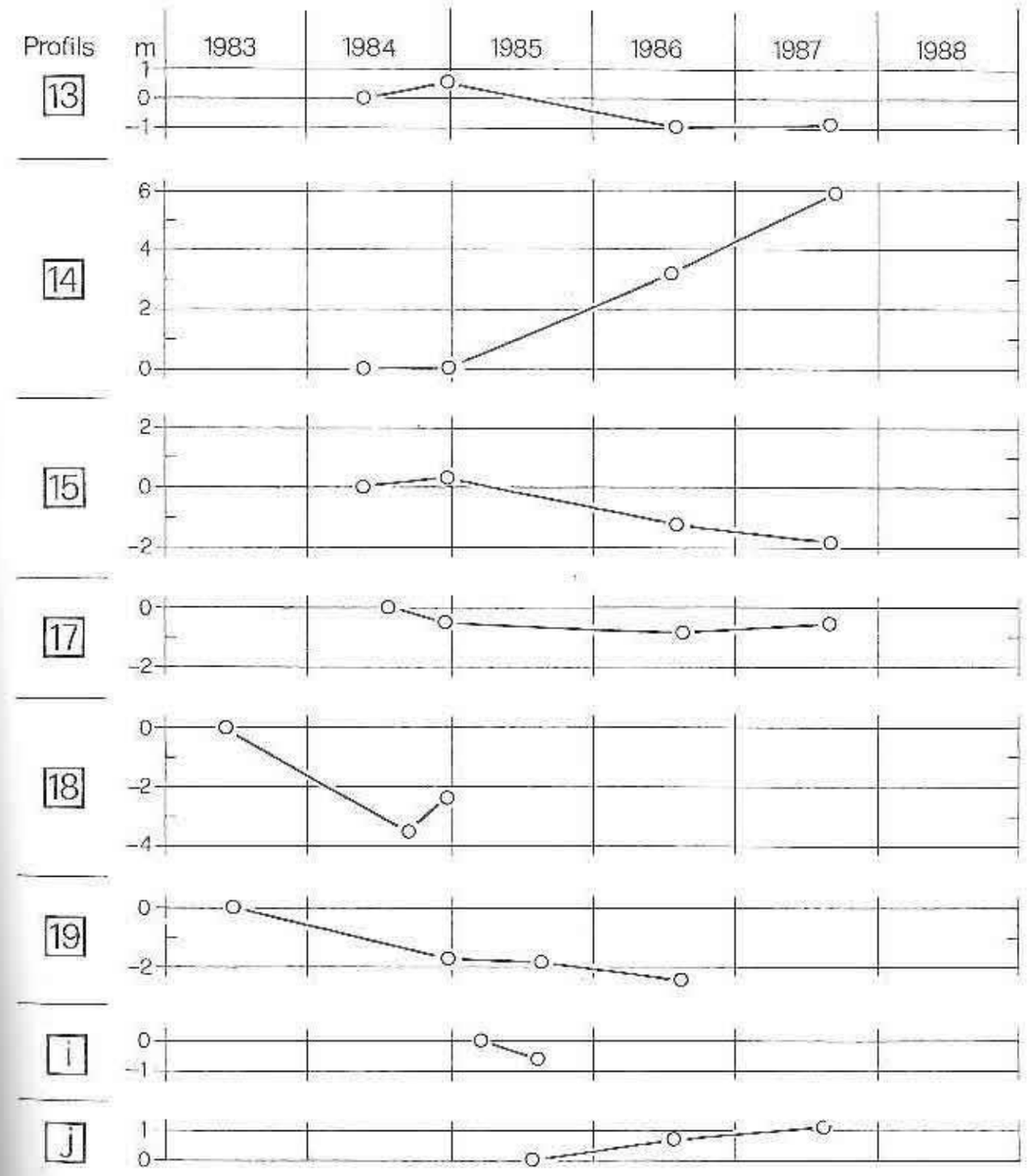


Figure 7c:
Déplacements de la ligne de rive en fonction du temps
(à niveau moyen du lac: 429,30 m s.m.)

La rive à Champ-Pittet est entièrement soumise à l'érosion (figure 7a, profils 1, 4, 7, 8, b, c). L'ampleur de cette érosion varie toutefois fortement, par exemple de 1 m en 3 ans (profil 8) à 6 m en 3 ans (profil 4).

Dans la baie d'Yvonand, où la Mentue se jette dans le lac, les constatations faites ne sont pas uniformes (figures 7a et 7b). Dans certains profils (12, 13, 15, 17, 18), érosion et atterrissement alternent en fonction du temps. D'autres profils ne sont soumis qu'à l'atterrissement pendant la période d'observation (profils 11, 14, j), respectivement qu'à l'érosion (profils 19, i). Les variations annuelles du déplacement de la ligne de rive peuvent être très différentes selon le profil considéré, par exemple:

profil 12: atterrissement de 8 m en 2 1/2 ans	ou	3.2	m/an
profil 14: atterrissement de 6 m en une demi-année	ou	12	m/an
profil 15: érosion de 2 m en 2 ans	ou	1	m/an
profil 19: érosion de 2 m en 1 1/2 année	ou	1.3	m/an

Les profils f, g, 2 à 10 de la figure 6, situés sur la rive devant Font, ont été implantés afin que l'efficacité d'une série d'ouvrages puisse être contrôlée.

Ce court tronçon de rive ne subit que de faibles modifications. En 3 ans, soit de 1986 à 1989, le déplacement de la ligne de rive en direction des terres ou respectivement du lac est inférieur à 1 m (figure 7c). Le profil f, avec une érosion de 2 m, constitue une exception. Au vu de la petite étendue de cette rive et du fait, par ailleurs, que les ouvrages mis en place ont été démolis, ces observations ne peuvent pas être considérées comme représentatives du secteur Cheyres-Font.

4.2 Comparaison des résultats avec ceux donnés dans le premier rapport partiel

Une comparaison n'est que partiellement possible, car la durée d'observation de l'évolution des profils de rive ne dépasse pas 4 ans pendant la période de 1982 à 1989, alors qu'elle s'étendait de 22 à

25 ans entre 1956/57 et 1979/86 en ce qui concerne les résultats présentés dans le premier rapport partiel no 956/1 de la VAW, annexe 2D.

Pourtant, une bonne concordance sur le plan qualitatif existe entre les relevés des profils et l'évolution des lignes de rive tirées de la carte nationale au 1:25'000:

- à Champ-Pittet, la rive est touchée par l'érosion due aux vagues
- dans la baie d'Yvonand, l'atterrissement prédomine, alors que de faibles érosions locales se produisent également
- le secteur Cheyres-Font montre le phénomène d'érosion de la manière la plus probante.

5. Image d'ensemble de l'érosion des rives

5.1 Longueurs des tronçons de rive ayant subi des modifications

Les longueurs des tronçons de rive ayant été touchés par des modifications peuvent être tirées des cartes indiquant les surfaces gagnées ou perdues sur le lac (annexes 2A à 2D, rapport 956/1 de la VAW, ainsi que les annexes 1A à 1E du présent rapport 956/2). Dans le tableau 4, ces longueurs sont présentées selon les 4, respectivement les 5 intervalles d'observation, selon les secteurs amont (Yverdon-Estavayer) ou aval (Estavayer-Broye) et selon l'état de la rive (érosion ou atterrissement) considérés. Les nombres exprimés en km indiquent la somme des longueurs des tronçons de rive s'étant modifiés dans les intervalles de temps respectifs, selon indications des représentations cartographiques sus-mentionnées. Des écarts par rapport à la situation réelle existent, car d'une part la date de parution des révisions des cartes topographiques est postérieure à celle de la réalisation des mesures in situ. D'autre part, le relevé de la ligne de rive n'a pas été refait systématiquement lors de chaque nouvelle révision.

Tableau 4: Longueurs des tronçons de rive soumis à l'érosion ou à l'atterrissement

Secteur de rive:	Yverdon - Estavayer			Estavayer - Broye		
Coordonnées:	540'000 - 555'000			555'000 - 570'000		
	Intervalle d'observation		km	Intervalle d'observation		km
Erosion :	1880	- 1894	19.87	1880	- 1894	29.18
	1894	- 1926/27/32	4.45	1894	- 1926/28/33	6.21
	1926/27/32	- 1957/61	6.22	1926/28/33	- 1956/57	12.02
	1957/61	- 1979/86	10.20	1956/57	- 1981	4.54
Atterrissement:				1835	- 1880	27.34
	1880	- 1894	3.49	1880	- 1894	0.93
	1894	- 1926/27/32	3.13	1894	- 1926/28/33	2.73
	1926/27/32	- 1957/61	4.19	1926/28/33	- 1956/57	8.81
	1957/61	- 1979/86	4.33	1956/57	- 1981	3.89

Dans l'intervalle d'observation allant de 1880 à 1894, c'est-à-dire peu après l'abaissement du niveau des lacs du Jura, pratiquement toute la rive a reculé vers les terres. La longueur totale de 49.05 km, soit 19.87 km + 29.18 km (tableau 4), comprend les baies et les avancées de la rive. Elle est supérieure à la longueur de 35 km, que la rive montre à vol d'oiseau. Les 3 périodes d'observation suivantes donnent des indications quelque peu fragmentaires, dues au manque d'informations plus détaillées des cartes nationales utilisées. Elles montrent cependant, que 20 à 40 % de la rive subissent l'effet marqué de processus dynamiques.

Les longueurs des tronçons de rive touchés par l'atterrissement sont essentiellement constituées par le pourtour de cuvettes ou de baies asséchées, qui se trouvaient autrefois en zone des eaux peu profondes et qui forment actuellement le marais. Au cours du temps, ces surfaces ont été recouvertes de roseaux et de laîches.

5.2 Modifications de la superficie des terres touchées

Ces modifications ont été déterminées par planimétrie des différences de superficie constatées entre deux stades

consécutifs. Les valeurs se rapportant aux intervalles d'observation respectifs sont indiquées en km² dans le tableau 5.

Ici également, les données présentent certaines imprécisions dues au fait que la date des relevés pour l'établissement des révisions des cartes topographiques n'est pas connue. De plus, chaque carte mise à jour ne montre guère les modifications survenues sur l'ensemble de la rive.

En examinant les annexes 2A à 2D du rapport 956/1, respectivement les annexes 1A à 1E de ce rapport 956/2, on remarque que la dynamique de la rive n'est pas la même dans chaque intervalle d'observation.

Tableau 5 Surfaces d'érosion et d'atterrissement

Secteur de rive:	Yverdon - Estavayer			Estavayer - Broye		
Coordonnées:	540'000 - 555'000			666'000 - 570'000		
	Intervalle d'observation		km²	Intervalle d'observation		km²
Erosion:	1880	- 1894	1.87	1880	- 1894	3.48
	1894	- 1926/32	0.14	1894	- 1928/33	0.22
	1926/32	- 1957/61	0.95	1928/33	- 1956/57	0.55
	1957/61	- 1979/86	0.31	1956/57	- 1981	0.14
Atterrissement:				1835	- 1880	11.12
	1880	- 1894	0.08	1880	- 1894	0.42
	1894	- 1926/32	0.15	1894	- 1928/33	0.10
	1926/32	- 1957/61	0.41	1928/33	- 1956/57	0.88
	1957/61	- 1979/86	0.15	1956/57	- 1981	0.21
Différence:				1835	- 1880	11.12
	1880	- 1894	–1.79	1880	- 1894	–3.06
	1894	- 1926/32	0.01	1894	- 1928/33	–0.12
	1926/32	- 1957/61	–0.54	1928/33	- 1956/57	0.33
	1957/61	- 1979/86	–0.16	1956/57	- 1981	0.08

Pour la période de 1835 à 1880, seul le secteur de rive Estavayer-Broye peut être analysé à partir des cartes (annexe 1A de ce rapport). L'ampleur de l'atterrissement provoqué par la première correction des eaux de Jura s'élève dans ce secteur à 11.12 km².

