ETUDE DES EFFETS DE LA REGULATION DES LACS SUBJURASSIENS SUR LA VEGETATION ET LE MILIEU

RAPPORT FINAL

Neuchâtel, avril 1995

LABORATOIRE D'ECOLOGIE VEGETALE
ET DE PHYTOSOCIOLOGIE
UNIVERSITE DE NEUCHATEL

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

ETUDE DES EFFETS DE LA REGULATION DES LACS SUBJURASSIENS SUR LA VEGETATION ET LE MILIEU

RAPPORT FINAL

Travail réalisé par

Alexandre BUTTLER
Philippe CORNALI
Michel BUECHE

Sous la direction du Prof. J.-M. GOBAT

Laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie
de l'Université de Neuchâtel
Neuchâtel, avril 1995

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

Référence:
Buttler, A., Cornali, P., Bueche, M., (1995): Etude des effets de la régulation des lacs subjurassiens sur la végétation et le milieu. Rapport final, Laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie de l'Université de Neuchâtel, sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage

Avant propos

Monnaie d'échange de la disparition du Grand Marais, les milieux naturels de la rive sud du lac de Neuchâtel constituent le dernier bastion régional de la faune et de la flore qui étaient inféodées, il y une centaine d'années, à l'écosystème exceptionnel de cette grande étendue de l'Entre-lacs, alors inhabitée et inhabitable.
Le nombre et la diversité des sites naturels humides que l'on peut y rencontrer, de même que la proximité d'un paysage rural modérément industrialisé font de la rive sud du lac de Neuchâtel un ensemble d'une grande valeur écologique. Il s'agit du plus grand écosystème riverain d'un seul tenant de Suisse et son intérêt est même d'ordre international (site retenu dans la Convention de Ramsar) puisque ses grèves constituent une étape migratoire pour des millions d'oiseaux. C'est pour ces raisons que la rive sud du lac de Neuchâtel figure depuis 1963 à l'inventaire CPN/KLN des paysages et sites naturels d'importance nationale. Elle est également intégrée dans plusieurs autres inventaires fédéraux comme celui des Paysages, sites et monuments naturels d'importance nationale (inventaire FNP/BLN, 1977/1983), celui des Bas-marais d'importance nationale (1990), celui des Zones alluviales d'importance nationale (1991), et celui des Sites marécageux d'une beauté particulière et d'importance nationale (1991). Certaines ordonnances fédérales complètent ces inventaires et règlent l'utilisation des zones concernées .

De richesse naturelle exceptionnelle, la rive sud du lac de Neuchâtel n'en est pas moins artificielle d'origine, puisque formée lors de l'abaissement du niveau du lac consécutif à la Première Correction des eaux du Jura, à la fin du XIXe siècle.
Jeunes à l'échelle de l'évolution des écosystèmes, les marais et forêts riverains n'ont pas encore "digéré" leur création particulière: très dynamiques, ils présentent l'instabilité typique de tout système écologique immature. En particulier, leur résistance très variable aux contraintes hydriques, qu'elles soient naturelles comme les pluies ou semi-artificielles comme la régulation des lacs, les rend très fragiles à moyen terme.
Destinée à comprendre un peu mieux les effets de cette régulation, la présente étude se veut une contribution, parmi d'autres, aux efforts engagés pour une conservation durable de ce joyau écologique.

Prof. Jean-Michel Gobat
Directeur du Laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie

Résumé

Ce travail est consacré à l'étude du fonctionnement des principaux systèmes hydrologiques des marais de la rive sud du lac de Neuchâtel dans le but d'évaluer plus précisément l'impact de la régulation des lacs subjurassiens (règlement 1980/82) sur la végétation et le milieu. L'approche est basée essentiellement sur l'observation des phénomènes actuels dans la concordance des niveaux de nappe avec les tolérances hydrologiques de la végétation et des sols.
A partir d'un échantillon de 15 transects représentatifs, le levé altimétrique montre clairement que, globalement, seuls les marais non boisés, à l'exclusion des prairies à choin et de celles à molinie, sont susceptibles d'être influencés par le battement du lac tel qu'il est déterminé aujourd'hui (règlement 1980/82).
Pour évaluer la sensibilité des milieux par rapport aux conditions écologiques liées à la dynamique de la nappe et du lac, une description typologique de la végétation et des sols a été entreprise et confrontée à la typologie des nappes.
Du point de vue hydrodynamique, la relation entre le lac et les milieux riverains relève de deux modèles. Le modèle des flux souterrains, qui fait intervenir notamment les propriétés hydrologiques des sédiments, montre que l'influence du lac est limitée à une cinquantaine de mètres à partir du rivage. Le modèle topographique, dont le rôle est déterminant, intègre la relation d'inondation directe par le lac en fonction des situations topographiques sur la rive.
A partir d'une typologie fonctionnelle globale végétation - nappe - sol, et à partir de la distinction entre centre de gravité écologique des groupements végétaux et unités marginales à comportement critique, une courbe optimale de régulation des niveaux du lac a été calculée. Celle-ci est déterminée en tenant compte de la nécessité de ramener chaque site aux conditions moyennes (nombre de jours inondés) du type fonctionnel de référence auquel il appartient, en agissant sur le niveau du lac. Le résultat du calcul montre qu'il importe de maintenir durant toute la période de végétation un niveau du lac au moins égal à 429,50 m, niveau permettant de garantir, lors d'une année "standard", les inondations moyennes requises pour les groupements du *Phragmition* et du *Magnocaricion.*
Enfin l'étude fournit une évaluation chiffrée de l'impact des différents niveaux du lac par rapport aux besoins hydriques présumés de l'ensemble des groupements végétaux non boisés. L'indice de satisfaction maximal est obtenu pour une altitude du lac de 429,50 m.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist dem Studium des Funktionierens der wichtigsten hydrologischen Systeme der am südlichen Ufer des Neuenburgersees gelegenen Flachmoore gewidmet. Das Ziel war, den Einfluss der Pegelstandsregulierung der Juraseen (Reglement 1980/82) auf die Vegetation und das Milieu genauer zu untersuchen .
Der Untersuchungsansatz basiert vorallem auf Beobachtungen aktueller Phänomene bezüglich der Uebereinstimmung des Grundwasserstandes mit der hydrologischen Amplitude der Vegetation und der Böden.
Ausgehend von einem Stichprobenumfang von 15 repräsentativen Transekten zeigt die Nivellierung klar, dass gesamthaft gesehen nur die baumfreien Flachmoore - mit Ausnahme der Kopfbinsen- und Pfeifengrasrieder - empfindlich auf die heute beobachteten Wasserstandsschwankungen des Sees reagieren (Reglement 1980/82).
Um die Sensibilität des Milieus in Bezug auf die mit der Dynamik des Seepegel- und des Grundwasserstandes verbundenen ökologischen Bedingungen zu beurteilen, wurde eine Typologie der Vegetation und der Böden erstellt. DieseTypologien wurden anschliessend mit der Typologie des Grundwasserstandes konfrontiert.
Die Beziehung zwischen dem See und den ufernahen Gebieten wird - vom hydrologischen Standpunkt aus gesehen - von zwei Modellen beschrieben. Das Modell des Grundwasserflusses bezieht die hydrologischen Eigenschaften der Sedimente mit ein und zeigt, dass der Einfluss vom See nur bis auf eine Entfernung von 50m gegeben ist. Das topografische Modell - dessen Rolle entscheidend ist - integriert die direkt vom See verursachten Ueberschwemmungen in Bezug auf die topografische Lage des Ufers.

Ausgehend von einer global funktionellen Typologie 'Vegetation - Grundwasserspiegel - Boden' sowie dem Unterschied zwischen den ökologischen Schwerpunkten der Vegetationseinheiten und jenen Einheiten, die ein kritisches Verhalten zeigen, wurde eine optimale Kurve zur Regulierung des Seepegelstandes berechnet. Zum Bestimmen dieser Kurve wurde der Notwendigkeit Rechnung getragen, dass jeder Standort auf die mittleren Bedingungen (Anzahl Tage mit Ueberflutung) seines funktionellen Vergleichtypus überführt werden muss. Dies geschieht, indem man auf den Pegelstand des Sees einwirkt. Das Rechnungsresultat zeigt, dass es unerlässlich ist, während der ganzen Vegetationsperiode einen Pegelstand von wenigstens 429.50müM. aufrechtzuerhalten. Dieses Niveau gewährt während eines "Standart"jahres die für das *Phragmition* und das *Magnocaricion* unerlässlichen Ueberflutungen.
Schlussendlich liefert vorliegende Studie eine quantitative Einschätzung des Einflusses der verschiedenen Seeniveaus in Bezug auf die vermuteten hydrologischen Ansprüche aller baumfreien Vegetationseinheiten. Ein optimaler Nutzungswert wird mit einem Wasserstand des Sees von 429.50 müM.erreicht.

Abstract - Key words

This study aims at understanding the functioning of the main hydrological systems occuring in the wetlands of the south shore of the lake Neuchâtel, in order to assess the impact of the lake level regulation (administrative regulations 1980/82) on the vegetation and the soils. The research scheme is mainly based on the observation of present processes and the concordance of the groundwater levels with the hydrological tolerance of both the vegetation and the soils.
The soil levelling of 15 representative transects has clearly shown that, on the whole and with the exception of the *Schoenetum* and the *Molinietum* wet meadows, the non-wooded fens are under the potentiel influence of the lake level fluctuation, as it is set today (administrative regulations 1980/82).
In order to assess the sensitivity of these environments with regard to the ecological conditions determined by the groundwater and the lakewater regimes, a typological description of the vegetation and the soils has been carried out and confronted with the groundwater typology.
From the point of view of the hydrodynamics, the relation between the lake and the shore wetlands can be explained by means of two models: 1) the model of the underground waterflows, which involves, among others, the hydrological properties of the sediments and which has shown that the lake influences the wetland groundwater only on a fringe of about 50m, and 2) the topographical model, which is most relevant for the vegetation and takes into account the direct inundations of the lake, according to the topographical settings of the shore.
Starting with a global functional typology combining vegetation, groundwater and soil and making the distinction between the vegetation communities which are in their ecological optimum and those presenting some ecological shifts towards a critical situation, an optimal regulation curve of the lake has been calculated. This curve assumes that the hydrological conditions of all the sites have to be improved or adjusted in order to match the mean requirements (number of inundated days) of the reference functional units to which they belong. This is achieved by setting the suitable lake level. Our results indicate that it is necessary to maintain the lake level at at least 429.5 m.a.S during the entire vegetation period. This makes it possible to guarantee, during a standard climatic year, the mean inundation requirements of the *Phragmition* and the *Magnocaricion* vegetation.
Finally, this study also gives some quantitative assessments of the impact different lake levels may have regarding the presumed hydrological requirements of all the non-wooded fens when they are considered globally. The best satisfaction index is obtained when the lake is set at 429,5 m.a.S.

Key words: fen, ecology, hydrology, watertable simulation, lake water regulation, eutrophication, management

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Diagrammes ombrothermiques de Neuchâtel et Payerne (moyennes 1931-1960), et précipitations à Witzwil (moyennes 1901-1960), selon Buttler (1990) 22

Figure 1.2 Les principales interventions de la Correction des eaux du Jura (extrait de Cornali 1992) 23

Figure 1.3 Niveaux moyens mensuels du lac de Neuchâtel avant la 1ère Correction des eaux du Jura (période 1817-1856) et après (période 1914-1943), selon Buttler (1987) 22

Figure 1.4 Niveaux moyens mensuels du lac de Neuchâtel avant et pendant la 2ème Correction des eaux du Jura (période 1963-1972) et après (période 1973-1982), avec valeurs extrêmes, selon Buttler (1987) 24

Figure 1.5 Modèle des relations entre le lac et le marais (Bueche et al. 1994) 25

Figure 1.6 Conception et organisation scientifique du projet 26

Figure 2.1 Courbe des niveaux de fusion du dendrogramme de classification (sélection des transects) 38

Figure 2.2 (a+b+c) Principales caractéristiques géophysiques et phytosociologiques des transects sélectionnés 39

Figure 2.3 Altitude des sites d'étude classés selon les unités synsystématiques d'après Clerc (à paraître) 42

Figure 2.4 Exemple de transect géophysique 43

Figure 2.5 Exemple de fiche lithologique 43

Figure 2.6 Graphique liant la conductivité hydraulique à la résistivité 44

Figure 2.7 Coupes géophysiques schématiques des 15 transects 45

Figure 2.8 Exemple de station piézométrique 44

Figure 3.1 Représentation schématique de l'occupation de l'espace par une phytocoenose forestière 66

Figure 3.2 Graphique des valeurs de similarité pour les unités fonctionnelles des relevés de marais 67

Figure 3.3 Graphique des valeurs de similarité pour les forêts 67

Figure 3.4 Situation du groupement fonctionnel 3 sur le transect 29 66

Figure 4.1 Dispositif de prélèvement et de description des carottes pédologiques..... 84

Figure 4.2 Représentation schématique des trois cas de figure du degré d'hydromorphie 84

Figure 4.3 Equilibre évolutif de la végétation et du sol sous l'influence de la nappe..... 84

Figure 5.1 Modélisation bidimensionnelle du transect 9..... 105

Figure 5.2a Simulation numérique des mouvements de nappe, séries temporelles des variantes 1 à 3 (régime climatique 4) 106

Figure 5.2b Simulation numérique des mouvements de nappe, modifications spatiales pour les variantes 1 à 3 (régime climatique 4)..... 107

Figure 5.3 Simulation numérique des mouvements de nappe, séries temporelles des variantes 7 à 10 (régime climatique 6)..... 108

Figure 5.4 Simulation numérique des mouvements de nappe, variantes 12 et 13 ... 110

Figure 5.5 Graphe XY des altitudes de la nappe et du lac (données hebdomadaires ou journalières)..... 111

Figure 5.6 Groupement CHRONO avec contrainte de contiguïté temporelle (connexité: 0,5)..... 112

Figure 6.1a Niveaux moyens des types fonctionnels 1991 - 1992: marais..... 136

Figure 6.1b Niveaux moyens des types fonctionnels 1991 - 1992: forêts..... 137

Figure 6.2 Principe de la détermination du nombre de jours d'inondation directe par le lac 138

Figure 6.3 Courbe optimale de régulation du niveau du lac pour les besoins de la végétation et du milieu 139

Figure 6.4 Indice de satisfaction des besoins en inondation en fonction du niveau du lac 140

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Caractéristiques annuelles du climat régional, selon Buttler (1990)..... 27

Tableau 2.1a Tableau brut des descripteurs utilisés pour la réduction de 30 à 15 transects 46

Tableau 2.1b Tableau structuré à l'aide des seuls descripteurs phytosociologiques..... 46