Les plus grandes modifications de la rive sont survenues entre 1880 et 1894, soit dans la période située immédiatement après l'abaissement du lac. Pendant ces 15 années, le lac a repris 5.35 km^2 (1.87 km^2 + 3.48 km^2) à la zone riveraine. Il y a deux explications à ce phénomène de forte érosion:

1) un processus de tassement, au cours duquel le terrain nouvellement exondé peut s'abaisser de plusieurs décimètres, a été déclenché par la mise à sec lors de la 1ère CEJ. Le Grand Marais est un exemple connu d'abaissement des terres. L'assèchement du sol saturé d'eau et constitué de sable fin conduit à une réduction de volume. Il en résulte les tassements constatés.
2) le sol exondé n'étant pas encore recouvert de végétation, le matériau fin a été facilement emporté par les vagues.

Dans la période allant de 1894 à 1926/32, respectivement à 1928/33, seules des modifications relativement faibles de la superficie des terres ont été observées (tableau 5, annexe 2B du rapport 956/1 et annexe 1C du rapport 956/2). L'érosion et l'atterrissement sont approximativement du même ordre de grandeur. Les rives typiquement soumises à l'érosion dans le secteur du Haut-Lac se trouvent devant Champ-Pittet, à l'ouest d'Yvonand où la rive est aujourd'hui renforcée par des épis, et à l'est d'Yvonand. Dans le secteur du Bas-Lac, une érosion marquée a frappé la rive devant Chevroux et à l'est de Cudrefin.

Quant à l'atterrissement, il se manifeste dans les baies protégées des vagues et dans les étangs du marais (à Font et près de Gletterens).

Entre 1926/32, respectivement 1928/33 et 1957/61, respectivement 1956/57, l'érosion s'est avérée nettement supérieure à l'atterrissement ainsi qu'à celle survenue pendant la précédente période d'observation (tableau 5, annexe 2C du rapport 956/1 et annexe 1D du rapport 956/2). Cet accroissement de la dynamique de la rive est peut-être explicable par le fait que l'évolution récente

de cette dernière a été estimée à partir des éditions de la nouvelle carte nationale. Paraissant depuis le milieu des années cinquante, ces éditions tiennent à jour les modifications de la rive d'une manière vraisemblablement plus approfondie que l'Atlas Siegfried utilisé auparavant. Entre Yverdon et Estavayer, la ligne de rive a été, sauf à de rares endroits, fortement repoussée en direction des terres. Des atterrissements ne se sont formés qu'à l'intérieur du marais vers Champ-Pittet et dans la zone de l'embouchure de la Mentue. Sur ce tronçon, l'érosion excède l'atterrissement d'environ 0.54 km^2.

Pendant cette période, la dynamique de la rive s'est également accrue dans le secteur du Bas-Lac jusqu'à la Broye. Alors que les zones d'érosion sont réparties le long de toute la rive sous la forme d'étroites bandes, les atterrissements sont concentrés sur les baies protégées des vagues et sur les pièces d'eau situées à l'intérieur du marais. Dans ce secteur, la superficie de l'atterrissement dépasse de 0.33 km^2 celle de l'érosion. Cependant, il faut souligner que, du point de vue biologique, les nouvelles terres formées ne sont pas forcément un remplacement de celles reconquises par le lac sous l'effet de l'érosion. Plus de roselières lacustres ont probablement disparu à cette époque, qu'il ne s'en est implanté de nouvelles à d'autres endroits.

La dernière période d'observation allant de 1957/61 à 1979/86 montre que l'érosion de la rive sud a poursuivi sa progression dans la partie antérieure du lac. Cette tendance est semblable à celle observée pendant la période précédente, mais elle est toutefois moins prononcée. Entre Yverdon et Yvonand, pratiquement toute la rive est menacée par l'érosion (annexe 2D du rapport 956/1). Seules la baie devant Champ-Pittet s'est refermée et la ligne de rive près de l'embouchure de la Mentue s'est déplacée vers le lac. Entre Yvonand et Estavayer, les modifications de la rive sont moins marquées. Là, l'érosion et l'atterrissement alternent par grands secteurs.

Dans le secteur Estavayer-Broye et pour la période de 1956/57 à 1987, l'analyse des cartes a montré uniquement des modifications

locales de la rive, avec une prédominance de l'atterrissement (tableau 5, annexe 1E du rapport 956/2). L'érosion est nettement plus faible sur ce tronçon que dans la partie antérieure du lac.

6. Synthèse et appréciation finale de l'érosion de la rive sud du lac de Neuchâtel

Les résultats de l'analyse des cartes topographiques, bien qu'entachés de certaines imprécisions, ont permis de faire des constatations en ce qui concerne les modifications morphologiques de la rive sud du lac de Neuchâtel. Les conditions rencontrées sur le tronçon de rive situé entre Yverdon et Estavayer (discutées dans le rapport 956/1 de la VAW) se différencient de celles concernant le tronçon inférieur allant d'Estavayer à la Broye, de telle sorte que leur description est donnée séparément ci-après.

6.1 Tronçon de rive Yverdon-Estavayer

Depuis 1880, une surface de roselières et de marais atteignant 3.27 km^2 a été regagnée par le lac, sous l'action de l'érosion due aux vagues et peut-être aussi sous celle de tassements du sol. Pendant la même durée, un atterrissement de 0.79 km^2 s'est produit. Le bilan des terres ayant disparu s'élève ainsi à 2.48 km^2. Rapporté à la longueur de la rive, soit 16 km, le retrait moyen annuel de cette dernière est d'environ 1.6 m.

Les courants de retour induits par les vagues et qui provoquent le transport du sédiment vers le large, de même que les courants longitudinaux parallèles à la rive, participent à l'érosion constatée. Les atterrissements, quant à eux, sont plutôt liés à la croissance de la végétation: des pièces d'eau à l'intérieur du marais, des baies formant la rive mais situées à l'abri des vagues ont été peu à peu recouvertes par les roseaux puis par les laîches. La zone située à l'embouchure de la Mentue, où la dynamique de la rive est différente, constitue une exception. L'apport de sédiments par la

rivière et la forme de la baie favorisent à cet endroit un atterrissement continu.

Aucune roselière lacustre n'existe plus actuellement entre Yverdon et Yvonand. Une exception est constituée par la baie d'Yvonand, où la roselière est continue sur quelque 700 m. Dans le prolongement de la rive vers Estavayer, seules quelques petites surfaces de roseaux sont encore visibles.

Les tronçons de rive subissant l'érosion se trouvent de toute évidence à des endroits exposés, directement touchés par les vagues dues à la bise. L'ampleur de l'érosion ne présente pas de différences marquantes le long de la rive concernée. Ceci s'explique par le fait que les fortes vagues déferlent sur la beine. Lors de ce processus de transformation énergétique, l'énergie des vagues, et par conséquent leur hauteur, est réduite à une certaine valeur. Ainsi le long de la rive, les vagues ne montrent pas de différences de hauteur significatives et le taux d'érosion d'un endroit à l'autre conserve le même ordre de grandeur.

Dans les années septante, un tronçon de rive situé à l'ouest d'Yvonand, a été protégé par 12 épis et par des blocs sur une longueur d'environ 1.5 km. Depuis lors, la ligne de rive ne s'est plus modifiée de manière sensible.

Ces constatations montrent que si l'on n'entreprend rien, l'érosion se poursuivra inexorablement jusqu'à la falaise ou à un ouvrage protégé (route, voie ferrée).

6.2 Tronçon de rive Estavayer-Broye

La surface des terres érodées depuis 1880 est de 4.39 km^2, tandis que l'atterrissement atteint 1.61 km^2. La différence de 2.78 km^2 représente la perte de terrain enregistrée au cours de la centaine d'années d'observation. Sur l'ensemble du tronçon de rive, d'une longueur de 20 km, l'érosion s'élève en moyenne à 1.4 m par

année. La plus grande partie de cette érosion s'est toutefois produite avant 1894.

Jusqu'à 1928/33, l'érosion a été prédominante. Par la suite, un atterrissement a pu être observé sur différentes parties de ce tronçon de rive (Baie d'Ostende, rive à l'ouest de Champmartin, zone à l'embouchure de la Broye). De même, à ces endroits la ceinture de roselières s'est étendue. Actuellement, la rive est relativement stable où la molasse affleure (installations militaires près de Forel). Des zones restreintes d'érosion se répartissent depuis ces dernières années sur l'ensemble de la rive, d'Estavayer à la Broye. Même si des dégâts sont visibles localement, on ne peut parler aujourd'hui d'une tendance généralisée à l'érosion sur ce tronçon.

Les roselières lacustres recensées (annexes 2D à 2F de ce rapport) n'ont pas seulement régressé entre 1979 et 1987; elles ont également progressé à certains emplacements. Ce comportement vient confirmer les constatations faites plus haut.

Les observations montrent que cette rive est devenue relativement stable au cours de la récente période. Visiblement, l'atteinte portée à la rive dans le Bas-Lac sous l'effet du vent d'ouest est d'une importance inférieure à celle causée par la bise dans le Haut-Lac.

Deux remarques peuvent être faites au sujet du tronçon de rive Estavayer-Broye:

- aux emplacements où les roselières lacustres ont pu progresser, les courants induits par les vagues ne sont apparemment pas en mesure d'éroder la couche supérieure constituant le fond du lac. Il est probable que les rhizomes et leur entrelacement peuvent se former, se régénérer et retenir le sable fin avoisinant, avant que l'érosion due aux vagues n'agisse.

- Au cours de longues périodes, de l'ordre de plusieurs décennies, les zones de progression et de régression des

roselières alternent localement, sans que l'ampleur totale de ces dernières soit fortement influencée. On pourrait parler ici d'un équilibre à long terme de la dynamique de la rive. Sans doute, cette dynamique est aussi liée à des facteurs biologiques, dont la prise en considération dépasse toutefois le cadre de la présente étude.

6.3 Aspects typiques des tronçons de rive Yverdon-Estavayer et Estavayer-Broye

Même si l'érosion due aux vagues se manifeste le long de toute la rive sud du lac de Neuchâtel, il est globalement possible de distinguer un type de rive caractéristique pour chaque tronçon.

Le type de rive fortement érodée se rencontre principalement sur le tronçon Yverdon-Estavayer. Celui-ci est caractérisé par une bordure ou frange d'érosion pratiquement rectiligne. Les roselières lacustres manquent totalement. La végétation de rive est rare.

Sur le tronçon Estavayer-Broye, on remarque un type de rive généralement plus différenciée, soumise à une érosion se développant plus lentement. La ligne de rive, plus sinueuse, présente des anses et des avancées dans le lac. Des roselières lacustres plus ou moins stables créent des zones de végétation importantes longeant la rive.

Contrairement au tronçon du Haut-Lac, le tronçon Estavayer-Broye montre une relative stabilité de sa rive.

6.4 Configuration de la beine, mouvement des vagues et transport de sédiment

Les caractéristiques suivantes de la beine peuvent être tirées de la représentation bathymétrique au 1:5000 [5]:

- largeur de la beine, formant terrasse, entre le mont (cassure de pente, à env. 427 m s.m.) et la rive:

entre 100 m et 500 m dans la partie antérieure du lac; entre 100 m et 1000 m (Autavaux) au nord d'Estavayer. Dans la baie d'Yvonand et devant Estavayer, la beine n'est que peu prononcée et le fond du lac s'incline régulièrement dès la rive.

- la berge, à l'emplacement de la transition entre terre ferme et lac, présente une forte pente de talus. Cette forme typique est due à l'effet des vagues déferlantes. A quelques mètres de la rive, à la cote 428 m s.m. environ, le fond du lac est prolongé par la beine peu inclinée.

- le fond du lac sur la beine est ainsi situé entre les cotes 427.0 m s.m. et 428.0 m s.m. Les profondeurs d'eau au niveau moyen du lac, avec cote à 429.30 m s.m., s'étendent alors entre 1.3 m et 2.3 m (+ 0.6 m aux hautes eaux, - 0.4 m aux basses eaux).

Les observations et la théorie des vagues montrent que les courants induits par des vagues se manifestent sur le fond du lac, dès que la longueur d'onde de celles-ci est supérieure au double de la profondeur d'eau. Pour la beine considérée, de petites vagues de 2 m à 6 m de longueur d'onde sont donc déjà suffisantes pour créer des courants atteignant le fond. Ces courants mettent le sable fin en mouvement, comme en témoigne la formation des rides caractéristiques (photo 17).

Le fond, sur la beine, se trouve dans un état d'équilibre. En cas de vagues, le sable fin est mis en mouvement, mais cependant la profondeur d'eau ne montre qu'un très petit domaine de variation. Le matériau, transporté vers le large par les courants de retour, respectivement le long de la rive par les courants de déferlement, provient essentiellement de la rive. Il ne se dépose que lorsqu'il a atteint le mont et des profondeurs plus grandes du lac, où la force tractrice des courants engendrés par les vagues n'agissent plus jusque sur le fond. La beine se trouve dans un équilibre dynamique. Si le fond était situé plus bas, il faudrait alors s'attendre à la formation de dépôts et ainsi à une diminution de la profondeur d'eau jusqu'à ce que les forces tractrices aient atteint la valeur

critique à partir de laquelle le sédiment est mis en mouvement. Si au contraire, le fond sur la beine était plus haut, les courants dus aux vagues seraient trop intensifs et une érosion jusqu'au niveau actuel aurait lieu. Les modifications topographiques consécutives à ce processus morphologique se concentrent ainsi principalement le long de la rive (érosion) et sur le mont (dépôts).

Une analogie avec l'état d'équilibre sus-décrit peut être trouvée dans le comportement des cours d'eau. Dans sa partie supérieure habituellement escarpée, une rivière est en état d'érosion. Elle transporte généralement le matériau prélevé jusqu'à un lac, où il se dépose en formant un delta. Sur le tronçon intermédiaire, les forces tractrices et les forces de frottement (ralentissement) sont pratiquement en équilibre. De ce fait, les cotes du lit de la rivière ne varient que peu.

6.5 Observation future des rives

Les cartes topographiques utilisées pour déterminer l'érosion de la rive ne constituent qu'un moyen global d'appréciation. L'échelle 1:25'000 ne permet pas d'observer avec plus de précision les modifications que subit cette dernière dans des intervalles de courte durée. Les dates des relevés ne sont pas connues et ne coïncident pas avec celles de la publication des cartes révisées. Le tracé de la rive est difficile à définir. Son évolution ne peut être estimée qu'à partir de relevés réalisés à des intervalles de temps irréguliers et dont les dates exactes ne sont pas indiquées.

Le levé bathymétrique de la rive sud du lac de Neuchâtel, effectué en 1992 par le bureau P. Martin à Thierrens (11 cartes au 1:5'000), constitue une base précieuse qui va permettre de suivre efficacement les modifications ultérieures de la morphologie des rives. Dans le futur, ce moyen performant d'investigation, engagé systématiquement et régulièrement pour contrôler le développement de la rive, doit être recommandé.

6.6 Mesures recommandées pour la protection des rives

Cette étude a montré, qu'au cours des 100 dernières années, la rive sud du lac de Neuchâtel a évolué de façon différente selon la période et l'endroit considérés. Il n'est pas partout possible d'apprécier visuellement l'ampleur effective de l'érosion. Les plus grands taux d'érosion constatés ne concernent pas forcément les tronçons de rive où de nombreux arbres et des buissons ont basculé dans le lac. Une bordure de roseaux peut être détruite plus rapidement et d'une manière plus discrète.

Le recul de la rive est le plus important dans le secteur du Haut-Lac, entre Yverdon et Estavayer, où les vagues dues à la bise prédominent. Les roselières lacustres ont pratiquement disparu dans cette zone.

Sur le tronçon situé entre Estavayer et l'embouchure de la Broye, les modifications de la rive sont moins prononcées mais aussi moins clairement définies: des secteurs touchés par l'érosion alternent avec des zones d'atterrissement, où les roselières ont pu progresser. Les vagues engendrées par le vent d'ouest sont là principalement responsables de ces changements morphologiques.

L'érosion actuellement constatée de la rive sud du lac de Neuchâtel nécessite néanmoins la prise de mesures constructives de protection, afin que de nouvelles surfaces de la Grande Cariçaie ne disparaissent progressivement dans le lac. Il semble indiqué, et c'est la proposition faite ici, de combattre en premier lieu l'érosion où celle-ci est la plus active. Au vu du phénomène observé, il paraît plus justifié de protéger les endroits particulièrement touchés plutôt que d'agir préventivement dans des secteurs moins menacés.

Il paraît également judicieux de commencer la lutte contre l'érosion due aux vagues par un projet-pilote. Des informations complémentaires sur ce lac particulier, caractérisé par sa beine de sable fin, pourront ainsi être recueillies.

Afin que les moyens financiers limités puissent être engagés de manière optimale et que des bases solides de décision soient créées, il est nécessaire qu'à l'avenir les différents tronçons de rive soient observés et relevés avec la plus grande précision possible. En particulier, les observations devraient s'étendre aussi aux tronçons de rive paraissant être en état d'équilibre dynamique. Afin d'avoir un aperçu des modifications en cours de la rive qui permette la prise de mesures constructives appropriées, il serait nécessaire d'établir, à bref délai, un programme fixant la nature et le déroulement systématique des observations requises de la rive.

Zurich, le 25 octobre 1993/Ra/Hub

Laboratoire de recherches hydrauliques,
hydrologiques et glaciologiques de l'EPF Zurich

Pour la direction

A. Chervet
ing.dipl.EPFZ

Le chef du groupe
Hydraulique de l'environnement

Dr. A. Huber
ing.dipl.EPFZ

Adaptation du rapport en langue française:

Dr. F. Raemy, ing.dipl.EPFZ

Sources

[1] Carte géologique de la Suise 1:500'000,
Schweizerische Geologische Kommission 1980

[2] Etude complémentaire pour l'extraction de sables du lac de Neuchâtel à Estavayer-le-Lac, février 1989, mandatée par Siporex, Tuileries zurichoises
Réalisation: Bureau Zurwerra/ABA-Geol/Aquarius

[3] Commune de Gletterens, Evolution des rives de 1835 à 1987, Rapport d'impact sur l'environnement, annexe A, 1:10'000, Müller & Perrottet, Fribourg, 1991

[4] Cartographie des roselières lacustres de la rive sud du lac de Neuchâtel et de leur évolution entre 1979 et 1987. Plans du GEG, no. 2.1.13 (1:25'000) et no. 2.1.9, 2.1.10 (1:5'000), 1991

[5] Carte bathymétrique de la rive sud du lac de Neuchâtel,
11 feuilles 1:5'000, Bureau Pierre Martin SA, Thierrens 1993

Annexes 1A1 -1E2: Modification de la superficie des terres et du lac entre Estavayer et la Broye

1A1, 1A2:	1835	-	1880 [1]
1B1, 1B2:	1880	-	1894 [2]
1C1. 1C2:	1894	-	1928/33 [2]
1D1, 1D2:	1928/33	-	1956/57 [2]
1E1, 1E2:	1956/57	-	1987 [2]