Tableau 2.2 Longueurs et altitudes moyennes des groupements végétaux..... 47

Tableau 3.1 Organigramme illustrant la démarche du traitement des données..... 68

Tableau 3.2 Tableau résumé des unités fonctionnelles des marais..... 69

Tableau 3.3 Tableau des moyennes des valeurs indicatrices pour les marais..... 70

Tableau 3.4 Tableau des unités forestières..... 71

Tableau 3.5 Tableau comparatif des unités fonctionnelles et des unités phytosociologiques des marais 73

Tableau 4.1 Exemple de fichier d'origine avec tous les descripteurs pédologiques (40)p.103..... 85

Tableau 4.2 Exemple de fiche pédologique de terrain 86

Tableau 4.3 Tableau du choix d'une mesure d'association symétrique (Legendre et Legendre, 1984)..... 85

Tableau 4.4 Exemple de fichier réduit avec les descripteurs pédologiques les plus discriminants (24)..... 85

Tableau 4.5 Tableau des types de sols issus du groupement agglomératif..... 87

Tableau 4.6 Tableau final présentant les 4 types de sols 89

Tableau 5.1 Coefficients de corrélation lac - piézomètres..... 113

Tableau 6.1 Typologie globale végétation - nappes - sols (données de la saison de végétation)..... 141

Tableau 6.2a Valeurs bi-mensuelles optimales moyennes pour la régulation du niveau du lac..... 145

Tableau 6.2b Facteurs de pondération pour le calcul des valeurs optimales moyennes: nombre de jours et longueurs inondées 156

Tableau 6.3 Indices de satisfaction des besoins en inondation en fonction du niveau du lac..... 147

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Sélection de 10 transects représentatifs pour une approche écologique détaillée
Annexe 2	Caractéristiques techniques des installations piézométriques
Annexe 3a	Etude géophysique et commentaires hydrogéologiques, rive sud du lac de Neuchâtel (étude réalisée en sous-traitance)
Annexe 3b	Ecoulements et caractéristiques de l'eau de la falaise de la réserve de Font (FR) (étude réalisée en sous-traitance)
Annexe 4	Tableau des unités phytosociologiques
Annexe 5	Ecoulements souterrains et relations nappe-lac dans les rives sud du lac de Neuchâtel (étude réalisée en sous-traitance)
Annexe 6	Graphes et tableaux de l'évolution temporelle des niveaux phréatiques durant la période de mesures (17 avril 1991 - 24 juin 1992)
Annexe 7	Graphes X-Y pour la détermination des conditions et des fréquences d'inondations
Annexe 8	Statistiques et typologie des nappes
Annexe 9	Modèle hydrodynamique et relation avec la végétation dans le marais du secteur de Portalban (FR) - Curdrefin (VD). Travail de diplôme de M. Enggist, Université de Genève

LISTE DES PLANS

Coupes des 15 transects sélectionnés
(s'ils ne figurent pas dans le présent rapport, ces plans peuvent être consultés au laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie de l'Université de Neuchâtel)

Plan général et emplacement des transects d'étude

Remerciements

Ce projet d'envergure d'une durée de cinq ans a été mené à bien grâce à la compétence et à la bonne volonté des personnes suivantes:

MM. Dr. A. Antonietti et R. Lebeau de la Division principale Protection de la nature et du paysage de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), qui ont accordé leur confiance et leur aide aux collaborateurs du projet.

Messieurs les membres de la commission d'experts qui ont conseillé les responsables du projet: Dr. A. Antonietti et R. Lebeau, OFEFP/BUWAL, Division protection de la nature et du paysage, PD. Dr. O. Wildi, Institut fédéral de recherches FNP/WSL à Birmensdorf, Prof. F. Kloetzli, Geobotanisches Institut ETH Zürich, C. Roulier (qui a également participé à la rédaction du projet), Service-conseils zones alluviales à Yverdon, M. Antoniazza, Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel à Champ-Pittet, Prof. A. Musy, Département de Génie rural, Institut IATE - Hydrologie de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, J.-L. Moret (qui a également participé à la rédaction du projet), Musée et Jardin botanique de Lausanne, Dr. M. Gratier, Service de l'aménagement du territoire du canton de Vaud, M. Achermann, Service de la protection de la nature du canton de Fribourg, Prof. D. Meyer, Institut de zoologie de l'Université de Fribourg, Dr. J.-F. Matter, Institut für Wald- und Holzforschung, Fachbereich Waldbau, ETH Zürich, J.-B. Zaugg, Bureau Aquarius, Biologie de l'environnement à Neuchâtel.

M. Dr. A. Kühne du Laboratoire de Recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich, qui a assumé la direction générale des projets d'études liés au règlement de régulation de la 2ème Correction des eaux du Jura.

M. J.-M. Carrard, du Bureau d'ingénieur géomètre H. Pillonnel à Estavayer-le-Lac, qui a parfaitement su adapter sa méthode de travail à nos besoins particuliers.

MM. Prof. I. Müller, Silvio Cuccodoro et Prof. F. Zwahlen (directeur), du Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, pour leurs excellents travaux de géophysique.

MM. Dr. P. Perrochet et Prof. A. Musy (directeur), du Département de génie rural de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, qui ont apporté leur compétence d'experts et adapté leurs méthodes à notre problématique, contribuant ainsi significativement à la réussite du projet.

Mmes B. Werffeli, J. Moret et M. R. Douard, de l'Université de Neuchâtel, pour leur précieuse collaboration informatique ou sur le terrain.

MM. C. Le Nédic et Prof. P. Hainard, de l'Institut de botanique systématique et de géobotanique de l'Université de Lausanne, pour leur soutien et leur collaboration, particulièrement dans la phase initiale du projet.

Mmes S. Güsewell, R. Falella, S. Waekerlig, M. Fuchs, MM. M. Rollier (responsable du groupe et qui a également participé à la rédaction du projet), F. Bolle, C. Bourdier, C. Clerc du Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel GEG, Champ-Pittet, qui nous ont constamment soutenu dans nos travaux et facilité le travail sur le terrain.

MM. R. Caloz et T. Moog, du Département de Génie rural, Institut IATE - Hydrologie de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, pour leur collaboration dans le cadre d'un travail de fin de semestre.

M. M. Enggist, de l'Université de Genève, pour sa collaboration dans le cadre de son travail de diplôme.

Messieurs les membres de la Sous-commission scientifique de la Commission de gestion du Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel GEG (président Prof. D. Meyer), qui ont apporté sans relâche leur soutien à nos travaux.

MM. les forestiers d'arrondissement P. Cherbuin, V. Pleines, J. Michaud et J. Deschenaux qui, par leur collaboration, nous ont facilité certains travaux.

Mmes C. Bettinelli, M. Kurz, M. Donzé, MM. D. Anthoine et S. Camponovo, qui ont rempli les tâches de secrétariat et de comptabilité liées au projet, ainsi que le rectorat de l'Université de Neuchâtel qui a mis à disposition les locaux de travail.

M. M. Koch, du Service hydrologique et géologique national pour la mise à disposition de données concernant le lac de Neuchâtel et le climat.

MM. les bûcherons du Service des forêts de la ville d'Estavayer-le-Lac.

M. M.Gianoli du Bureau des autoroutes du canton Fribourg pour la mise à diposition des résultats des sondages géologiques de l'autoroute N1.

TABLE DES MATIERES

Titre I
Avant-propos II
Résumé III
Zusammenfassung III
Abstract - Keywords IV
Liste des figures V
Liste des tableaux VII
Liste des annexes VIII
Liste des plans VIII
Remerciements IX

1 INTRODUCTION GENERALE

1.1 Généralités 1
1.1.1 La Correction des eaux du Jura et son impact sur l'environnement 1
1.1.2 Conception du rapport 1
1.2 Le mandat 2
1.2.1 Le projet global 2
1.2.2 L'étude d'impact sur la végétation et le milieu 2
1.2.3 Organisation administrative du projet 3
1.2.4 Commission d'experts 4
1.3 Présentation du milieu 5
1.3.1 Situation géographique 5
1.3.2 Situation géologique 6
1.3.3 Le climat 6
1.3.4 Situation historique 7
1.3.5 Le niveau du lac de Neuchâtel et le réseau hydrographique 8
1.3.6 Valeur écologique des milieux naturels 9
1.3.7 Dynamique, gestion et entretien des marais 10
1.4 Problématique et objectifs de l'étude 12
1.4.1 Généralités 12
1.4.2 Les travaux scientifiques déjà effectués 13
1.4.3 Conception générale du projet 16
1.4.4 Adaptation du projet et organigramme de réalisation 19

2 TRAVAUX PREPARATOIRES

2.1 Choix des transects 28
2.1.1 Première sélection: 30 transects 28
2.1.2 Deuxième sélection: 15 transects 29
2.1.3 Troisième sélection: 10 transects 31
2.2 Nivellement et pose des piézomètres 32
2.3 Géophysique 35
2.3.1 Résumé de l'étude géophysique 35
2.3.2 Interprétation conjointe des données géophysiques et altimétriques 37
2.3.3 Conclusions 37

3 ETUDE DE LA VEGETATION

3.1 Introduction 48
3.2 Méthodes 49
3.2.1 Généralités 49
3.2.2 Rappel méthodologique 49
3.2.3 Le marais 50
3.2.4 Les forêts 52

3.3 Résultats 53
3.3.1 Unités fonctionnelles de marais 54
3.3.2 Unités phytosociologiques de marais 55
3.3.3 Les forêts 57
3.4 Discussion 58
3.4.1 Typologie fonctionnelle des marais 58
3.4.2 Typologie phytosociologique des marais 62
3.4.3 Typologie forestière 63
3.5 Conclusions 64

4 ETUDE DES SOLS

4.1 Introduction 75
4.2 Méthodes 75
4.2.1 Généralités 75
4.2.2 Résultats des essais 76
4.3 Résultats et discussion 78
4.3.1 Principaux types de sols 78
4.3.2 Discussion 79
4.3.3 La distinction gley - pseudogley 81
4.4 Conclusions 82

5 ETUDE HYDRODYNAMIQUE

5.1 Introduction 91
5.2 Modélisation des flux souterrains 91
5.2.1 Méthodes 91
5.2.2 Collecte et mise en forme des données pour la simulation numérique 92
5.2.3 Résultats et discussion 93
5.2.4 Conclusions 97
5.3 Piézométrie 97
5.3.1 Collecte et mise en forme des données 97
5.3.2 Variations temporelles des niveaux piézométriques 98
5.3.3 Détermination des conditions et des fréquences d'inondations 100
5.3.4 Détermination des groupes fonctionnels de nappes 101
5.3.5 Principales caractéristiques des mesures piézométriques et conclusions 103

6 SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS ET CONCLUSIONS

6.1 Typologie globale végétation - nappe - sol 117
6.2 Mise en évidence de zones à décalages fonctionnels 118
6.3 Courbe optimale de régulation des eaux du lac 119
6.4 Évolution potentielle des milieux naturels 121
6.4.1 Conséquences possibles d'une autre régulation 121
6.4.2 Cycles biogéochimiques, embroussaillement 123
6.5 Principaux résultats et conclusions générales 125
6.6 Prolongements souhaitables de l'étude 134

7 BIBLIOGRAPHIE 149

1 INTRODUCTION GENERALE

1.1 Généralités

1.1.1 La Correction des eaux du Jura et son impact sur l'environnement

Au cours de ce dernier siècle, d'importants travaux ont été entrepris en Suisse dans le but d'éviter les débordements périodiques de certains cours d'eau. Parmi les entreprises remarquables, il convient de citer les deux Corrections des Eaux du Jura, c'est-à-dire l'aménagement des eaux des lacs de Bienne, de Neuchâtel et de Morat, et en conséquence la modification du fonctionnement hydrologique des plaines alluviales voisines (Seeland). Ces corrections ont entraîné d'importantes modifications de l'amplitude et de la périodicité des variations des niveaux des lacs. Ces dernières dépendent encore toujours, toutefois de façon différente, des conditions naturelles (pluies, fonte des neige), mais elles peuvent dorénavant être contrôlées à l'aide d'un barrage situé à Nidau-Port.
Aujourd'hui, les exigences quant à ces variations sont contradictoires selon les intérêts concernés: production d'énergie électrique, transport et naviguation fluviale, protection de la nature, protection des populations riveraines, pêche et agriculture. C'est pourquoi ces variations font l'objet d'un règlement de régulation, dont la dernière version (règlement 1980/82) a été approuvée provisoirement par le Conseil fédéral le 19 avril 1983. Par la suite, la définition précise des contraintes sectorielles a entraîné la réalisation de plusieurs études d'impact qui doivent toutes aboutir à des propositions de régulation du lac. Une intégration de l'ensemble de ces résultats permettra d'optimiser cette régulation.
L'étude partielle concernant les effets de la régulation des lacs subjurassiens sur la végétation et le milieu fait l'objet du présent rapport.

1.1.2 Conception du rapport

Ce rapport a été conçu de manière à permettre une utilisation souple des résultats et conclusions présentés. Il est formé:

- d'un texte de base
- d'annexes, comprenant notamment les rapports des travaux sous-traités
- des plans sur papier et informatisés des 15 transects.

Les rédacteurs en sont MM. Dr A. Buttler, Dr P. Cornali et M. Bueche.

Le texte de base situe d'abord le mandat dans son contexte administratif puis en rappelle la problématique et les objectifs, et présente la conception du projet (chapitre 1). Les travaux préparatoires, spécialement en ce qui concerne le choix des transects, leur nivellement et la géophysique, sont présentés dans le chapitre 2. Puis suivent les présentations des méthodes et des résultats des investigations phytosociologiques, pédologiques et hydrodynamiques, en particulier la modélisation des flux souterrains et la piézométrie (chapitres 3, 4 et 5). Le chapitre 6 fait la synthèse des principaux résultats: typologie fonctionnelle végétation-nappe-sol, mise en évidence de décalages fonctionnels, courbe optimale de régulation des eaux du lac et évaluation des conséquences possibles d'une autre régulation. La bibliographie fait l'objet du chapitre 7.

Neuf annexes sont ajoutées au texte. Elles comprennent notamment les rapports originaux des travaux sous-traités, comme la géophysique et la modélisation des flux souterrains, de même qu'un travail de diplôme.

Les plans sur papier des 15 transects sont livrés avec le rapport, de même qu'une copie de ces données informatisées.

1.2 Le mandat

1.2.1 Le projet global

A l'occasion de la mise en application du règlement 1980/82 de régulation des lacs de Neuchâtel, Bienne et Morat, le Conseil fédéral a invité les cinq cantons riverains à en étudier les effets dans tous les domaines potentiellement sensibles. L'Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE) a été chargé de coordonner ces études.

La Division principale Protection de la nature et du paysage de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) a été chargée d'examiner le point de vue de la protection de la nature sur la rive sud du lac de Neuchâtel, en collaboration avec les Services cantonaux concernés (Vaud, Fribourg, Neuchâtel, Berne et Soleure). Cette procédure a abouti à la mise sur pied du projet d'étude des effets de la régulation des lacs subjurassiens sur la végétation et le milieu.

Parallèlement, d'autres Services fédéraux ont initié des projets d'étude d'impact. Le Laboratoire de Recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich a étudié les répercussions du règlement 1980/82 sur l'environnement, ceci sur mandat de la Commission intercantonale de surveillance de la 2ème Correction des eaux du Jura. Pour cela, un modèle hydrologique des trois lacs subjurassiens a été développé. La souplesse du modèle y est testée en fonction des critères de régulation comme la production hydroélectrique, l'agriculture et letourisme notamment. C'est aussi ce mandataire qui est responsable de la direction générale des projets, ainsi que de l'étude d'optimisation qui doit intégrer les contraintes des différentes études sectorielles.

Le Service fédéral des améliorations foncières, ainsi que les Services cantonaux correspondants, ont mandaté le Département de génie rural de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne pour examiner le point de vue de l'agriculture. Le rapport final de cette étude hydro-agricole a été rendu public en 1990.

D'autres études ont encore été initiées dans ce contexte, après le début de nos travaux: étude de l'impact sur l'avifaune riveraine, réalisée par l'Institut de zoologie de l'Université de Fribourg (mandat de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage et de l'Office fédéral de l'économie des eaux, AEBISCHER 1993), étude de l'impact sur les poissons menée par le bureau Aquarius de Neuchâtel (mandat de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage et de la Commission intercantonale de la pêche sur le lac de Neuchâtel, AQUARIUS 1993)

Signalons encore que, de façon indépendante du contexte d'étude précédent, la Commission de gestion du Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel (GEG) a mandaté le laboratoire de Recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich pour étudier l'érosion des rives (HUBER 1993, LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES DE l'EPFZ 1990 et 1993). Ces rapports ont été livrés et actuellement des aménagements de lutte contre l'érosion sont à l'étude, en collaboration avec les cantons de Vaud et de Fribourg.

1.2.2 L'étude d'impact sur la végétation et le milieu

L'actuel règlement de régulation des lacs de Neuchâtel, Bienne et Morat (règlement 1980/82) prévoit le maintien d'une cote optimale voisine de 429,40 m en été, et proche de 429,00 m en hiver.

Le rôle que joue la régulation du niveau des lacs pour la végétation et la faune a déjà été signalé au Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie par la Commission intercantonale de la pêche et de la chasse dans le lac de Neuchâtel, dans sa lettre du 22 mars 1979.
Mais l'impact global de la régulation des trois lacs subjurassiens sur les milieux naturels riverains n'avait pas encore été pris en compte. Or, comme le montre le catalogue des problèmes et de l'impact de la régulation sur l'environnement dressé en décembre 1983 par Pro Natura Helvetica, les contraintes liées à la protection de la nature sont nombreuses puisqu'elles relèvent en particulier de la végétation, de la faune, de l'érosion du rivage et de l'entretien des marais. En apparence, elles semblent parfois contradictoires et on ne connaît pas, à l'heure actuelle, les relations exactes entre le régime des eaux des lacs subjurassiens et ces domaines.

En avril 1985, à la demande de la Division principale Protection de la nature et du paysage de l'OFEFP, un programme d'étude multidisciplinaire "Effets du règlement de régularisation 1980/82 sur l'environnement - Propositions d'étude concernant les problèmes de protection de la nature" est présenté par le Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel (Pro Natura Helvetica). Préparé par les Instituts de botanique des Universités de Neuchâtel et de Lausanne, l'Institut de zoologie de l'Université de Fribourg, le bureau AONL à Nidau, le Laboratoire de Recherches hydrauliques, hydrologique et glaciologique de l'EPFZ à Zürich et le Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel, cette proposition d'étude n'a pas été retenue par la Commission intercantonale de surveillance de la 2ème Correction des eaux du Jura.

A la demande du même service de l'OFEFP, un projet réduit, intitulé "Etude des effets de la 2ème Correction des eaux du Jura sur la végétation et le milieu" (avec abandon des aspects faunistiques, hydrochimiques, d'érosion et d'entretien), a été proposé en août 1988. Présenté par le Professeur J.-M. Gobat, du Laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie de l'Université de Neuchâtel, ce projet a été préparé conjointement par MM. J.-M. Gobat, J.-L. Moret (Institut de botanique systématique et de géobotanique de l'Université de Lausanne, Prof. P. Hainard), M. Rollier et C. Roulier (Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel, Champ-Pittet). Ayant également reçu l'appui de la Commission de gestion du Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel, ce projet a finalement été accepté. C'est en raison de retards administratifs qu'il n'a pu démarrer qu'en janvier 1990.

1.2.3 Organisation administrative du projet

Le projet est financé par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (mandant), par la Commission intercantonale de surveillance de la 2ème Correction des eaux du Jura (cantons de Vaud, Fribourg, Berne, Soleure et Neuchâtel, présidence M. R. Merki), par le Service de la conservation de la faune du canton de Vaud (responsables M. J.-P. Reitz, puis Ph. Gmür) et par le Service de la protection de la nature du canton de Fribourg (responsable M. M. Achermann).

L'étude des effets de la régulation des lacs subjurasiens sur la végétation et le milieu est un mandat attribué à l'Université de Neuchâtel (Institut de botanique, Laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie) par la Division principale Protection de la nature et du paysage de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).

Direction générale des projets d'études liés au règlement de régulation de la 2ème Correction des eaux du Jura:

- M. Dr. A. Kühne, Laboratoire de Recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich.

Responsable administratif de l'étude "Effets de la régulation des lacs subjurassiens sur la végétation et le milieu":
- M. Prof. J.-M. Gobat, Directeur du Laboratoire d'écologie végétale et de phyto-sociologie de l'Institut de botanique de l'Université de Neuchâtel.

Chef de projet:
- M. Dr. A. Buttler, Université de Neuchâtel.

Chercheur-coordonnateur:
- M. Dr. Ph. Cornali, Université de Neuchâtel.

Chercheur permanent:
- M. M. Bueche, Université de Neuchâtel.

Collaborateurs-chercheurs occasionnels:
- M. Chr. Le Nédic, Université de Lausanne,
- Mme B. Werffeli, Université de Neuchâtel,
- M. R. Douard, Université de Neuchâtel,
- Mme S. Güsewell, GEG Champ-Pittet,
- Mme R. Falella, GEG Champ-Pittet,
- Mme S. Waekerlig, GEG Champ-Pittet,
- M. F. Bolle, GEG Champ-Pittet.
- Mme. M. Fuchs, GEG Champ-Pittet.

Dessin technique:
- Mme I. Amez-Droz, Université de Neuchâtel.

Correction du manuscrit et mise en page du rapport:
- Mme I. Orsi, Université de Neuchâtel.

Secrétariat:
- Mmes C. Bettinelli et M. Kurz, Université de Neuchâtel.

Comptabilité:
- Mme M. Donzé, MM. S. Camponovo et D. Anthoine, Université de Neuchâtel.

Collaborations pour la sous-traitance:
- MM. Prof. I. Müller et Silvio Cuccodoro, Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel,
- M. J.-M. Carrard, Bureau d'ingénieur géomètre H. Pillonnel, Estavayer-le-Lac,
- M. Dr. P. Perrochet, Département de génie rural de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne,

Soutien logistique:
- M. M. Rollier et collaborateurs du Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel, GEG, Champ-Pittet,
- Sous-commission scientifique de la Commission de gestion du Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel, GEG, Champ-Pittet.

1.2.4 Commission d'experts

Pour suivre les travaux scientifiques et jeter un regard critique sur les options prises au cours du mandat, une commission d'experts a été mise sur pied. Celle-ci s'est réunie trois fois. Les procès-verbaux des séances sont à disposition à l'Université de Neuchâtel.
Les experts sont les suivants:

M. Dr. Aldo Antonietti, OFEFP/BUWAL, Division protection de la nature et du paysage, Hallwylstrasse 4, 3003 Berne.

M. Raymond Lebeau, OFEFP/BUWAL, Division protection de la nature et du paysage, Hallwylstrasse 4, 3003 Berne.

M. PD. Dr. Otto Wildi, Institut fédéral de recherches FNP/WSL, 8903 Birmensdorf.

M. Prof. Frank Kloetzli, Geobotanisches Institut ETH, Zürichbergstr. 38, 8092 Zürich.

M. Christian Roulier, Service-conseils zones alluviales, Buron 12bis, 1400 Yverdon.

M. Michel Antoniazza, Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel GEG., Champ-Pittet, 1400 Cheseaux-Noréaz.

M. Prof. André Musy, Département de Génie rural, Institut IATE - Hydrologie, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Ecublens, 1015 Lausanne.

M. Jean-Louis Moret, Musée et Jardin botanique, Av. de Cour 14 bis, 1014 Lausanne.

M. Dr. Michel Gratier, Service de l'aménagement du territoire, Place de la Riponne 10, 1014 Lausanne.

M. Marius Achermann, Service de la protection de la nature, Département des travaux publics, Chancellerie de l'Etat de Fribourg , 1700 Fribourg.

M. Prof. Dietrich Meyer, Institut de zoologie de l'Université de Fribourg, Pérolles, 1700 Fribourg.

M. Dr. Jean-François Matter, Institut für Wald- und Holzforschung, Fachbereich Waldbau, ETH-Zentrum, 8992 Zürich.

M. Jean-Blaise Zaugg, Bureau Aquarius, Biologie de l'environnement, Fays 47, 2001 Neuchâtel.

1.3 Présentation du milieu

1.3.1 Situation géographique

La rive sud du lac de Neuchâtel et le lac du même nom (alt. topogr. 429.31 m, coordonnées à "La Motte": 559.290/198.620) font partie d'un paysage que l'on nomme souvent région des trois lacs. Celle-ci touche trois grands ensembles géomorphologiques:

- au nord, la chaîne du Jura par le pied sud du premier anticlinal;
- au centre, la dépression subjurassienne avec les lacs de Neuchâtel, Bienne et Morat ainsi que les plaines alluviales de l'Orbe, de la Broye et du Seeland;
- au sud, la partie NW du bassin molassique.

Les trois lacs subjurassiens communiquent entre eux par les canaux de la Broye et de la Thielle. Ils appartiennent au bassin du Rhin par l'intermédiaire de l'Aar.

Longue de 42 km avec une surface de plus de 2000 ha, la rive sud du lac de Neuchâtel s'étend entre le ruisseau du Buron près d'Yverdon et le canal de la Thielle du côté de Cudrefin. Du point de vue géopolitique, 4 cantons se partagent la rive : 21 km pour le canton de Vaud, 17 km pour le canton de Fribourg, 4 km pour le canton de Berne et quelques décamètres pour le canton de Neuchâtel.

1.3.2 Situation géologique

La rive est essentiellement taillée dans le bassin molassique: molasse de l'Aquitanien (Oligocène) et du Burdigalien (Miocène). La description géologique est donnée par BECKER (1973). Cet auteur distingue des grès et des vases argilo-calcaires bigarrées dans la molasse d'eau douce inférieure (Aquitanien). Dans la molasse marine supérieure (Burdigalien) il décrit des grès à "méga flasers", des grès coquilliers et des grès gris-verts. La molasse du Burdigalien apparaît surtout dans la région de Cheyres où elle était exploitée autrefois.
Au contact de la dépression lacustre, ces roches sont brusquement érodées et forment des falaises ou de fortes pentes boisées qui dominent la rive. L'érosion de la falaise a eu pour conséquence la formation de la beine lacustre, constituée essentiellement de sables et de limons. Par endroits, toutefois, c'est un plancher de molasse qui remplace les dépôts lacustres meubles. Il n'est alors pas rare de trouver de minces placages morainiques (Würm) et en particulier de gros blocs erratiques. Au contact du lac, sous l'effet des vagues, les sédiments meubles forment fréquemment un cordon littoral.
La zone riveraine entre aussi en contact avec les plaines alluviales à la hauteur d'Yverdon (Plaine de l'Orbe), d'Yvonand (Plaine de la Mentue) et de Cudrefin-La Thielle (Seeland). Les dépôts quaternaires y sont d'origine lacustre (argiles, limons et sables à Unios). A l'extrémité NE du lac, la rive est touchée par les anciennes tourbes du Seeland (dépôts limno-palustres).

1.3.3 Le climat

Nous nous bornerons ici à une brève présentation. Des informations plus complètes sur le climat de la région des lacs subjurassiens peuvent être trouvées chez SPINNER (1933), QUARTIER (1948), BOUET (1985) et SOLLBERGER (1974), lequel cite de nombreux travaux de GUYOT, DE PERROT et SANDOZ sur le climat de Neuchâtel. JORNOD publie annuellement un rapport sur le climat de Neuchâtel dans le Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles.

Rappelons simplement que le climat régional est défini comme "climat pluvial subocéanique" par SPINNER (1933) ou comme climat tempéré subissant les influences alternantes du climat océanique et du climat continental, le lac tendant à égaliser l'effet de ces deux influences (SANDOZ 1949 in: SOLLBERGER 1974).

Le tableau 1.1 (BUTTLER 1990) et les cartes de l'Atlas de la Suisse du Service topographique fédéral (IMHOF 1965/78) permettent de caractériser le climat de la région et de comparer entre elles les stations météorologiques les plus proches pour les moyennes annuelles des principaux paramètres climatiques. On constate ainsi que:

- le pourtour du lac de Neuchâtel constitue une zone privilégiée du point de vue de la température, particulièrement en hiver. La rive sud, cependant, est légèrement défavorisée, comme le montre l'atlas phénologique de la floraison de la dent-de-lion: dès le 10 avril à Neuchâtel, dès le 20 avril sur la rive sud;
- les précipitations sont un peu plus importantes sur la rive nord (particulièrement en hiver) que sur la rive sud, malgré un nombre moyen de jours de pluie identique (120 à 130 jours). Cela s'explique par la proximité de la chaîne du Jura;
- la durée moyenne d'insolation relative est faible en hiver en raison des brouillards fréquents sur le Seeland.

Les diagrammes ombrothermiques de la figure 1.1 (BUTTLER 1990), permettent de visualiser les écarts moyens mensuels entre les trois stations considérées. On voit ainsi que l'écart moyen de 0.7 °C entre les températures moyennes de Payerne et Neuchâtel est remarquablement constant. En ce qui concerne les précipitations, on remarque que les

valeurs des trois stations diffèrent surtout en automne et en hiver, et que Witzwil occupe pour l'essentiel une position intermédiaire.

1.3.4 Situation historique

Le paysage récent des rives du lac de Neuchâtel doit son existence à une intervention humaine de taille: la Correction des eaux du Jura. Les travaux de LUDI (1935) et MUELLER (1973) nous montrent ce que fut la région du Seeland depuis la dernière glaciation.