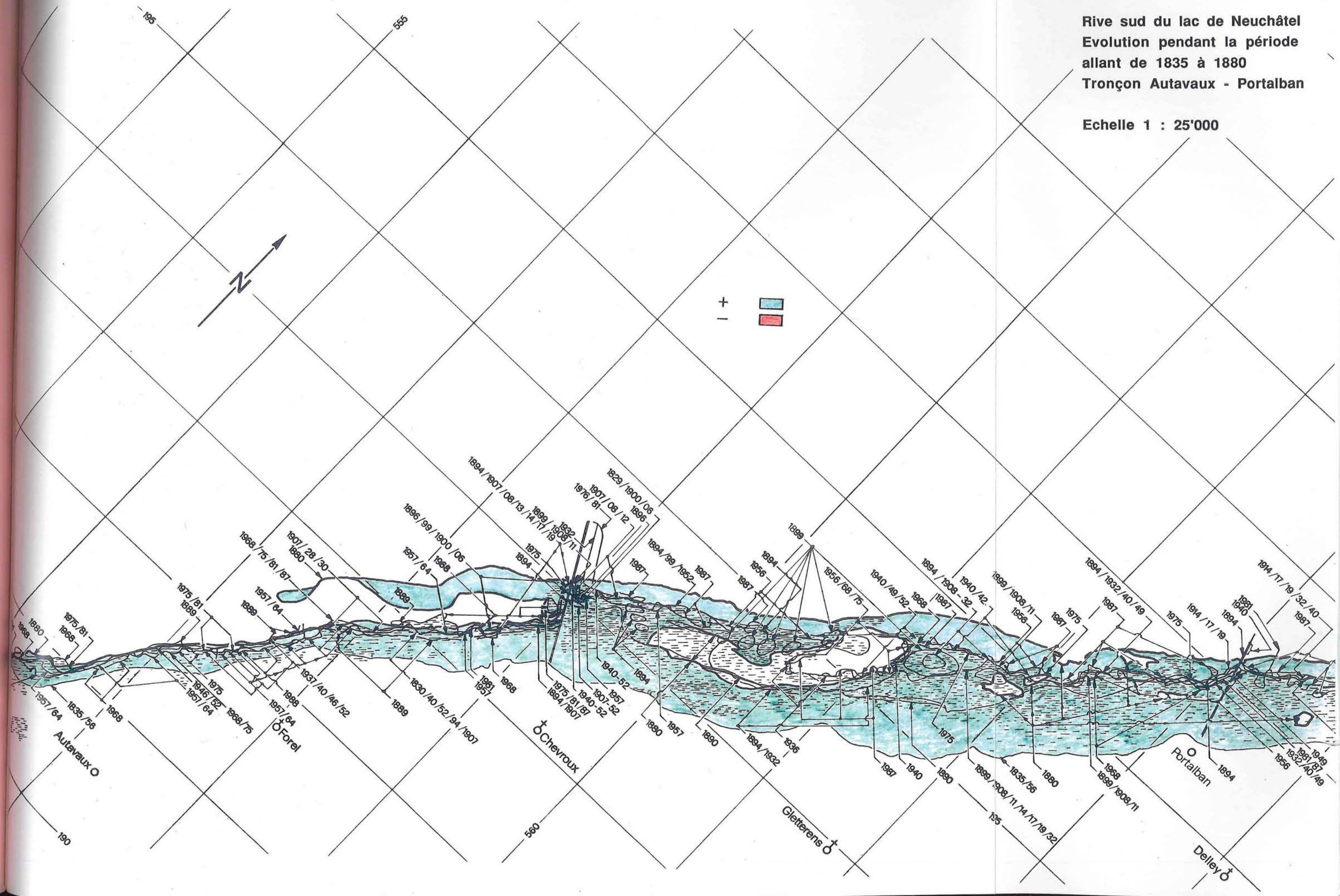
---

1) Relevés effectués avant la 1ère CEJ

2) Relevés effectués après la 1 ère CEJ

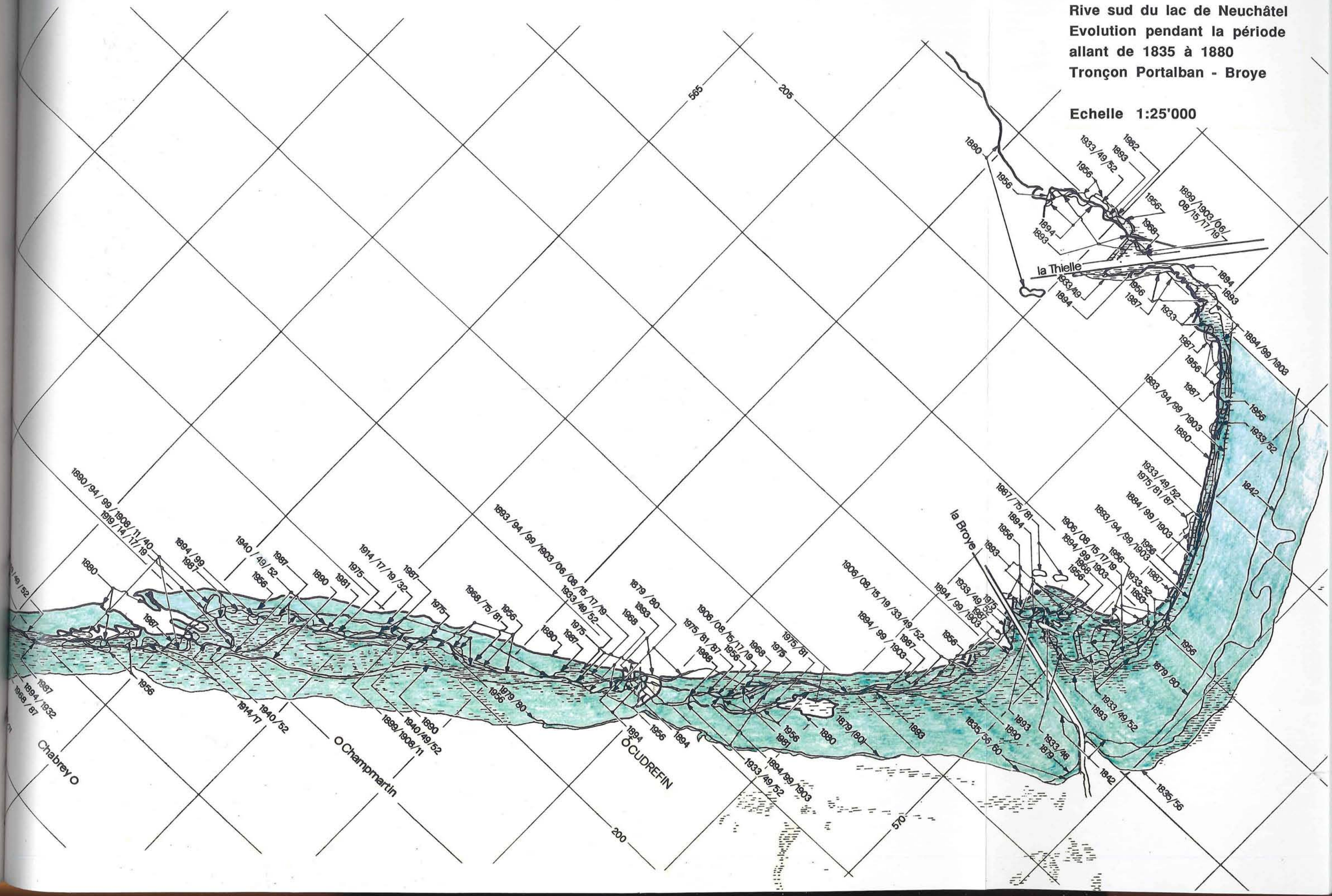
Rive sud du lac de Neuchâtel
Evolution pendant la période allant de 1835 à 1880
Tronçon Autavaux - Portalban

Echelle 1 : 25'000



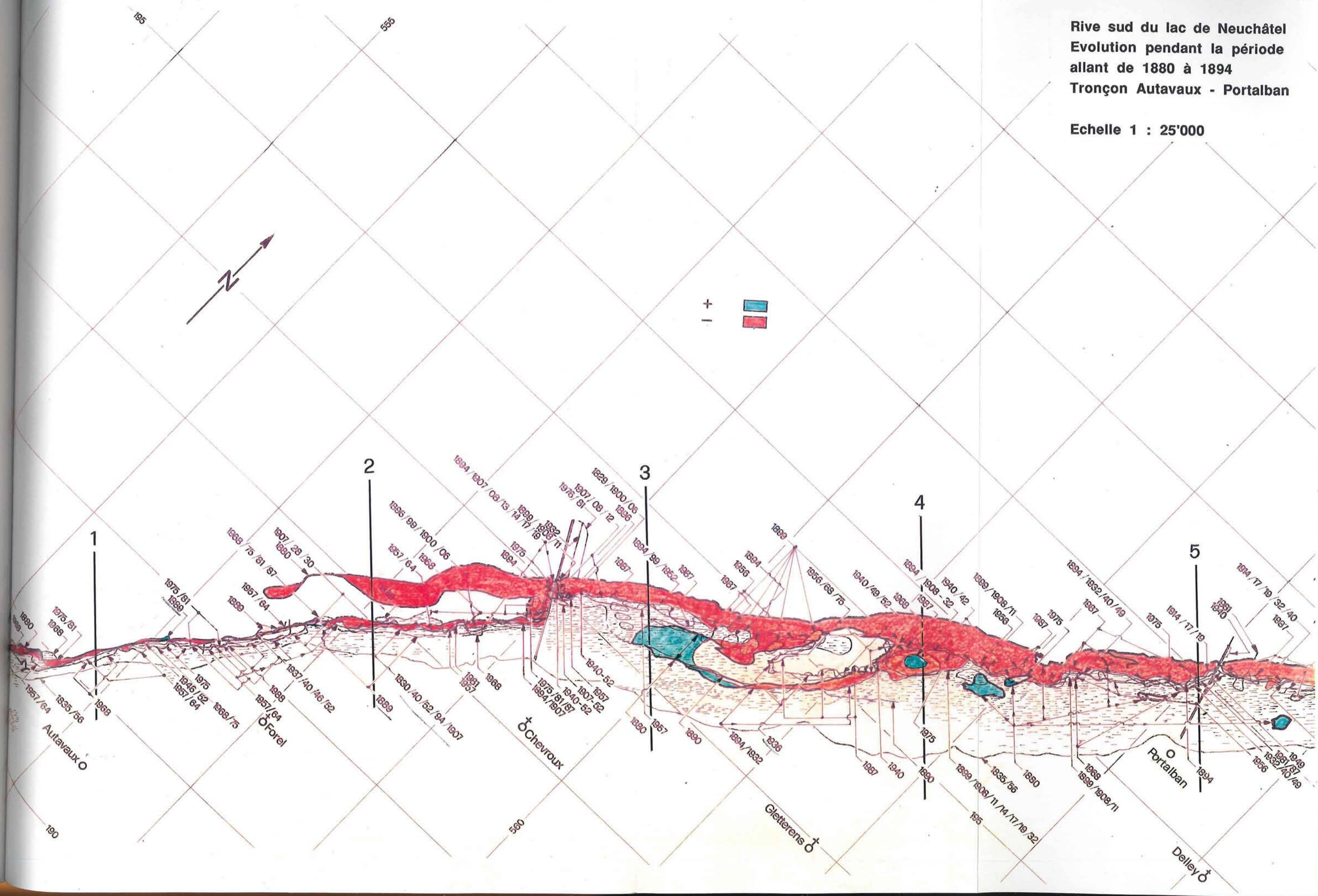
Rive sud du lac de Neuchâtel
Evolution pendant la période allant de 1835 à 1880
Tronçon Portalban - Broye

Echelle 1:25'000



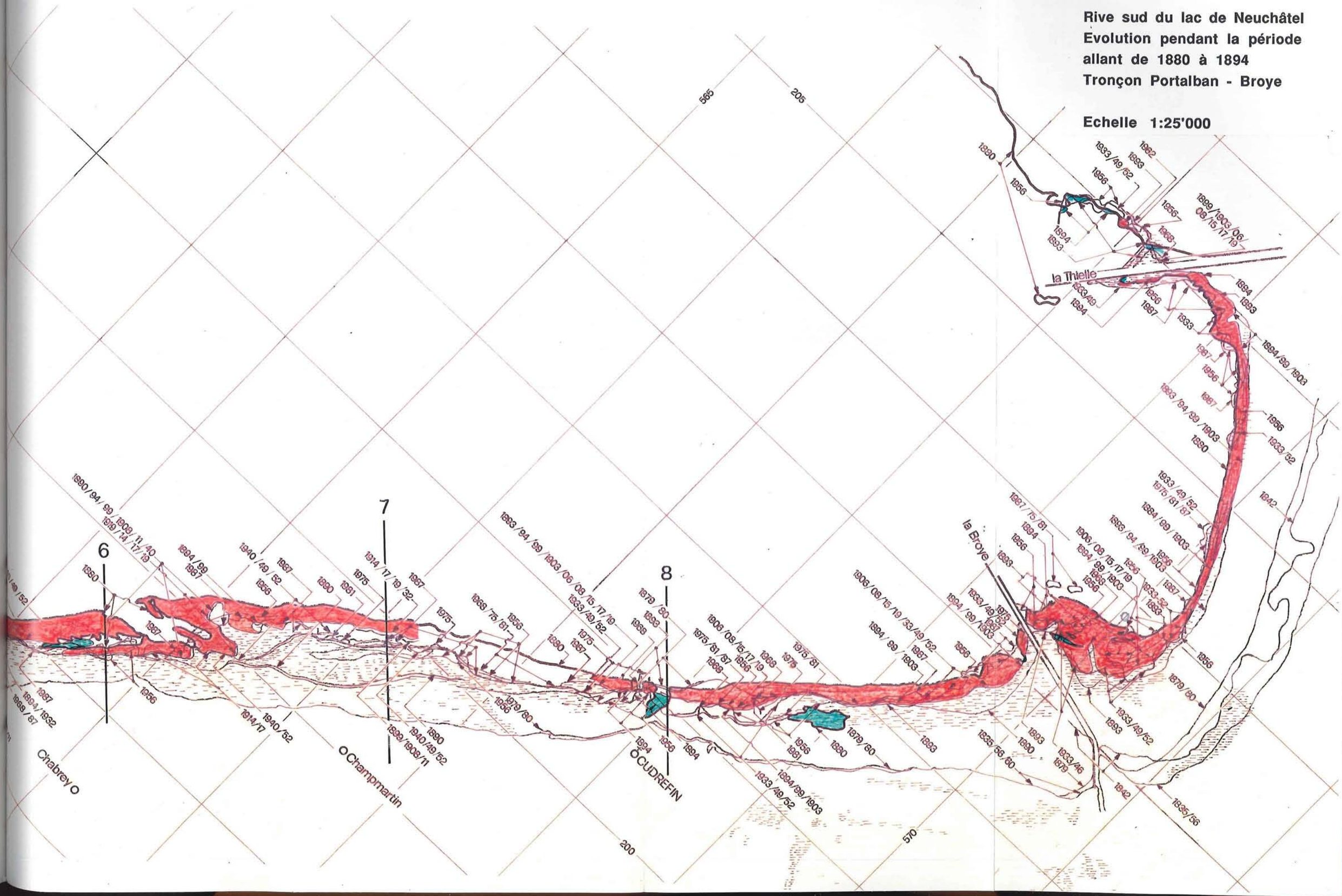
Rive sud du lac de Neuchâtel
Evolution pendant la période allant de 1880 à 1894
Tronçon Autavaux - Portalban