A la fin de la dernière glaciation et après le retrait du glacier du Rhône (vers 15.000 av. J.-C.), il se forma un immense lac ("Lac de Soleure") derrière la moraine frontale laissée par le glacier près de Soleure et Wangen. Avec une altitude d'au moins 450 m, ce lac s'étendait sur une longueur de 100 Km jusqu'à La Sarraz et était principalement alimenté par l'Aar et la Broye.
Par suite de l'érosion de la moraine frontale, le niveau du grand lac s'abaissa progressivement pour atteindre à peu près le même niveau qu'aujourd'hui vers 11.000 av. J.-C. (soit 429 m), ce qui eut pour conséquence la subdivision en trois lacs. A cette époque également, l'Aar déplaça son lit en direction de Soleure, tandis qu'un éboulement dans le flanc nord du Jensberg (en aval de Bienne) boucha la Thielle, émissaire du lac de Bienne, et provoqua une hausse subite des trois lacs de 4,5 m et, corrolairement, d'importantes inondations.
Puis, jusqu'en 5.000 av. J.-C., le niveau des lacs s'abaissa jusqu'à la cote de 430 m sous l'effet de l'érosion du verrou du Jensberg. Pendant ce temps l'Aar, qui rejoignait la Thièlle à Meienried, déversait d'importantes quantités de sables et limons en aval d'Aarberg, ce qui provoqua une surélévation de la plaine. C'est pourquoi, avec l'effet conjugué d'une augmentation de la pluviosité, l'Aar quitta son lit pour se diriger vers le lac de Neuchâtel (5.000 av. J.-C.). En conséquence le niveau des lacs monta brusquement de 3 à 4 mètres et d'autres inondations suivirent.
Dès cette époque et jusque vers 1300 av. J.-C., l'Aar se dirigea tantôt vers l'ouest à travers le Grands Marais, avec à chaque fois d'importantes inondations (niveau moyen des lacs de 430 m et crues atteignant la cote de 432,40 m), tantôt vers l'est du côté de Meienried (niveau moyen des lacs de 427,30 m et crues atteignant la cote de 428,95 m).
Vers 1300 av. J.-C., le lac de Neuchâtel atteignit sa cote minimale de 427,30 m (période des habitations palafittes), le barrage du Jensberg s'étant considérablement érodé sous l'effet du courant de la rivière. Et lorsque finalement l'Aar joignit son delta à celui de l'Emme pour obstruer la vallée entre Meienried et Soleure, le niveau des lacs remonta peu à peu pour atteindre la cote de 431,85 m en 1878, date du début des effets de la 1ère Correction des eaux du Jura.

A cette époque le Seeland constituait une mosaïque de milieux plus ou moins humides avec des accumulations de tourbe ou des amoncellements de sable et de limon, offrant ainsi un espace gigantesque à de nombreuses espèces végétales et animales.
Sur la rive sud du lac de Neuchâtel, les vagues érodaient encore la falaise de molasse pour former une large beine lacustre. Mais pour assainir les plaines alluviales du Seeland et de l'Orbe (mise en culture d'une surface de 400 km2), on entreprit de 1868 à 1888 les grands travaux de la 1ère Correction des eaux du Jura qui eurent comme effet un abaissement du niveau du lac de Neuchâtel de 2,7 mètres.

Les principales interventions furent (MUELLER 1959, 1973, RICHARD 1982, OFFICE FEDERAL DE L'ECONOMIE DES EAUX 1984, BUTTLER et al. 1985, fig. 1.2):

- le détournement de l'Aar dans le lac de Bienne par le canal du Hagneck;
- la canalisation des cours d'eau entre Nidau et Büren ainsi qu'entre les lacs de Morat, Bienne et Neuchâtel;
- le drainage des sols.

Parallèlement, ce fut aussi l'apparition de 2000 ha de vasières le long de la rive sud du lac de Neuchâtel et donc la création d'un biotope refuge pour les espèces végétales et animales chassées du Grand Marais.

Une 2ème Correction des eaux du Jura fut entreprise de 1965 à 1973. Par l'élargissement des canaux existants, l'aménagement des rives de l'Aar après Büren et la régulation des débits dans les centrales hydro-électriques construites sur l'Aar et la Sarine, on réussit à stabiliser le niveau des 3 lacs.

1.3.5 Le niveau du lac de Neuchâtel et le réseau hydrographique

Plusieurs auteurs ont déjà abordé la question hydrologique du lac de Neuchâtel (LUDI 1935, QUARTIER 1948, MUELLER 1973, SOLLBERGER 1974). Nous nous bornerons à relever les points importants, en particulier pour la végétation de la zone riveraine.

Avec sa superficie de 221,1 km2 à la limite de la terre ferme et 214,6 km2 pour l'eau libre à l'altitude de 429,31 m, le lac de Neuchâtel comporte une zone littorale importante de 58,9 km2, ce qui équivaut à 26,6 % de la superficie totale du lac (SOLLBERGER 1974). C'est surtout la rive sud qui présente une beine très développée, d'où l'importante zone marécageuse.

Le niveau du lac est régi principalement par les pluies et par le jeu de charge et décharge des affluents et de l'unique émissaire qu'est le canal de la Thielle. Sur les 79 affluents que compte le lac et qui représentent un bassin d'alimentation de 2672 km2 (dont 248,2 km2 pour les surfaces lacustres de 6 lacs), on peut en citer 8 dont les bassins de réception représentent à eux seuls 2118,9 km2 (79,3 % de la surface - SOLLBERGER 1974). Il s'agit des canaux de la Broye et de la Thielle, de l'Areuse, de la Mentue, du Seyon, de la Serrière, de l'Arnon, et du Buron.
Si le lac de Neuchâtel est le troisième de Suisse en étendue, il n'est que le cinquième au point de vue de la surface de son bassin d'alimentation. Par conséquent, l'apport moyen d'eau est relativement faible: environ 61 m3/s dont 59 % en provenance du Jura, 27 % du bassin molassique, 10 % des précipitations sur le lac et 4 % du lac de Bienne par le refoulement de l'émissaire (QUARTIER 1948). On constate ainsi la faible dépendance des eaux alpines.

L'exportation de l'eau se fait par l'évaporation (8,4 %) et surtout par l'unique émissaire qu'est le canal de la Thielle (91,6 % - QUARTIER 1948). Finalement, les variations du niveau du lac au cours de l'année dépendent surtout des précipitations tombant sur le bassin de réception du lac ainsi que du niveau du lac de Bienne. En effet, ce dernier varie considérablement en fonction des crues de l'Aar et de la régulation du barrage du Port à Nidau. Lorsque le canal de la Thielle refoule, les eaux du lac sont piégées (excepté lorsque la Broye refoule en direction du lac de Morat, ce qui est très rare) et le niveau du lac monte rapidement (QUARTIER 1948). SOLLBERGER (1974) indique des hausses maximales de 24 cm en 24 heures durant la période 1930-1961 mais rejette l'idée d'une relation de causalité avec le refoulement du canal de la Thielle.

Il est nécessaire de préciser ici que la description du mouvement général des eaux du lac appelle des distinctions importantes liées à la Correction des eaux du Jura. On doit en effet considérer 3 périodes:

1) La période avant la 1ère Correction des eaux du Jura (avant 1868, date du début des travaux qui ont duré jusqu'en 1888);
2) La période entre la première et la seconde Correction des eaux du Jura (entre 1888 et 1965, date de la seconde étape des travaux qui se sont terminés en 1973);
3) La période après la seconde Correction des eaux du Jura (après 1973).

Avant la 1ère Correction des eaux du Jura le lac était "sauvage", dans la mesure où il réagissait naturellement aux divers phénomènes capables de faire varier son niveau. Pour la période de 1817 à 1868 le niveau moyen du lac a été de 432,01 m avec un maximum de 433,35 m et un minimum de 431,01 m. Les variations moyennes étaient de 1,18 mètres (QUARTIER 1948).
La figure 1.3 (BUTTLER 1987) montre les niveaux moyens mensuels du lac à cette époque (période 1817-1856, valeurs de KOPP in: QUARTIER 1948). On constate que le régime naturel du lac correspondait à des hautes eaux au printemps (fonte des neiges sur le Jura) et à des basses eaux en automne (cours d'eau à l'étiage). C'est en automne et au début de l'hiver que le lac montrait de fortes crues.
Entre les deux Corrections des eaux du Jura et plus précisément pour la période 1889-1940, le niveau moyen a été de 429,28 m, soit 2,73 mètres plus bas qu'avant la 1ère Correction des eaux du Jura. Le maximum a été de 431,01 m et le minimum de 428,22 m. Les variations moyennes étaient de 1,49 mètres, donc supérieures à celles d'avant la 1ère Correction des eaux du Jura (QUARTIER 1948). La fig. 1.3 (BUTTLER 1987) montre les niveaux moyens mensuels du lac durant la période 1914-1943 (valeurs de QUARTIER 1948). Par rapport à la période 1817-1856, on constate que la période des hautes eaux intervient plus tard, c'est-à-dire en été (influence, par l'Aar, de la fonte des neiges dans les Alpes), et celle des basses eaux en hiver. Les crues, en revanche, pouvaient avoir lieu en tout temps selon le climat et la régulation du barrage à Nidau.
Depuis la seconde Correction des eaux du Jura, le niveau moyen du lac est de 429,31 m (429,22 m pour la période 1973-1982). Ce niveau moyen, de même que les niveaux moyens mensuels (fig. 1.4 - BUTTLER 1987) n'ont guère été modifiés par la 2ème Correction des eaux du Jura. En revanche les fluctuations du lac ont nettement diminué. De 3 mètres elles ont passé à 1,8 mètres. L'amplitude moyenne des variations est maintenant inférieure à 1 mètre (LSPN/WWF 1980). De plus, comme le montre la figure 1.4, les niveaux moyens mensuels varient moins à l'heure actuelle d'une année à l'autre.

1.3.6 Valeur écologique des milieux naturels

Végétation

La végétation naturelle de la rive sud du lac de Neuchâtel a fait l'objet de plusieurs travaux phytosociologiques qui en montrent bien la diversité: GIRARDET (1926), BERSET (1949/50), KELLER (1969/70), ROULIER (1980, 1983), PRADERVAND (1981), LACHAVANNE (1982), LACHAVANNE et al. (1986), BUTTLER (1987), OIHENART et al. (1987, 1988), BUTTLER & GALLANDAT (1989), LSPN (1989, 1991, 1993), CORNALI (1992), GALLANDAT et al. (1993), BUECHE (en préparation) et LE LEDIC (en préparation). Nous donnons ici la liste des principales unités de végétation décrites par ces auteurs.

1) Groupements aquatiques des étangs *(Lemnion minoris, Sphagno-Utricularion, Potamogetonion pectinati, Nymphaeion albae)*
2) Roselière *(Phragmitetum communis)*
3) Associations à massettes *(Typhetum angustifoliae et Typhetum latifoliae)*
4) Prairies à grandes laiches *(Caricetum elatae, Cladietum marisci, Caricetum ripariae)*
5) Groupement à *Juncus subnodulosus*
6) Prairie à choin *(Orchio-Schoenetum nigricantis)*
7) Prairie à petites laiches *(Ranunculo-Caricetum hostianae)*
8) Groupements pionniers des zones dérangées *(Nanocyperion, Eleocharition acicularis)*
9) Prairie à molinie *(Molinietum coeruleae fragmentaire)*
10) Saulaie *(Salicion albae)*
11) Aunaies *(Alnetum incanae, Fraxino-Alnetum glutinosae)*
12) Ripisylve de transition
13) Végétation des lisières *(Salici-Viburnetum)*
14) Végétation des dunes et pseudoroselière

15) Pinède *(Molinio-Pinion).*
16) Forêt de chêne

Cette végétation riveraine se répartit approximativement comme suit: 300 ha pour les forêts de pente, 800 ha pour les forêts riveraines, 400 ha pour les prairies marécageuses à grandes laiches, 180 ha pour les prairies marécageuses à petites laiches, 200 ha pour les étangs et les roselières.

La typologie de ces milieux a été précisée récemment avec la cartographie des zones alluviales d'importance nationale (GALLANDAT et al. 1993), ainsi qu'avec la nouvelle cartographie des marais non boisés entreprise par le Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel (CLERC, à paraître).

Faune

Une liste complète des travaux effectués sur la rive sud du lac de Neuchâtel figure dans LSPN (1994).

1.3.7 Dynamique, gestion et entretien des marais

A peine âgée d'un siècle, la rive sud du lac de Neuchâtel pose déjà de nombreux problèmes. D'une part elle est soumise à une forte pression socio-économique, et d'autre part l'évolution naturelle des zones sauvages va parfois à l'encontre des objectifs fixés par la protection de la nature. La valeur inestimable de ce paysage naturel est ainsi mise en péril (OFFICE FEDERAL DES FORETS 1976, MULLER et al. 1977, LSPN 1979 a, b, c, 1980, RICHARD et al. 1982, BUTTLER 1983).

Certaines modifications sont, au moins en partie, les conséquences involontaires d'interventions humaines comme l'eutrophisation des eaux, l'érosion et l'atterrissement des marais. Il faut rappeler à cet égard que, si les grèves du lac ont une origine artificielle (1ère Correction des eaux du Jura), l'apparition puis l'évolution de leurs marais furent pratiquement naturelles, du moins dans un premier temps. Mais depuis une vingtaine d'années, l'eutrophisation croissante des eaux du lac (lac eutrophe jeune selon LACHAVANNE in: LSPN/WWF 1980, mais la tendance est favorable depuis une dizaine d'années, selon les données hydrochimiques) et la stabilisation de son niveau (2ème Correction des eaux du Jura) jouent un rôle déterminant dans l'évolution des marais. Les mécanismes de cette dégradation sont présentés dans GRUENIG (1980), BINZ (1980) et BUTTLER (1983).

L'atterrissement des sols, qui résulte naturellement de la forte productivité de ces milieux et de l'accumulation de litière sur ou dans le sol, s'accompagne d'une modification progressive de la flore (et de la faune) jusqu'à un stade évolutif ultime marqué par la forêt riveraine.
Cette transformation du milieu a été accélérée par l'eutrophisation du lac, c'est-à-dire par l'enrichissement de l'eau en matières fertilisantes. Cette eutrophisation est également à l'origine de l'affaiblissement des roselières et, corrélativement, d'une plus grande exposition des rives à l'érosion.

La stabilisation du niveau du lac lors de la 2ème Correction des eaux du Jura représente également un facteur important de la modification du paysage riverain: en empêchant les inondations printanières on a favorisé le développement des groupements végétaux évolués. L'amplitude maximale des variations du lac ne permet plus le curage naturel des étangs, lesquels se comblent progressivement, et ne s'oppose plus à l'embroussaillement des prairies marécageuses. De plus, les cordons littoraux formés à la suite de la rupture de l'équilibre du rivage (1ère Correction des eaux du Jura) semblent particulièrement déstabilisées depuis que l'érosion par les vagues se fait régulièrement sur un même front.

A la manière des vagues, ces formations se déplacent lentement vers l'intérieur du marais. La présence de végétation sur le cordon littoral freine ce développement sans le stopper toutefois.
Cette évolution vers les milieux boisés est encore plus rapide dans le cas des prairies moins humides, où l'abandon de l'utilisation traditionnelle en prés à litière a favorisé l'auto-fumure des sols et, par conséquent, le changement de composition botanique. Dans ce cas, le développement des espèces ligneuses accélère encore l'assèchement des sols et fait perdre au milieu ses caractéristiques palustres.

D'autres altérations résultent de la volonté d'intensifier l'exploitation sylvicole ou de convertir des surfaces improductives en zones résidentielles ou de loisirs. Tous ces facteurs se conjuguent et entraînent un appauvrissement de l'écosystème, en particulier une banalisation des marais, tant du point du vue floristique, faunistique que paysager.

Quelques chiffres approximatifs peuvent donner une image du rythme de la dégradation (LSPN/WWF 1980) :

- l'urbanisation a occupé la zone riveraine au rythme moyen de 4,6 ha/année pendant 100 ans;
- l'érosion a enlevé en moyenne 1,5 à 2 ha/année de marais pendant les 40 dernières années (et progressera de façon irréversible jusqu'à la molasse selon les rapports sur l'érosion de la rive sud du lac de Neuchâtel (LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES DE L'EPFZ, 1990, 1993), à moins d'interventions de protection);
- l'embroussaillement atteint un stade difficilement réversible à raison de 3 à 4 ha/année.

Parallèlement, l'intensification de l'exploitation agricole et sylvicole de l'arrière-pays isole progressivement l'ensemble lacustre de son milieu complémentaire.

La nécessité d'une intervention rapide et intégrée est devenue manifeste. Dans ce but, Pro Natura Helvetica (LSPN + WWF) a établi, en collaboration avec les cantons intéressés, un plan de protection et d'aménagement de la rive sud du lac de Neuchâtel (LSPN/WWF 1980) dont l'objectif général vise la conservation des milieux naturels dans leur état et dans leurs dimensions actuels avec, en priorité, le maintien des marais non boisés et des étangs. Ce plan définit 5 zones à vocations différentes et débouche sur un ensemble de mesures d'intervention qui se situent sur 3 plans:

1) Stabilisation des pressions négatives qui s'exercent sur les milieux naturels (tourisme, battellerie, dragage, réseau routier);
2) Aménagement, par une réglementation d'utilisation des zones, par des installations diverses pour la faune, par l'épuration des eaux et par l'information du public;
3) Entretien, par la lutte contre l'érosion et le feu, la régulation du niveau du lac, le recreusage d'étangs, le décapage et rajeunissement des sols, le débroussaillage, le fauchage, la protection des roselières, le traitement approprié des forêts, la revitalisation des forêts alluviales et de certains cours d'eau, et la surveillance scientifique (inventaires et monitoring).

De nombreux travaux ont été effectués dans cette optique: OFFICE FEDERAL DES FORETS (1976, 1983), MULLER et al.(1977), LSPN (1979 a, b, c, d, e, f, 1980, 1981), LSPN/WWF (1980), ANTONIAZZA et al.(1980 a, b), GOBAT et al. (1980), RICHARD et al. (1982), MEYER et al. (1982), SERVICE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE DES CANTONS DE VAUD ET FRIBOURG (1982), PERFETTA et al. (1993), OVERNEY & MOTTIER (1990), LE NEDIC et al. (in press), MUELHAUSER et CLERC (in press). D'autres références peuvent être trouvées dans LSPN (1994).

A l'heure actuelle la protection des milieux naturels de la rive sud du lac au titre de réserves naturelles n'est pas généralisée, mais le Plan directeur de la rive sud du lac de Neuchâtel et des rives du lac de Morat, qui résulte d'un accord entre les cantons de Fribourg et Vaud, prévoit la généralisation de l'affectation en zones protégées des zones naturelles. Ce plan fut approuvé en même temps que fut signé une convention, en 1982, entre la Ligue suisse pour la protection de la nature (LSPN), le WWF et les cantons de Vaud et Fribourg, pour attribuer à la LSPN la gestion de ces zones naturelles. Pratiquement, c'est le Groupe d'étude et de gestion (GEG) qui est chargé d'exécuter les tâches attribuées à la LSPN par la convention. Ce travail se fait sous la surveillance d'une commission de gestion et de trois sous-commissions (scientifique, forestière et d'information). D'importants moyens financiers sont consacrés à ces buts par les partenaires à la convention, ainsi que par la Confédération. Dans le cadre de cette convention, un groupe d'étude sur l'érosion a encore été créé.

Récemment, de nouvelles bases légales de la Confédération sont venues confirmer ou compléter les dispositions cantonales. Il s'agit de:

- l'ordonnance sur la protection des zones alluviales d'importance nationale;
- l'ordonnance sur la protection des haut-marais et des marais de transitions d'importance nationale;
- l'ordonnance sur la protection des bas-marais d'importance nationale;
- l'ordonnance sur les réserves d'oiseaux d'eau et de migrateurs d'importance internationale et nationale (OROEM);

L'importance internationale de l'ensemble de la rive est également inscrit dans la Convention de Ramsar.

1.4 Problématique et objectifs de l'étude

1.4.1 Généralités

La présence d'une nappe d'eau ainsi que son comportement constituent les facteurs écologiques prépondérants pour l'établissement et le maintien des marais sur la rive sud du lac de Neuchâtel.

Si quelques zones sont visiblement indépendantes des fluctuations du lac, la plupart des marais non boisés ainsi qu'une faible partie des forêts riveraines y sont liés. L'influence du lac se traduit soit par des **inondations directes des sols**, notamment en périodes de crues et sur les terrains avoisinant la rive, soit par **des flux d'eau agissant sur les nappes phréatiques** même lorsque le niveau du lac est bas.
La **topographie (ou microtopographie)** des terrains revêt une importance toute particulière dans ce système hydrologique, de même que la **nature géologique du sous-sol** et la **perméabilité des sols.**
Compte tenu de la faible perméabilité du substrat molassique, parfois affleurant, ou de certains sédiments fins, **l'engorgement des sols par les pluies**, voire par les ruissellements de pied de falaise, contribue aussi de façon significative au développement de l'écosystème palustre.

Selon les relations hydrologiques avec le lac, la végétation est de nature différente et remplit des fonctions écologiques spécifiques (en particulier celle d'écotone de l'interface terre/eau - NAIMAN & DECAMPS 1990) aux conséquences diverses, notamment sur la biodiversité, sur l'accumulation de la matière organique et sur l'épuration des eaux du lac (effet filtre). Les populations animales sont aussi réglées par ces relations (nourriture, reproduction, abris pour oiseaux, poissons, insectes, etc.).

Mentionnons également que, selon les conditions hydrodynamiques, la végétation est capable de faire évoluer le milieu très rapidement (atterrissement des sols humides et embroussaillement). Dans la mesure du possible, **cette évolution doit être contrôlée** afin de maintenir les milieux naturels riverains. Conformément au plan de protection et d'aménagement de la rive sud du lac de Neuchâtel, élaboré par Pro Natura Helvetica en collaboration avec les cantons intéressés (LSPN/WWF 1980), **l'objectif est de conserver les marais dans leur état et dans leurs dimensions actuels, avec en priorité le maintien des marais non boisés et des étangs**.

Ainsi, une rupture de l'équilibre entre le lac et les milieux soumis à son influence aurait pour effet une dégradation rapide et importante des communautés animales et végétales vivant dans cet écosystème ou en dépendant partiellement.
Dans ce contexte, assurer la conservation de milieux souvent très sensibles implique de pouvoir répondre aux questions fondamentales suivantes:

1) Quelles sont, au cours de l'année, les **limites de la nappe lacustre** par rapport à la situation topographique et géologique (nature du substrat), et quels effets cela entraîne-t-il sur les sols et sur les groupements végétaux au cours des saisons biologiques?

2) Existe-t-il des **zones à altitude critique** où la nappe ne correspond plus au milieu végétal et pédologique (décalage fonctionnel) en raison des modifications hydrologiques liées à la deuxième Correction des eaux du Jura?

Pour ce faire, il est nécessaire d'étudier de manière détaillée différents cas de figures (transects) de manière à pouvoir **modéliser le fonctionnement** des principaux systèmes hydrologiques. En simulant divers **scénarios**, il devient finalement possible **d'évaluer plus précisément l'impact de la régulation en vigueur** aujourd'hui, c'est-à-dire de répondre aux questions:

1) Quelle est la **courbe de régulation annuelle du niveau du lac qui convient le mieux aux besoins de la végétation actuelle** et qui permet de conserver l'équilibre de l'écosystème vu sous l'angle de la végétation et des sols?

2) Quelles seraient **les conséquences sur la végétation et le milieu de toute autre régulation**?

1.4.2 Les travaux scientifiques déjà effectués

Parmi les travaux récents en botanique et zoologie on peut citer BERSET (1949/50), KELLER (1969/70), BRANCUCCI (1979), ANTONIAZZA (1979), ANTONIAZZA (1980), HAENNI (1980), AFFOLTER et al. (1981), PRADERVAND (1981), MEYER et al. (1982), LACHAVANNE (1982), ROULIER (1980,1983), BUTTLER et al. (1985), AUROI et GRAF-JACCOTTET (1985), AUROI (1986), DORTHE (1986), GAPANY (1986), LACHAVANNE et al. (1986), WITTWER (1988), MUELHAUSER (1988), BUTTLER & GALLANDAT (1989), LSPN (1989), BUTTLER & GOBAT (1991), BUTTLER (1983, 1985, 1987, 1990, 1992), CORNALI (1992), BUECHE et al. (1994), PERROCHET et al. (à paraître), BUECHE (en préparation), CLERC (en préparation), LE NEDIC (en préparation).
De nombreuses publications concernent l'aménagement du territoire et la gestion des marais (voir références au point 1.3.7). En 1976, l'Office fédéral des forêts mandatait les Universités de Lausanne et Neuchâtel ainsi que l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich pour l'établissement d'une carte de la végétation de l'ensemble de la rive. En raison des changements intervenus depuis lors, cette cartographie est en train d'être refaite totalement

(CLERC, à paraître). Au niveau suisse nous pouvons citer quelques travaux importants sur les milieux humides de bas-marais: KOCH (1926), WILLIAMS (1968), LEON (1968), KLOETZLI (1969), YERLY (1970), LANG (1973), EGLOFF (1986), MARTI (1994). De ces travaux on peut reprendre quelques éléments pour la compréhension de l'écologie des milieux, en particulier des marais non boisés, concernés prioritairement par notre problématique.

Dynamique de la végétation

Pour comprendre la dynamique de la végétation, il est nécessaire de séparer la succession autogène, venant de la végétation elle-même, de la succession allogène qui est déclenchée par un phénomène extérieur à la végétation (VANDEN BERGHEN 1982). Sur la rive sud du lac de Neuchâtel, on observe les trois phénomènes suivants:

1) La **zonation** intervient quand par exemple, la topographie engendre un gradient écologique par rapport au niveau de la nappe dans le sol. Elle est tout-à-fait évidente partout où la végétation se développe en position surélevée par rapport au reste du marais. C'est le cas des dômes de molasse (et parfois de sable) qui hébergent généralement de *l'Orchio-Schoenetum nigricantis* et du *Molinietum coeruleae*. Si le terrain est en pente douce, cette zonation est moins frappante et la transition d'une association à l'autre se fait par des stades intermédiaires au sens phytosociologique;

2) La **succession autogène** est provoquée par la végétation lorsque celle-ci engendre une modification des facteurs biotiques (p. ex. la compétition) ou abiotiques. Ce dernier cas peut être illustré en milieu infra-aquatique par l'accumulation de vase et de tourbe qui élève peu à peu le niveau du sol par rapport à la nappe, ce qui permet l'établissement de nouvelles espèces et associations végétales. L'assèchement est accéléré avec l'arrivée des arbustes;

3) La **succession est allogène** quand la végétation s'est transformée sous l'action d'un facteur exogène, par exemple à la suite de l'assèchement des sols consécutivement à la seconde Correction des eaux du Jura. Dans ce cas, les transformations du régime hydrique ont eu des conséquences sur l'équilibre floristique de la végétation située à une altitude critique par rapport à la zone de battement du lac. C'est ainsi que l'on peut expliquer la présence de *Cladium mariscus* sur des terrains relativement secs ainsi que l'embroussaillement des marais dans certaines régions.

Dans les trois cas il est possible d'avoir des stades de végétation intermédiaires. Ceux-ci ne sont définis que par rapport à la flore et n'indiquent pas forcément le type de dynamique.

Selon le principe d'évolutions progressives marquées principalement par l'affranchissement de l'eau (hydrosère), des modèles de succession autogène de la végétation ont été proposés pour la rive sud du lac de Neuchâtel. Evidemment que, sur le terrain, les unités de végétation s'agencent souvent de façon très particulière puisque les trois phénomènes évoqués plus haut peuvent intervenir.
Dans le cas des sédiments meubles profonds, on distingue une série évolutive débutant en milieu infra-aquatique *(Potamogetonion, Nymphaeion, Phragmitetum communis, Caricetum elatae*, avec évolution possible vers *l'Alnetum glutinosae)*, et une série évolutive supra-aquatique (groupement pionnier à *Carex Oederi* et *Scirpus Tabernaemontani, Orchio-Schoenetum nigricantis* et *Molinietum coeruleae*, avec évolution possible vers *l'Alnetum incanae* et le *Fraxinetum)*. Le *Cladietum marisci*, lui, présente un statut particulier qui relève de la large amplitude écologique de *Cladium mariscus* et de son fort pouvoir compétitif. Plutôt qu'à une association végétale au sens strict, cette végétation

correspond à un stade d'envahissement du *Caricetum elatae* et de *l'Orchio-Schoenetum nigricantis*. Sur molasse affleurante, cette succession est un peu différente (absence du *Caricetum elatae*) et conduit soit à la pinède, dans les situations les plus sèches, soit à *l'Alnetum glutinosae* dans les dépressions ou zones influencées par les écoulements de pied de falaise.