Echelle 1 : 25'000



Rive sud du lac de Neuchâtel
Evolution pendant la période allant de 1880 à 1894
Tronçon Portalban - Broye

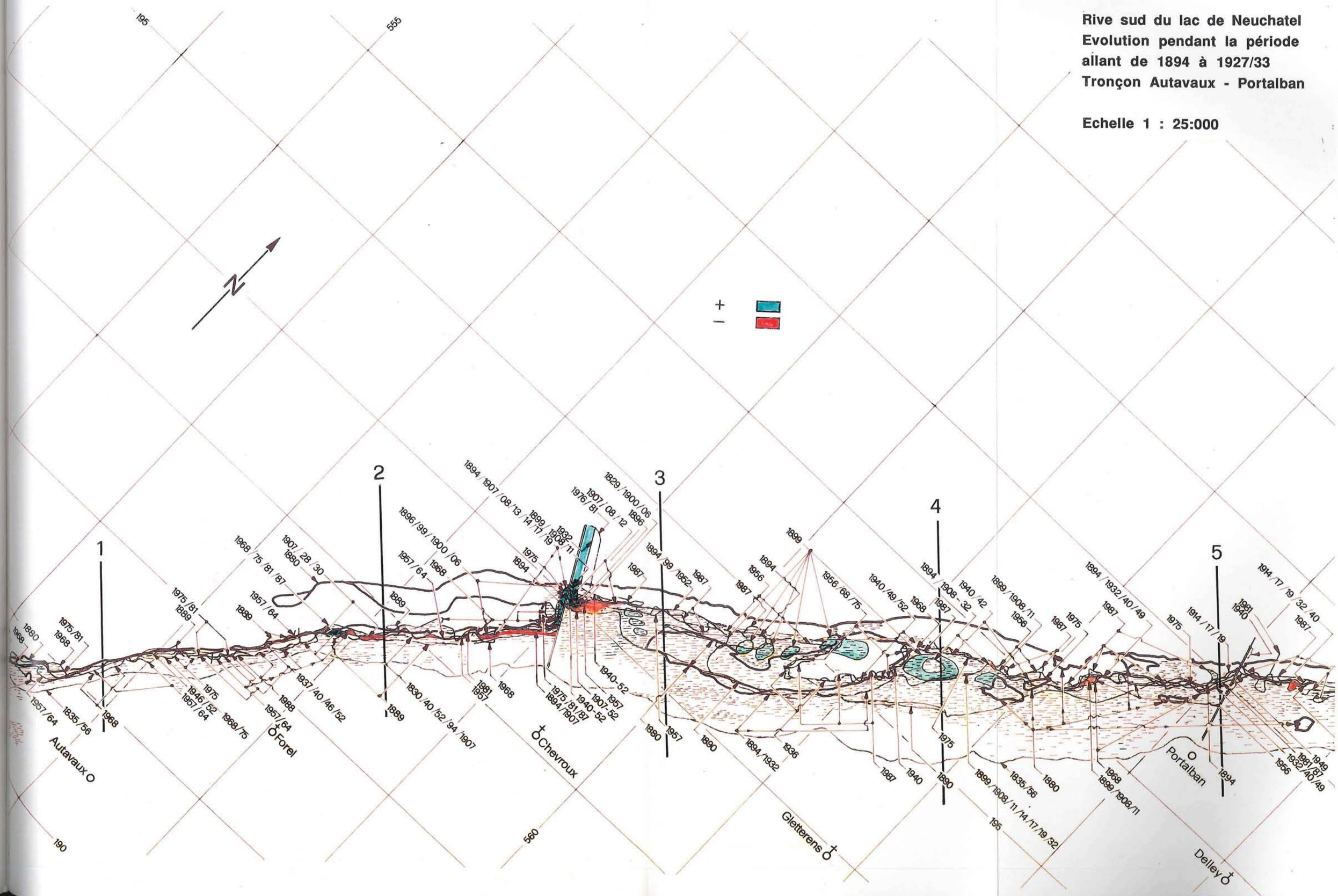
Echelle 1:25'000



Annexe 1C1

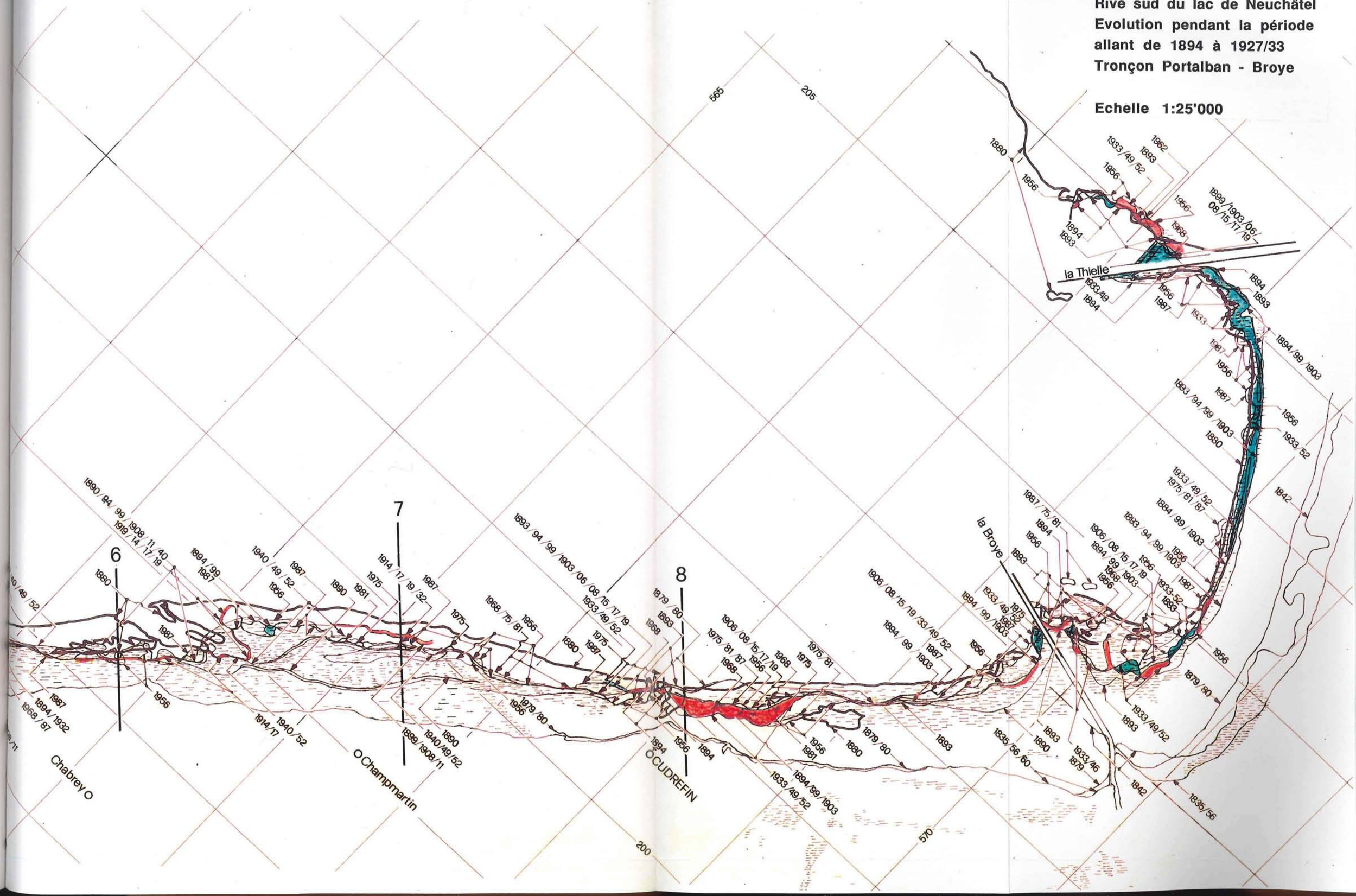
Rive sud du lac de Neuchatel
Evolution pendant la période allant de 1894 à 1927/33
Tronçon Autavaux - Portalban

Echelle 1 : 25:000



Rive sud du lac de Neuchâtel
Evolution pendant la période allant de 1894 à 1927/33
Tronçon Portalban - Broye

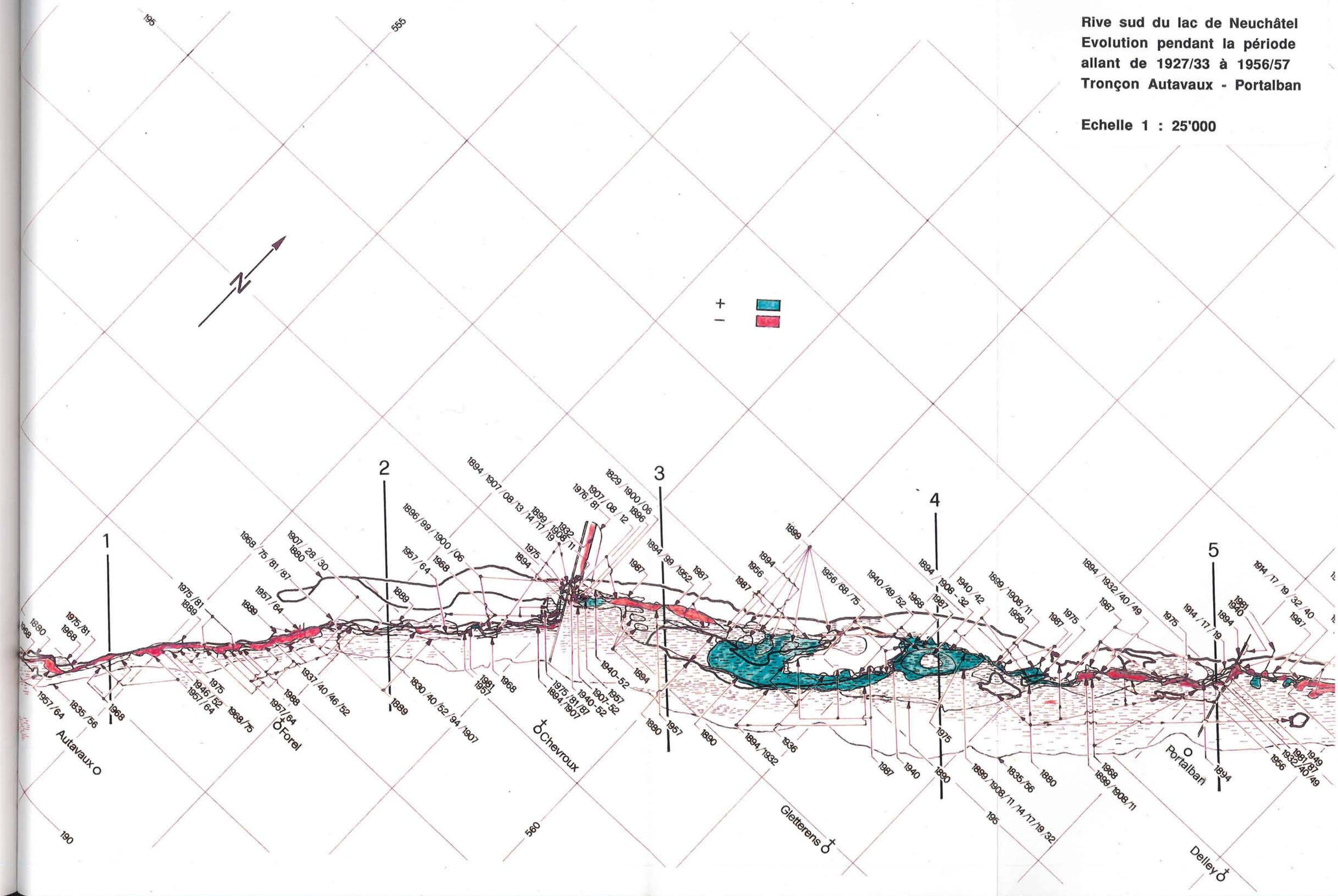
Echelle 1:25'000



Annexe 1D1

Rive sud du lac de Neuchâtel
Evolution pendant la période
allant de 1927/33 à 1956/57
Tronçon Autavaux - Portalban