Hydrodynamique

Selon la nature du sous-sol, les conditions hydriques sont très différentes. Sur les socles surélevés de molasse, la nappe est temporaire, d'origine pluviale et de ruissellement de pied de falaise. Sur les sédiments meubles plus ou moins profonds, elle est permanente et d'origine phréatique. Dans ce dernier cas, la nappe est élevée, stable ou fluctuante, mais avec des inondations importantes, notamment par le lac, dans les sols de la série évolutive infra-aquatique. Elle est plus basse, très fluctuante mais sans inondation directe par le lac dans les sols de la série évolutive supra-aquatique. Ces conditions hydrodynamiques sont non seulement dictées par la nature du sous-sol (p. ex. présence de molasse imperméable en surface), le relief et la topographie (altitude par rapport au lac), mais également par la nature plus ou moins imperméable (texture) des horizons pédologiques.

Pédologie

Le rôle de la nappe est prépondérant pour la formation et l'évolution des sols. Il y a bonne correspondance entre la typologie des sols, la nature du sous-sol et le régime hydrique. Sur molasse affleurante on trouve essentiellement des pseudogleys primaires et des pararendzines à pseudogley, avec des humus allant de l'anmoor au mor calcique dans quelques pinèdes, tandis que sur les sédiments meubles on rencontre des gleys et des tourbes.
La série évolutive infra-aquatique est caractérisée par des tourbes et des gleys réduits à anmoor ou anmoor tourbeux, tandis que la série évolutive supra-aquatique l'est par des gleys oxydés humifères ou peu humifères, à humus du type hydromull ou mull.
Les décalages morpho-fonctionnels intervenus à la suite des "bouleversements écologiques" liés aux deux Corrections des eaux du Jura, ont été discutés par BUTTLER & GOBAT (1991).

Phytomasse et production végétales

Les plus grandes productivités aériennes sont mesurées dans les variantes du *Caricetum elatae* et du *Cladietum marisci* qui sont inondées par le lac et qui présentent un sol du type gley réduit à anmoor (ou anmoor tourbeux). L'accumulation de phytomasse est particulièrement importante dans les variantes humides du *Caricetum elatae*; elle se fait alors essentiellement sous forme de rhizomasse (forte capacité d'atterrissement des tourbes et des gleys réduits à anmoor tourbeux). Le *Cladietum marisci* concentre relativement plus de phytomasse dans les parties aériennes, notamment en raison d'une croissance continue durant l'année, ce qui, ajouté à l'amplitude écologique très large de *Cladium mariscus*, donne à cette espèce un pouvoir compétitif considérable.

Minéralomasse végétale et cycles biogéochimiques

Plus que les teneurs mesurables en éléments biogènes (nitrates, phosphates et potassium) dans les sols et les nappes, dont on sait qu'elles discriminent souvent mal des milieux pourtant très différents quant à leur productivité (BUTTLER 1992), ce sont surtout les flux d'éléments minéraux dans la végétation qui sont intéressants pour comparer les milieux et détecter l'influence des eaux du lac.
Ces flux sont, de façon générale, plus importants dans le cas des groupements végétaux de la série évolutive infra-aquatique. La demande nutritive, qui suit les mêmes tendances, est cependant particulièrement importante pour l'azote, le phosphore et le potassium dans le cas du *Caricetum elatae* qui est inondé par le lac (variante eutrophe). Nous n'avons pas

d'indications à ce sujet concernant les roselières de la rive sud du lac de Neuchâtel. Les groupements à *Cladium mariscus*, pourtant très compétitifs, n'envahissent pas le domaine écologique de la variante eutrophe du *Caricetum elatae* car cette végétation, et en particulier *Phragmites communis* et *Carex elata*, exploite alors mieux les ressources du milieu.

Conservation et gestion des marais

La grande diversité des milieux nécessite une gestion nuancée. Dans la plupart des cas, la régulation du niveau du lac constitue un facteur important pour la sauvegarde des marais. Si certains milieux sont indépendants du lac (topographie, imperméabilité des sédiments), d'autres présentent des nappes qui lui sont plus ou moins liées. Dans ce cas, le niveau du lac devrait être réglé de façon à satisfaire à la fois les exigences hydriques et nutritives des différentes associations végétales ou variantes d'associations.
Globalement et en première approximation, le niveau du lac devrait être réglé de façon à engendrer:

- des inondations directes temporaires par le lac et/ou indirectes par la remontée des nappes, selon les cas, dans les milieux de la série évolutive infra-aquatique, y compris les variantes sèches du *Caricetum elatae*;

- un niveau de nappe le plus élevé possible dans les sols des groupements végétaux de la série évolutive supra-aquatique.

1.4.3 Conception générale du projet

La figure 1.5 montre que, du point de vue hydrodynamique, la relation entre le lac et les milieux riverains relève de deux modèles:

1) Le modèle des **flux souterrains** qui fait intervenir les propriétés hydrologiques des sédiments (conductivité hydraulique, socle imperméable, épaisseur de l'aquifère, porosité de drainage) ainsi que les paramètres climatiques (ETP, EP, précipitations) en plus des situations topographiques mentionnées avec le modèle suivant;

2) Le modèle **topographique** qui intègre la relation d'inondation directe par le lac, en fonction des situations topographiques de la rive (altitude par rapport au lac, relief microtopographique, distance au lac, présence d'une dune imperméable ou d'une lagune, etc.).

Le type de végétation, ainsi que son état phénologique, induisent aussi des variations locales et saisonnières. De même, les écoulements de pied de falaise peuvent interférer avec l'action du lac.

La conception et l'organisation scientifique générales du projet sont illustrées schématiquement dans la figure 1.6. Par rapport aux deux modèles que sous-tend la relation hydrodynamique entre le lac et la rive, deux approches ont été privilégiées:

1) Une **modélisation hydrodynamique globale** qui doit mettre en évidence la **balance hydrologique théorique** (calculée) sur certains sites et permettre de simuler (scénarios) les limites potentielles de l'influence du lac via les flux souterrains;

2) Une détermination de la **balance hydrologique réelle** des sites, à l'aide d'**observations piézométriques**, et des limites spatio-temporelles de l'influence du lac par inondations directes. La typologie des milieux basée sur la

relation végétation-nappe-sol doit permettre de mettre en évidence les préférences écologiques des milieux (p. ex. le nombre de jours liés au lac) et de calculer des situations d'inondations optimales.

Cette approche est basée essentiellement sur **l'observation des phénomènes actuels dans la concordance des niveaux de nappe avec les tolérances hydrologiques de la végétation et des sols** (références bibliographiques et situations types sur la rive). Elle doit également permettre de faire ressortir les sites avec **décalages fonctionnels** sur le plan écologique, qu'ils résultent ou non de la deuxième Correction des eaux du Jura, et auxquels une amélioration de l'inondation par le lac pourrait être imposée.

L'interprétation et la généralisation des résultats obtenus par ces deux approches complémentaires permet d'obtenir finalement une **courbe de régulation optimale** du lac. Cette courbe optimale doit être pondérée de manière à ce que l'amélioration éventuelle du bilan hydrique en zone critique se fasse le moins possible au détriment d'autres milieux.

L'impossibilité technique et financière de conduire des investigations sur tout le périmètre de la zone riveraine nous a amené à choisir un plan d'échantillonnage qui permette une généralisation des résultats:

1. **Approche globale avec 30 transects** (échantillonnage hybride systématique-préférentiel, chap. 2.1) pour la sélection de 15 transects représentatifs de l'écosystème riverain (analyse statistique sur la base d'informations déjà connues concernant la géomorphologie, la géologie et la végétation);

2. **Approche détaillée sur 15 transects**, les plus représentatifs pour la caractérisation des situations géomorphologiques et écologiques (altimétrie, géophysique, phytosociologie, pédologie, hydrodynamique);

3. **Approche modélisatrice sur 3 transects** typiques pour la simulation hydrodynamique (scénarios de régulation du lac);

4. **Généralisation** des résultats et des modèles de fonctionnement pour l'établissement de propositions de régulation des eaux du lac assurant la conservation de l'écosystème riverain (courbe de variation optimale);

5. **Evaluation de l'incidence d'une régulation défavorable**, en rapport avec les diverses contraintes externes (intégration au modèle d'optimisation, coût écologique).

Ce concept laisse la possibilité d'une généralisation territoriale par adjonction ultérieure de sites d'études sur d'autres rives lacustres touchées par la 2ème Correction des eaux du Jura (lacs de Bienne ou de Morat).

Ces étapes sont reprises en détail ci-après, avec le découpage du travail sur les 5 ans de l'étude.

1) Approche globale (année 1)

L'approche globale a été réalisée sur 30 transects falaise-lac (jusqu'à 428,00 m) dans les zones naturelles ou semi-naturelles de la rive.

But: **sélection de 15 transects représentatifs** de l'écosystème riverain à l'aide d'une analyse statistique des informations déjà connues concernant la géomorphologie, la géologie et la végétation (cartes).

Choix des 30 transects: échantillonnage hybride systématique-préférentiel: 1 transect par 900 mètres de rive naturelle ou semi-naturelle. Selon les cas, l'échantillonnage préférentiel a été privilégié, notamment en fonction de la connaissance des lieux et leur intérêt biologique (végétation, faune, présence d'espèces sensibles, construction, accessibilité, etc.), des photographies aériennes (représentativité, homogénéité, topographie, cordon littoral, lagune, étang, ruisseau), de la bibliographie (cartes de végétation, études diverses) et de l'historique du site (niveaux du lac).

Méthode: analyse multivariable (chap. 2.1).

2) Approche détaillée (années 2 à 4)

L'approche détaillée concerne 15 transects sélectionnés parmi les 30 étudiés lors de l'approche globale.

But: **caractérisation des situations géomorphologiques et typologie écologique** sur les transects. Mise en évidence de groupements végétaux présentant un **décalage fonctionnel** avec la situation pédologique ou hydrologique (zones critiques).

Méthodes:

- nivellement topographique et altimétrie des 15 transects rectilignes;
- relevés stratigraphiques des transects par la méthode géophysique (sondages VLF-R, électrique et sismique, ainsi que carottages de surface);
- sondages pédologiques;
- détermination de la conductivité hydraulique sur le terrain;
- relevés phytosociologiques;
- relevés hydrodynamiques: piézométrie et niveaux du lac.

Résultats:

- dessins des 15 transects avec les niveaux topographiques et la nature du sous-sol, ainsi que mise en évidence des situations géomorphologiques concernant la géologie et la perméabilité du substrat (système fonctionnel du type molasse ou sédiments meubles, type de molasse, type de sédiments meubles), la topographie (relief, niveaux et distance par rapport au lac, cordons littoraux actuels et anciens, étangs, lagunes), l'hydrologie (écoulements de pied de falaise, ruisseaux, épaisseur de l'aquifère), et les éléments anthropiques (route, ligne CFF, fossés, etc.);
- typologie des sols et des humus;
- typologie de la végétation et limites des syntaxons sur le transect;
- typologie des nappes: courbes de variation, nombre de jours inondés et liés au lac, niveaux moyen, médian, maximum et minimum, fluctuations hebdomadaires et annuelles;
- définition de l'écologie des différentes unités de végétation eu égard au sol, à la nappe et au régime d'inondation par le lac (typologie globale), et détermination de l'impact des inondations directes du lac sur les marais. Détermination des préférences écologiques des unités de végétation et mise en évidence des zones à décalage fonctionnel;
- superposition sur plans des informations concernant la topographie, la géophysique, la végétation;

- sélection, pour la modélisation hydrodynamique, de 3 transects illustrant des situations écologiques typées avec éventuellement un décalage fonctionnel entre la végétation et les sols.

3) Approche modélisatrice (année 3)

La simulation du fonctionnement des nappes est réalisée sur 3 transects représentant des situations typiques.

But: établir, au cours de l'année et spécialement durant la période de végétation, **la relation entre le niveau de la nappe dans les sols, l'évapo-transpiration potentielle (ETP), les précipitations, la perméabilité des sols et le niveau du lac**.

Il est nécessaire d'établir cette relation car, durant la saison estivale, lorsque les nappes sont en profondeur et parfois même en dessous du niveau du lac, elles continuent d'être alimentées par ce dernier, qui compense ainsi partiellement l'ETP. Il est donc nécessaire de quantifier la réalimentation potentielle en fonction du niveau du lac. Il faut aussi tenir compte des précipitations qui peuvent resaturer rapidement certains sols peu perméables et faire remonter les nappes, assurant par là une certaine indépendance par rapport au niveau du lac.

Méthode:

- modélisation hydrodynamique et simulation des niveaux de nappe selon différents scénarios, notamment de la régulation du lac.

Résultats:

- simulation des courbes de variation des nappes en fonction de quelques scénarios de niveaux du lac, compte tenu des conditions climatiques saisonnières;
- simulation de différents régimes climatiques;
- simulation d'une succession d'années sèches;
- simulation d'une situation sans lac;
- calibration du modèle avec les données piézométriques;
- établissement, pour chaque scénario, d'un bilan piézométrique sur les différentes stations des trois transects testés.

4) Synthèse (année 5)

- **généralisation** des résultats et des modèles de fonctionnement pour l'établissement de **propositions de régulation des eaux du lac** assurant la conservation de l'écosystème riverain (courbe de variation optimale);
- **évaluation de l'incidence d'une régulation défavorable**, en rapport avec les diverses contraintes externes (intégration au modèle d'optimisation, coût écologique).

1.4.4 Adaptation du projet et organigramme de réalisation

Dans la phase de modélisation du fonctionnement de 3 ou 4 zones d'études, le projet initial prévoyait, après une phase de tests méthodologiques, un travail par surfaces représentatives de 5 à 10 hectares pour l'établissement de cartes écologiques informatisées. Cette démarche s'est révélée peu réaliste dans notre contexte, essentiellement en raison de problèmes techniques et financiers.

Des essais photogrammétriques ont montré en effet que la précision topographique (de l'ordre de quelques centimètres) nécessaire pour atteindre les objectifs du projet ne pouvait pas être garantie par cette technique, le couvert végétal empêchant le plus souvent la vision au sol. Pratiquement, il n'était pas davantage envisageable de faucher spécialement les zones d'étude. Compte tenu du rythme de fauchage triennal, il aurait alors fallu attendre trois ans pour disposer du jeu complet de photographies aériennes couvrant tout le périmètre soumis au fauchage.
En ce qui concerne la technique altimétrique, qui apporte en toute circonstance la précision souhaitée, des levés relatifs à l'ensemble des surfaces envisagées auraient été bien trop coûteux.
En conséquence l'approche par surfaces (5 à 10 hectares) a été réduite à sa forme linéaire, le transect, qui offre également d'intéressantes possibilités de modélisation. Il est bien entendu que cette démarche implique malgré tout certaines vérifications de l'homogénéité latérale (typologie des milieux, conductivité hydraulique, etc.) et la prise en compte, pour certains aspects de l'étude (piézométrie), des processus latéraux.

Une modélisation cartographique reste cependant souhaitable à plus d'un titre (entretien des marais, érosion), mais elle devrait être envisagée dans le cadre d'un projet complémentaire, plus ambitieux quant à la surface couverte. A l'occasion du travail de diplôme de M. M. Enggist, de l'Université de Genève, cet objectif a pu être partiellement réalisé par une étude spatiale dans un secteur de Cudrefin jouxtant un de nos transects (annexe 9).

Par rapport au projet d'exécution, la stratégie et l'intensité d'échantillonnage des transects ont encore dû être modifiées durant les travaux.
Après un premier essai de mesures altimétriques avec l'entreprise de géomètres H. Pillonnel, d'Estavayer-le-Lac, il est apparu que le devis de cette entreprise (Frs 40.000.- pour 30 transects) était nettement sous-estimé et que cette somme ne permettait un travail que sur 10 transects. En réorganisant les charges et en assumant une part importante du travail (fauchage de la végétation sur les transects, aide au bûcheron pour l'ouverture des tranchées forestières, assistance du géomètre), nous avons pu réduire le coût par transect. Parallèlement, une réduction du nombre de transects nous a également permis de modifier la péréquation financière entre géomètre et géophysicien.
Finalement, c'est le nombre de 15 transects au lieu de 30 qui a été retenu dans le projet pour la caractérisation des situations géomorphologiques. En conséquence, l'approche globale prévue au moyen des 30 transects le long de la rive a été réduite à une analyse statistique des informations connues (cartes de la végétation, géomorphologie, géologie) sur ces transects, et c'est sur cette base que 15 transects ont été sélectionnés (chap. 2.1).

Conformément au plan de travail du projet initial, l'étape suivante a consisté en une deuxième sélection permettant de retenir 10 transects représentatifs pour une approche écologique détaillée (végétation, sols, nappes).
Les données, plus complètes cette fois puisque s'y sont ajoutées les informations altimétriques et géophysiques, ont été traitées de la même façon que pour la première réduction de 30 à 15 transects. Comme précédemment, le choix a été opéré sur la base de critères statistiques mais aussi en fonction de diverses éléments complémentaires (annexe 1).
Toutefois, suite aux discussions menées avec les experts, il a été décidé de renoncer à cette sélection et de poursuivre les investigations sur 15 transects au lieu de 10, de façon à garder un maximum d'informations possibles, en compensation des simplifications qu'il a été nécessaire de faire en amont de la procédure de réduction par étapes. Cette solution a été rendue possible grâce à la participation bénévole du Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel, également intéressé par ces données, à la campagne de relevés piézométriques.

Finalement, il est encore nécessaire de préciser que la procédure de choix des transects à modéliser, sur la base des informations résultant de la typologie écologique, a été quelque peu bousculée puisque qu'il a fallu choisir prématurément trois transects. En effet, M. Dr. P. Perrochet, spécialiste de ces questions à l'EPFL, devant s'absenter à l'étranger pour une durée prolongée, il était impératif de commencer rapidement cette modélisation. Toutefois, grâce aux connaissances de terrain et à l'ensemble des informations déjà disponibles, ce choix a pu être effectué sans grandes difficultés, et son opportunité a été largement confirmée a posteriori.

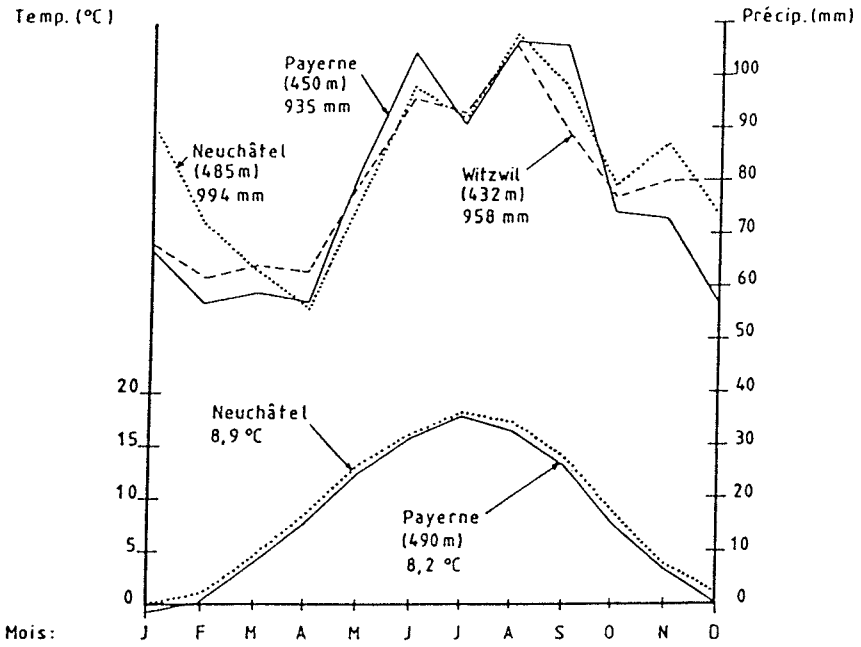


Figure 1.1 Diagrammes ombrothermiques de Neuchâtel et Payerne (moyennes 1931-1960), et précipitations à Witzwil (moyennes 1901-1960), selon Buttler (1990)

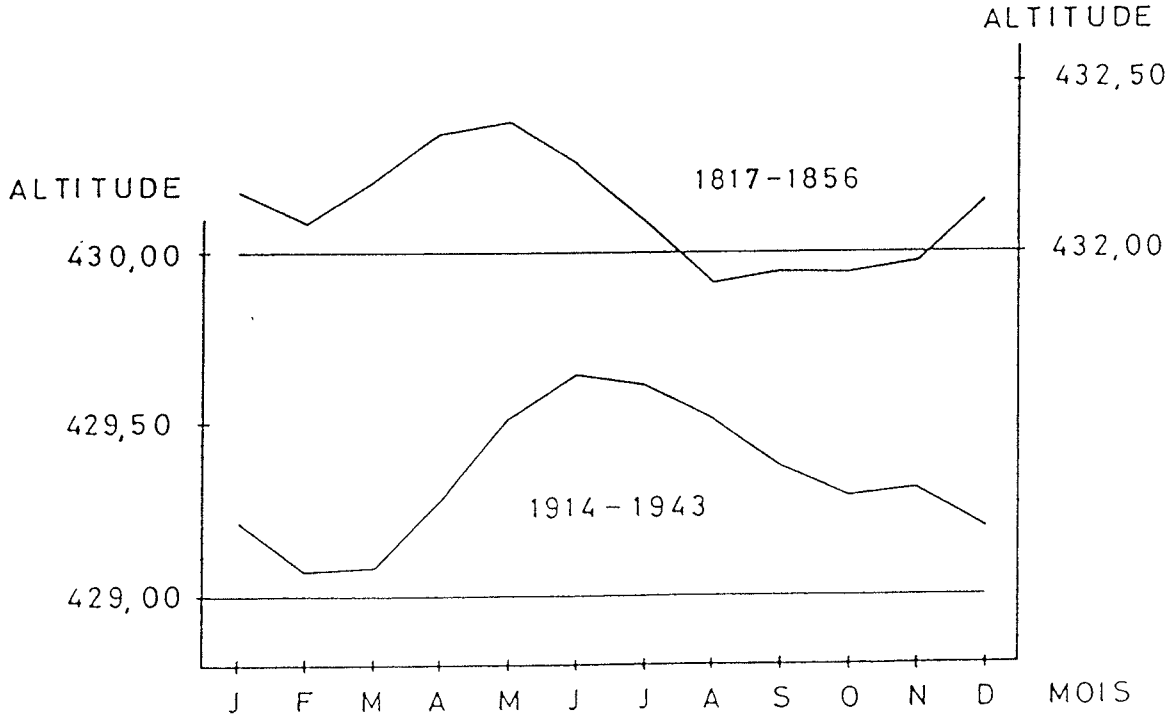


Figure 1.3 Niveaux moyens mensuels du lac de Neuchâtel avant la 1ère Correction des eaux du Jura (période 1817-1856) et après (période 1914-1943), selon Buttler (1987)

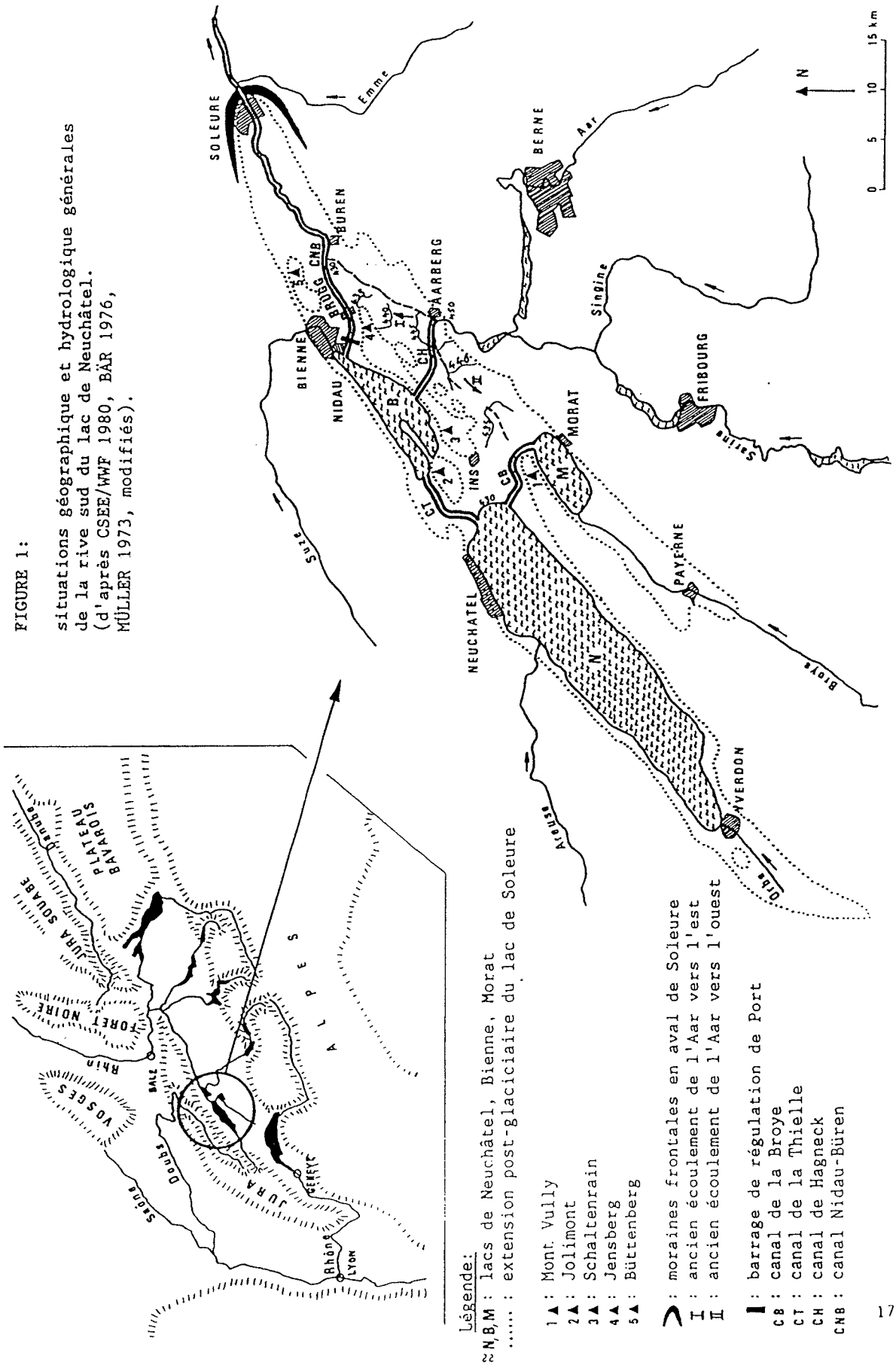


Figure 1.2 Les principales interventions de la Correction des eaux du Jura (extrait de Cornali 1992)

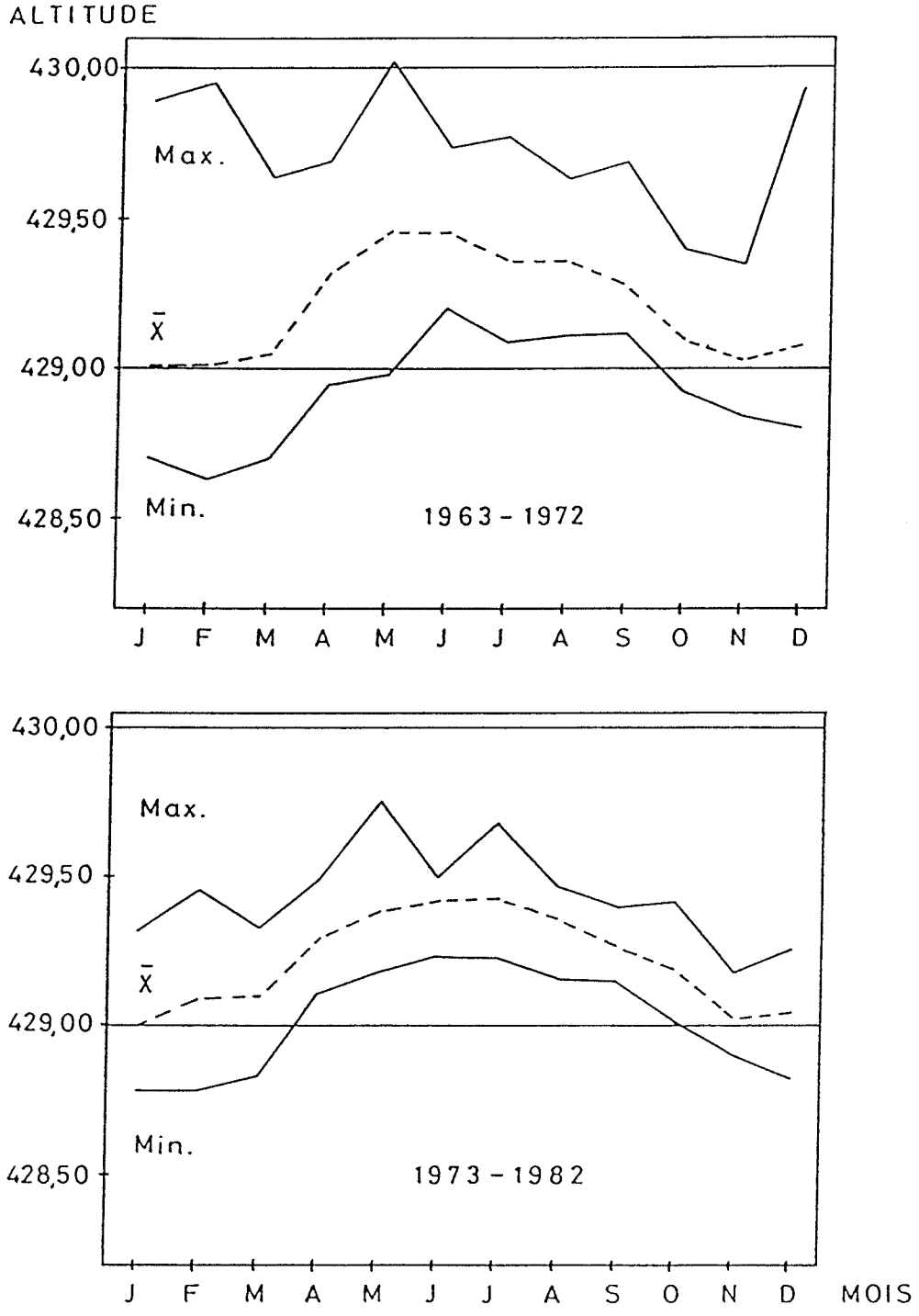


Figure 1.4 Niveaux moyens mensuels du lac de Neuchâtel avant et pendant la 2ème Correction des eaux du Jura (période 1963-1972) et après (période 1973-1982), avec valeurs extrêmes, selon Buttler (1987)