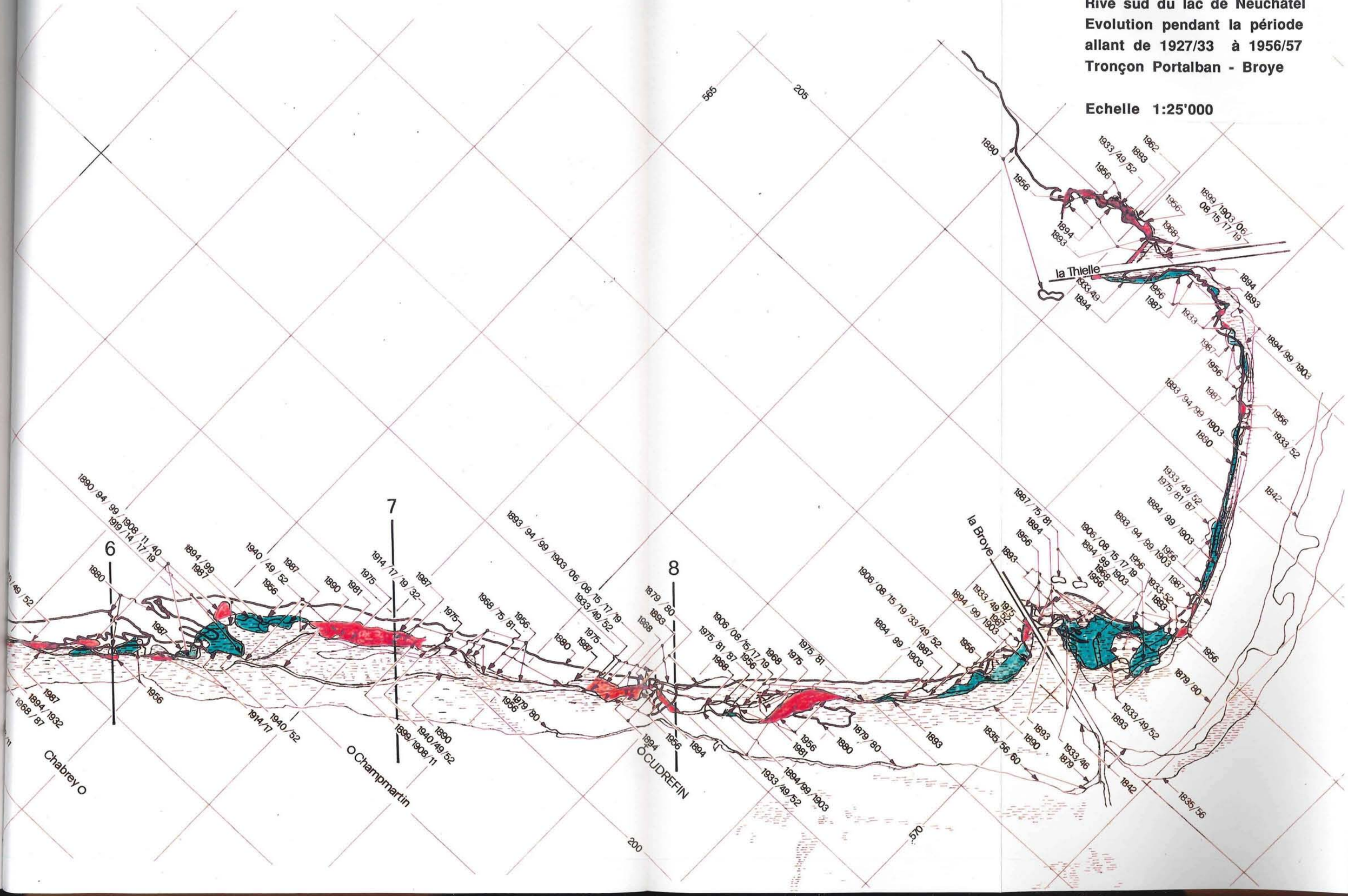
Echelle 1 : 25'000



Annexe 1D2

Rive sud du lac de Neuchâtel
Evolution pendant la période
allant de 1927/33 à 1956/57
Tronçon Portalban - Broye

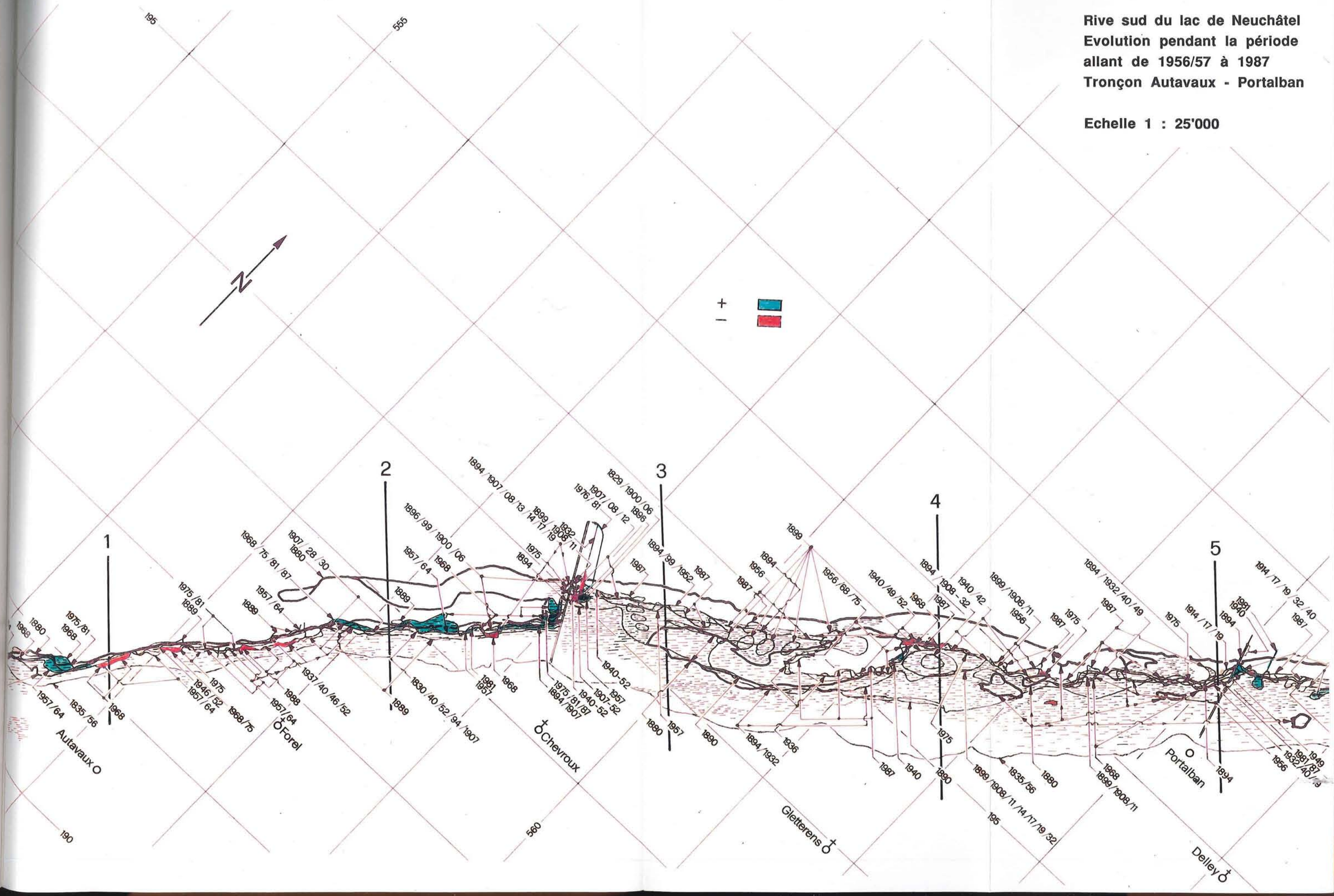
Echelle 1:25'000



Annexe 1E1

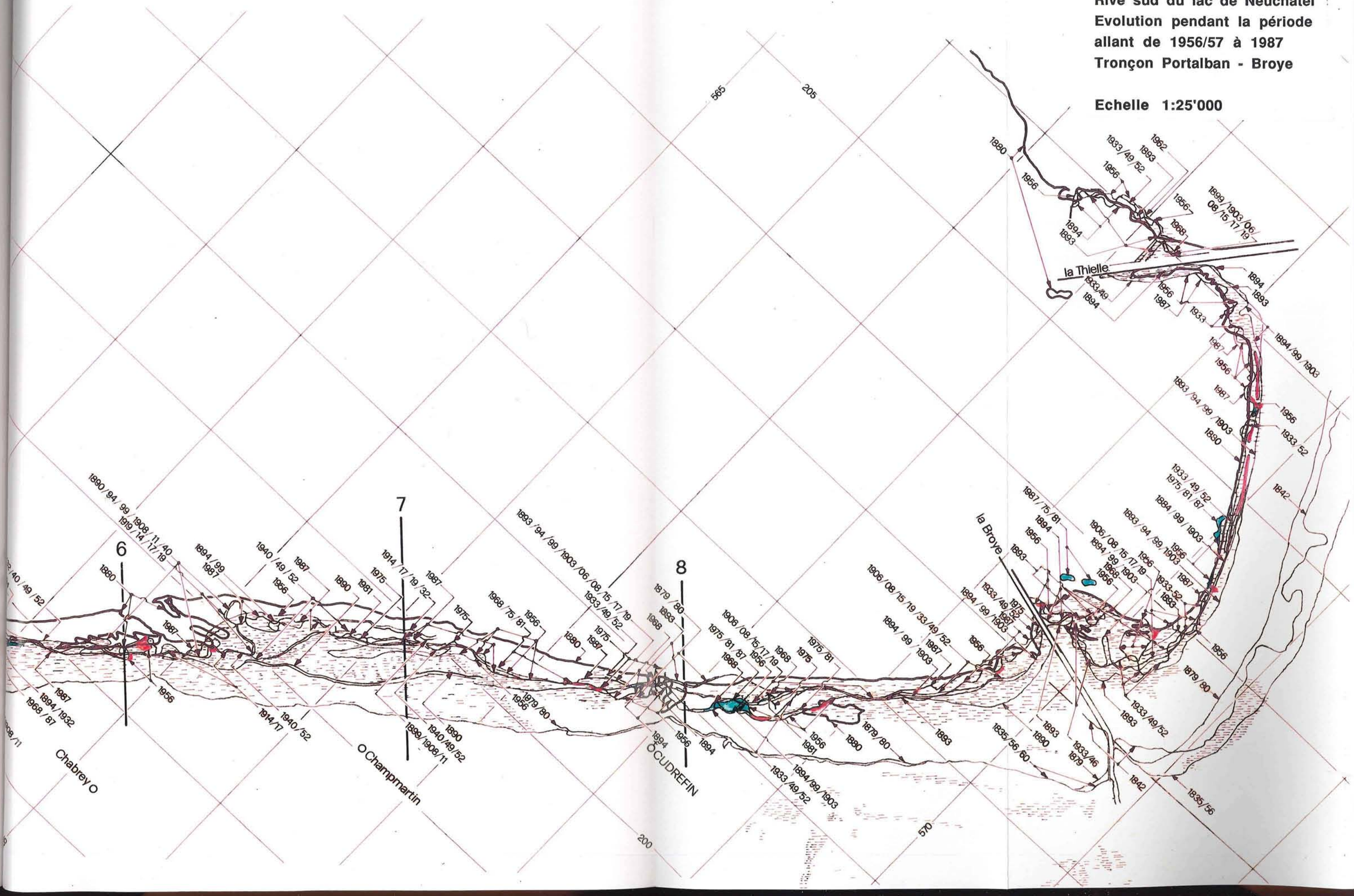
Rive sud du lac de Neuchâtel
Evolution pendant la période allant de 1956/57 à 1987
Tronçon Autavaux - Portalban

Echelle 1 : 25'000



Rive sud du lac de Neuchâtel
Evolution pendant la période allant de 1956/57 à 1987
Tronçon Portalban - Broye

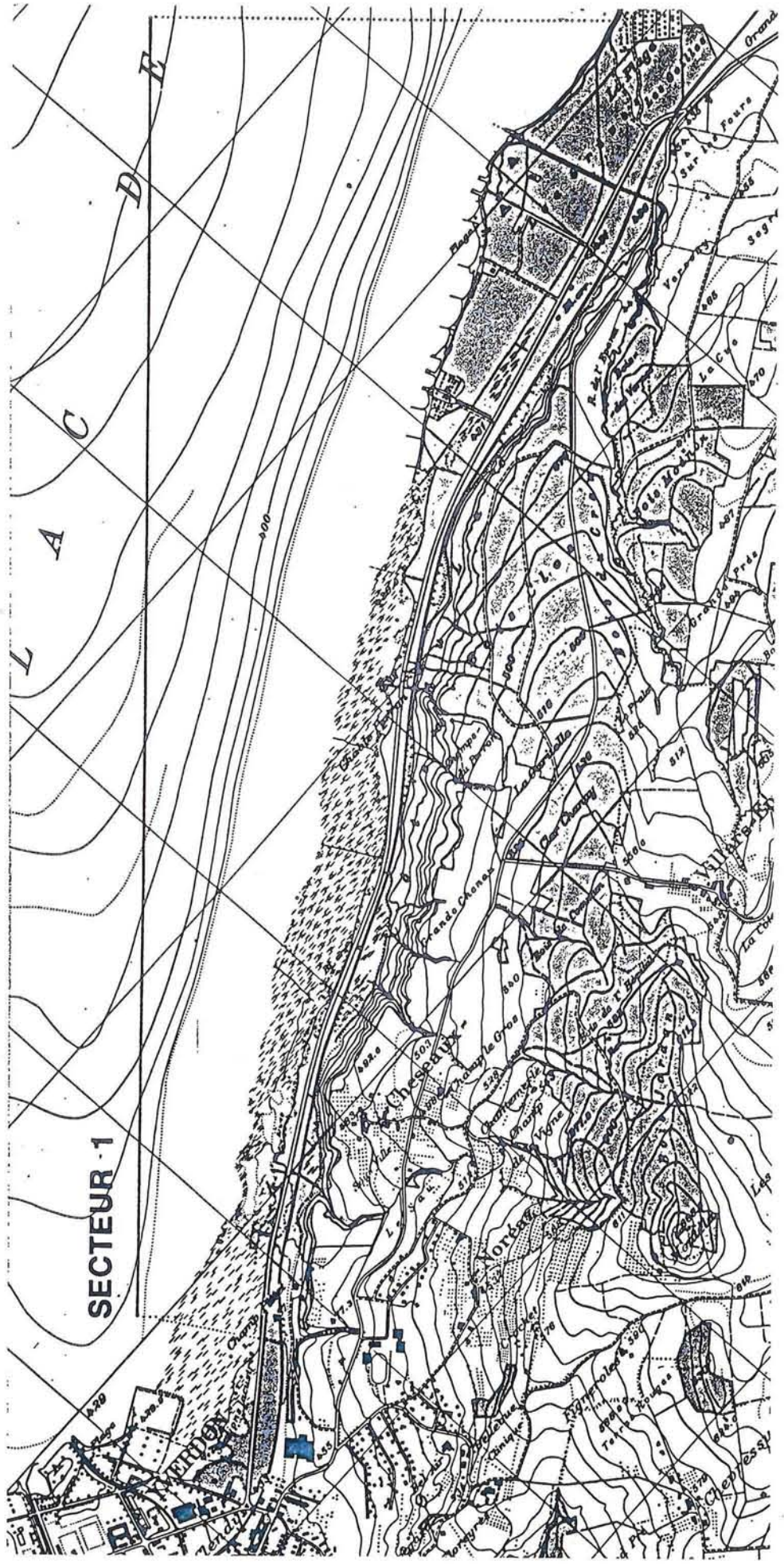
Echelle 1:25'000



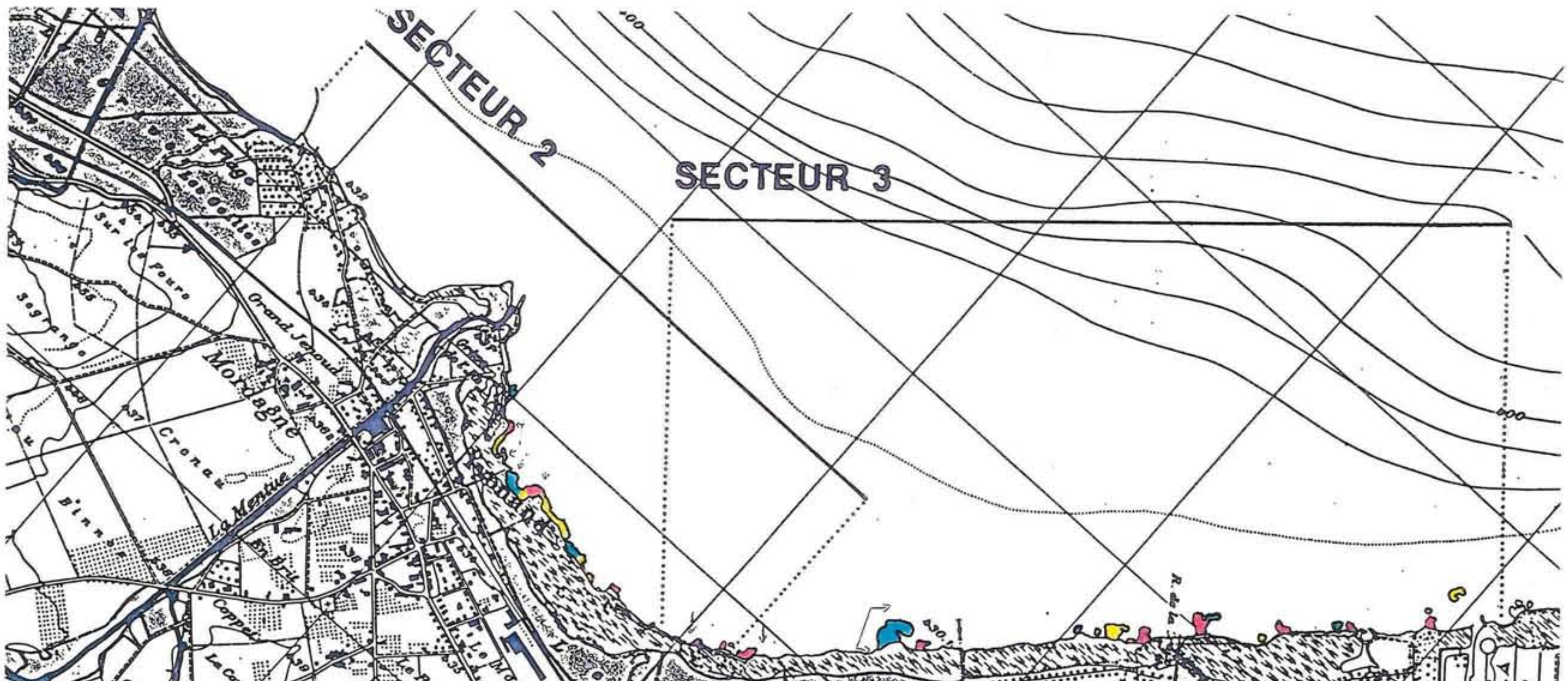
Annexes 2A - 2F: Evolution des roselières lacustres dans la période 1979 jusqu' à 1987

Légende:

vert:	en progression par rapport à l' état 1979
jaune:	stable par rapport à l' état 1979
rouge:	en régression par rapport à l' état 1979
non-coloré:	indéterminé en raison d' une non-couverture du site par les photos aériennes de 1979

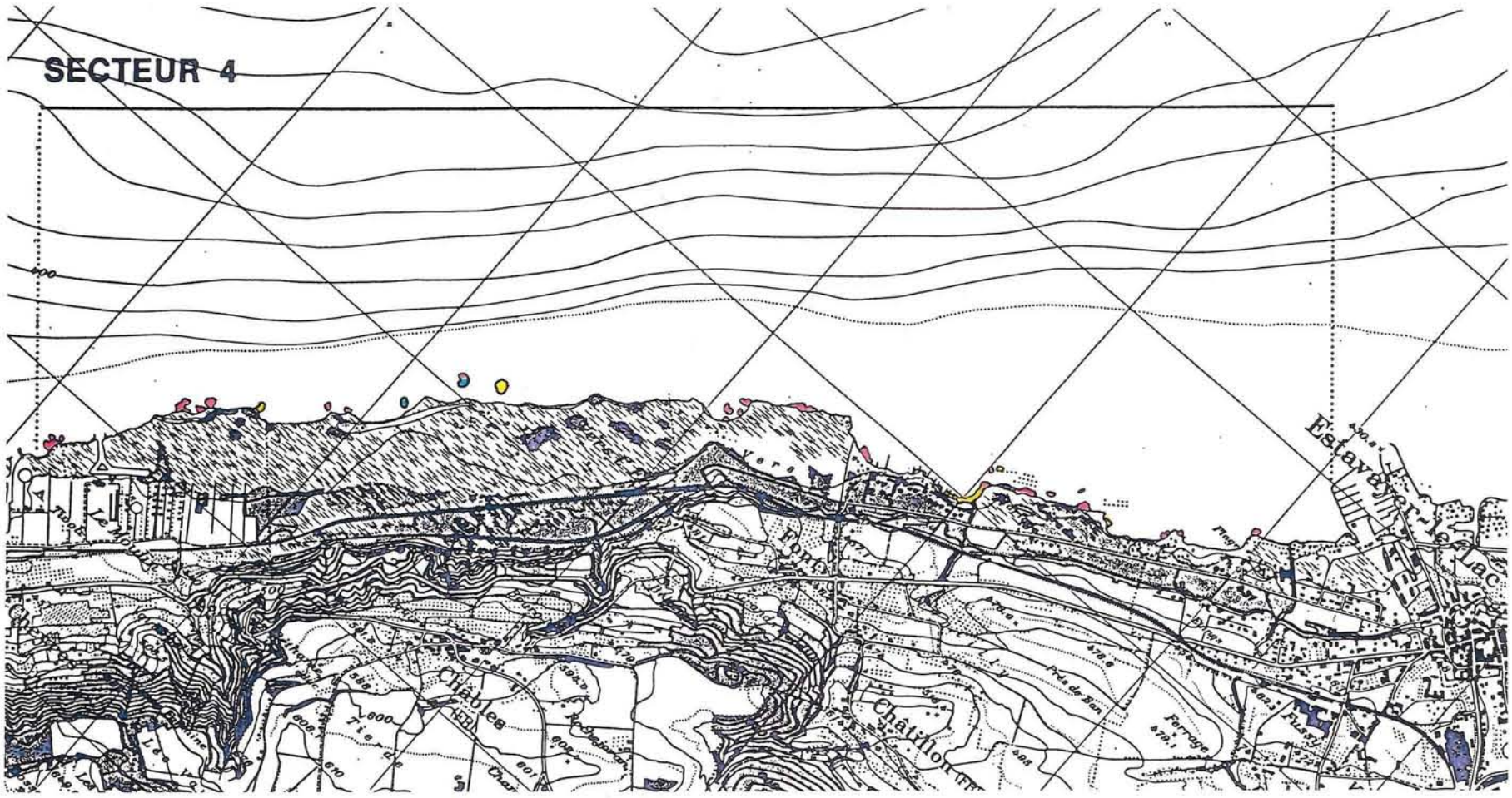


Evolution des roselières lacustres, secteur 1



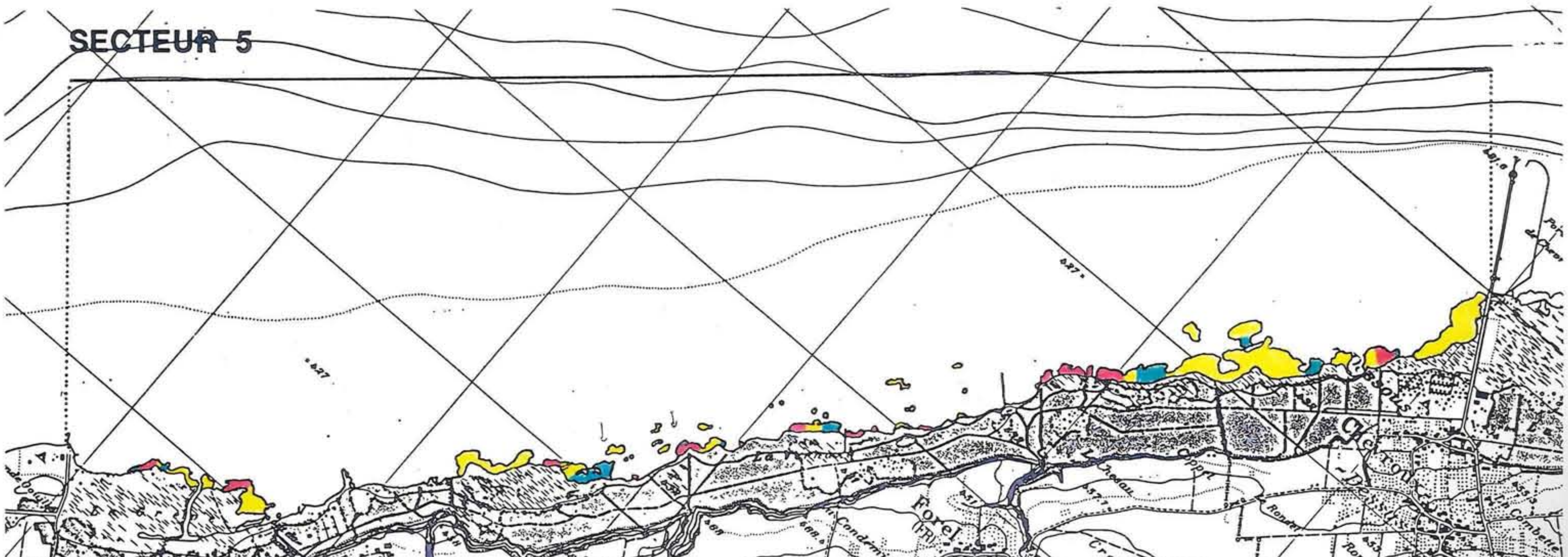
Evolution des roselières lacustres, secteur 2 et 3

Annexe 2B

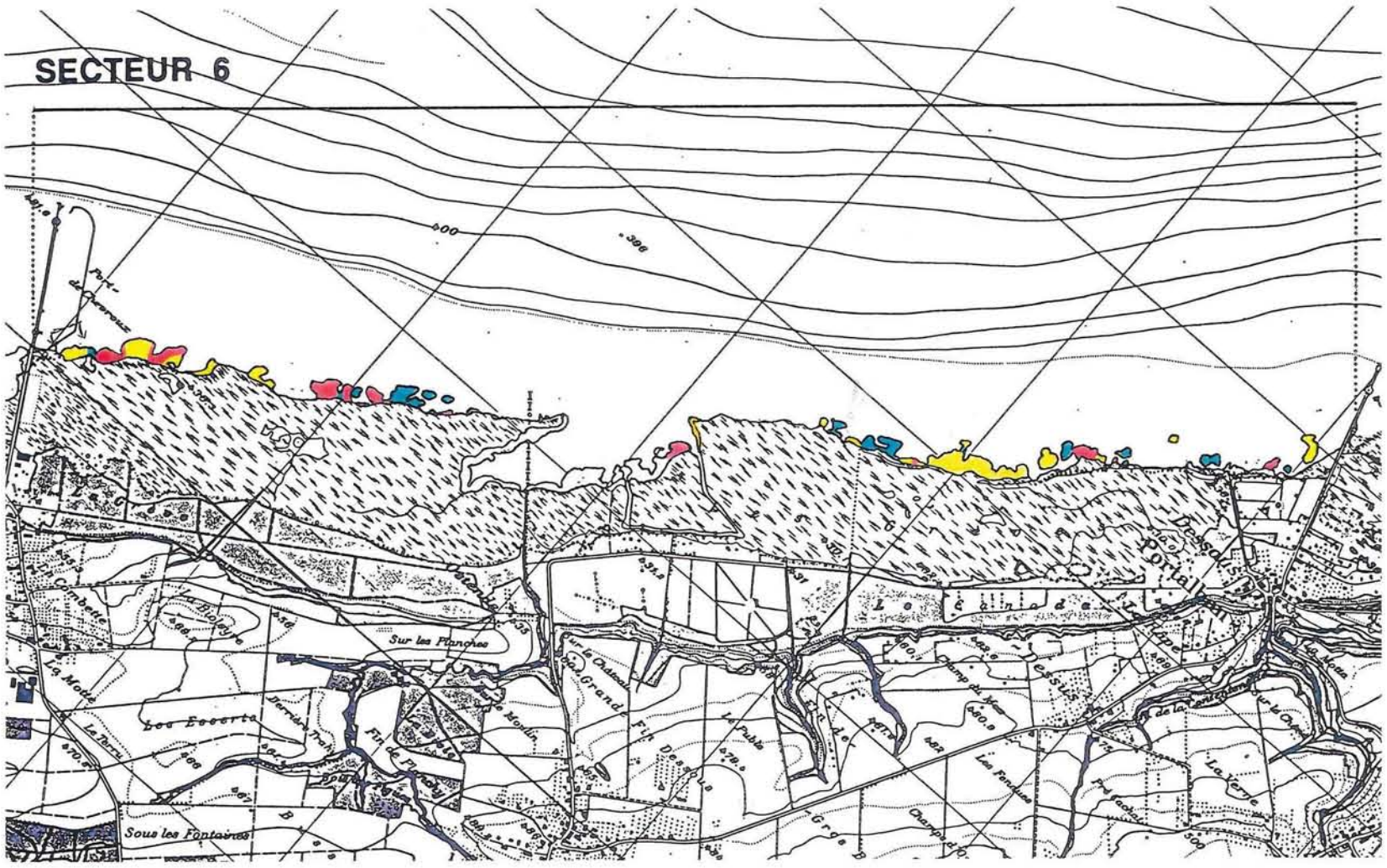


Evolution des roselières lacustres, secteur 4

Annexe 2C

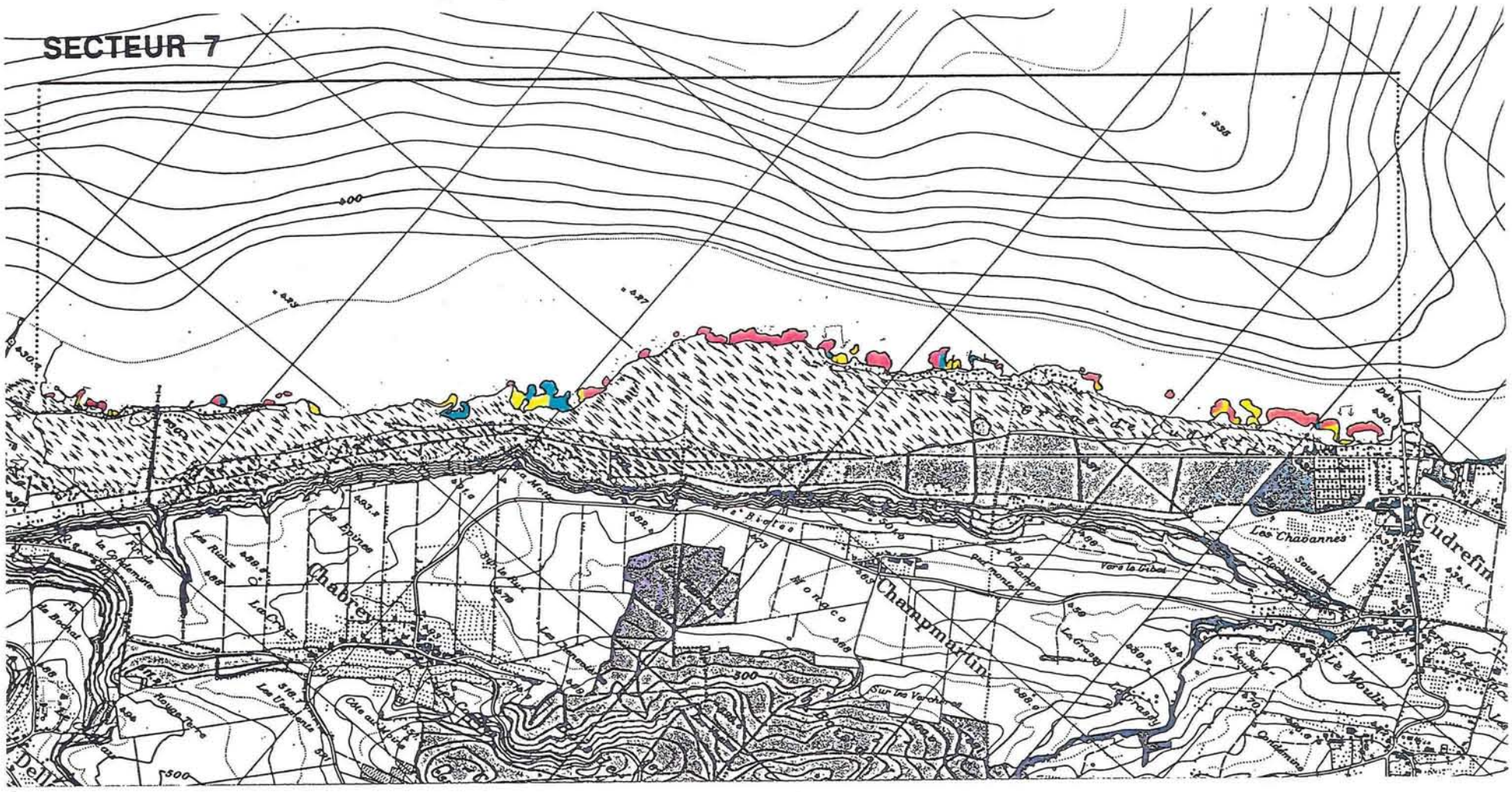


Evolution des roselières lacustres, secteur 5



Evolution des roselières lacustres, secteur 6

Annexe 2E



Evolution des roselières lacustres, secteur 7

Annexe 2F