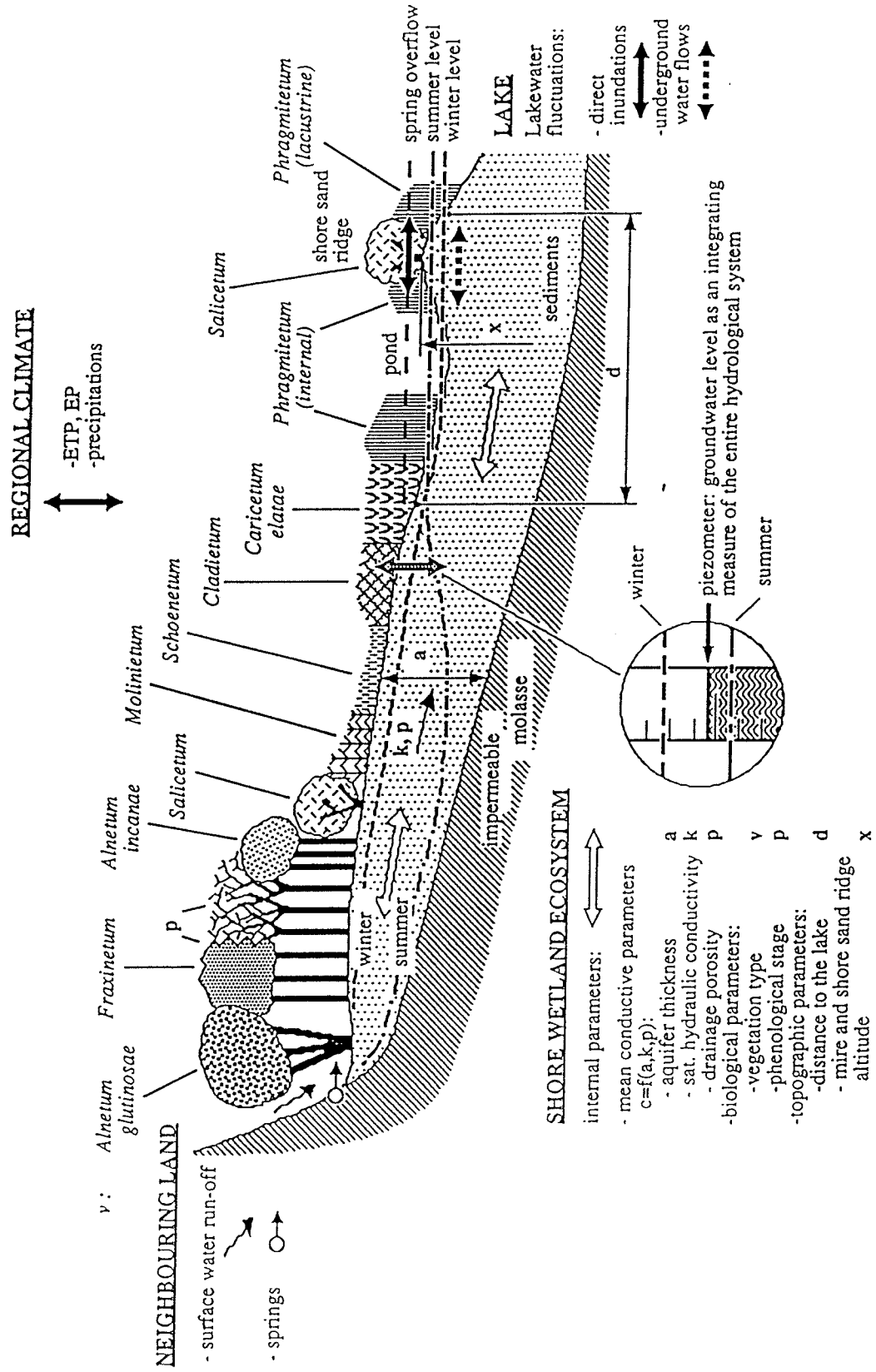


Figure 1.5 Modèle des relations entre le lac et le marais (Bueche et al. 1994)

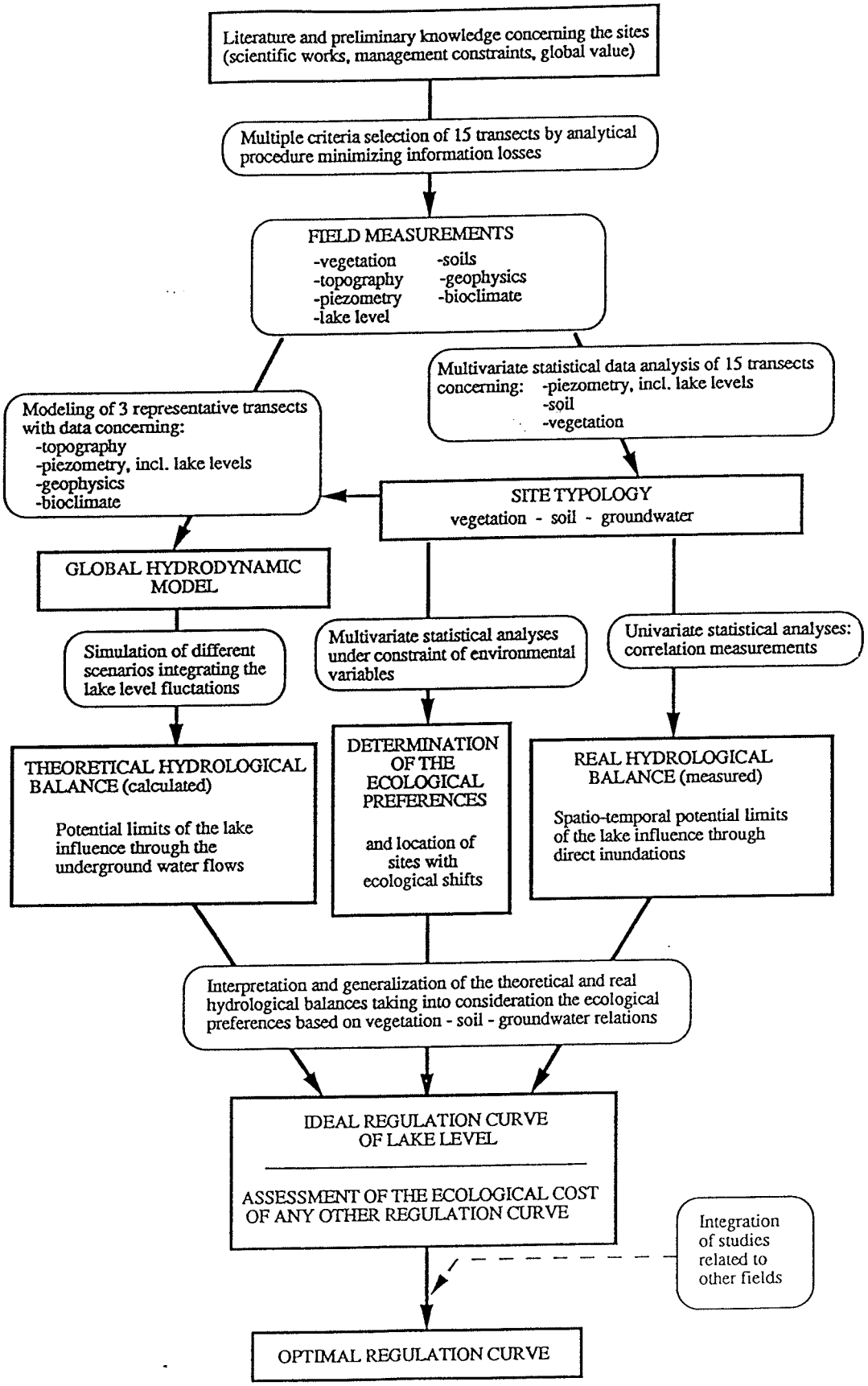


Figure 1.6 Conception et organisation scientifique du projet

Caractéristiques annuelles du climat régional

STATIONS METEOROLOGIQUES LES PLUS PROCHES	PAYERNE				NEUCHATEL				WITZWIL			
ANNEES	1983	1984	1985	NORME	1983	1984	1985	NORME	1983	1984	1985	NORME
Température moyenne (oC)	9,0	8,4	8,1	8,2	10,1	9,3	9,3	8,9	—	—	—	—
Temp. max. moyenne (oC)	13,7	12,8	13,0	12,7	14,3	13,4	13,7	13,0	—	—	—	—
Temp. min. moyenne (oC)	4,7	4,2	3,4	4,1	6,6	6,0	5,6	5,6	—	—	—	—
Précipitations (mm)	894	898	878	935	1042	908	841	994	953	902	871	958
Humidité rel. moyenne (%)	81	79	77	80	73	75	75	77	—	—	—	—
Rayonnement global (10^6 J/m2)	4199	4135	4372	—	4053	4074	4221	—	—	—	—	—
Ensoleillement (heures)	1562	1552	1751	—	1548	1581	1716	—	—	—	—	—

Tableau 1.1 Caractéristiques annuelles du climat régional, selon Buttler (1990)

2 TRAVAUX PREPARATOIRES

2.1 Choix des transects

2.1.1 Première sélection: 30 transects

A l'intérieur du périmètre d'étude entre Yverdon et le canal de la Broye, le projet prévoit une approche globale à l'aide de 30 transects lac-falaise, l'idée étant d'assurer ainsi une bonne représentativité spatiale, à défaut de pouvoir cartographier l'ensemble de la zone riveraine (cf. plan général et emplacement des transects d'étude). Pour positionner ces transects, seules les zones naturelles ou semi-naturelles, repérées à l'aide de la carte du plan de protection de la rive sud-est du lac de Neuchâtel (LSPN/WWF 1980), ont été retenues.
Sept secteurs géographiques, totalisant une longueur de 27,6 km, ont ainsi été pris en compte. Le souci d'une bonne représentativité spatiale nous a conduit à adopter, dans une première phase, un échantillonnage systématique, ce qui revenait théoriquement à placer le long de la rive un transect tous les 900 mètres. Mais la prise en considération d'autres critères tels que:

- l'intérêt biologique des milieux naturels (végétation, faune, présence d'espèces sensibles);
- la connaissance des lieux (constructions, accessibilité, effet de bordure, représentativité, homogénéité latérale, topographie, cordon littoral, lagune, étang, ruisseau, géomorphologie);
- la bibliographie (cartes de végétation, études diverses);
- l'étude historique des niveaux du lac et des photographies aériennes,

a nécessité, selon les cas, un échantillonnage préférentiel. L'ensemble des sites retenus a finalement été soumis pour approbation à quelques excellents connaisseurs de ces milieux, ce qui a permis d'optimiser le choix des emplacements.

Secteur	Zone géographique	Longueur de la zone naturelle (sans les zones témoins) km	Nombre de transects
A	Yverdon - Châble Perron	4	4
B	Yvonand - Cheyres	3,6	4
C	Cheyres - Font	2,7	3
D	Estavayer - Chevroux	5,5	6
E	Chevroux - Portalban	4,4	5
F	Portalban - Cudrefin	5,5	6
G	Cudrefin - Canal de la Broye	1,9	2
Total		27,6 km	30

2.1.2 Deuxième sélection: 15 transects

Introduction

Les difficultés techniques et financières déjà évoquées (cf. chap. 1.4.4) nous ont contraints à réduire le nombre de transects, initialement prévu à 30. Afin de pouvoir opérer un choix aussi objectif que possible, et pour bénéficier de critères rigoureux, nous avons utilisé des méthodes statistiques multivariables. Pour tous les transects, un inventaire des informations disponibles a été constitué (tab. 2.1), qui comprend la végétation (associations végétales), la topographie (falaise, dune, ruisseau, delta), les constructions humaines (routes, chemins, voie CFF), la géologie (molasse affleurante, sédiments meubles) et la longueur du transect. Pour la plupart, ces informations ont été extraites de la carte de végétation des marais non boisés de la rive sud du lac de Neuchâtel (OFFICE FÉDÉRAL DES FORETS 1976) et de la carte des zones alluviales d'importance nationale (GALLANDAT et al. 1993). Ces données ont été soumises à plusieurs analyses statistiques, notamment à l'analyse factorielle des correspondances et au groupement hiérarchique agglomératif à lien complet.
La procédure de sélection définitive s'appuie sur les analyses effectuées avec un fichier réduit aux seuls descripteurs phytosociologiques (excepté étang-lagune), cette variante offrant une courbe des niveaux de fusions du dendrogramme (fig. 2.1) plus favorable par rapport à nos contraintes de limitation.

Analyses statistiques et choix des 15 transects

Le graphe des niveaux de fusions (fig. 2.1) des groupes obtenus par la classification hiérarchique agglomérative permet de repérer un certain nombre de seuils pouvant être utilisés comme critères pour minimiser le perte d'information lors du regroupement des transects. En particulier, deux seuils significatifs déterminent le passage de 17 à 16 groupes, ainsi que de 9 à 8 groupes. Le nombre de 17 groupes offrant un compromis raisonnable par rapport aux contraintes mentionnées, c'est cette solution qui a été retenue.

A l'intérieur des groupes (tab. 2.1b), le choix du ou des transects s'est fait sur la base de critères supplémentaires, objectifs mais pas toujours quantifiables, et après discussions avec d'excellents connaisseurs des milieux considérés. De cette façon, il a aussi été tenu compte d'autres aspects ou contraintes tels que la gestion (fauchage, creusage d'étang), le degré d'artificialisation (zones militaires, zones de construction ou d'amarrages de bateaux), la recherche scientifique (zone d'étude du GEG, surveillance de la faune), la dynamique de la rive (érosion et envasement), l'accessibilité et la valeur globale du site. Cette démarche nous a amené à ne retenir, en définitive, que 15 transects.

GROUPES DE TRANSECTS	TRANSECTS RETENUS
Groupe I (transects 5 et 6): ces deux transects sont situés dans la zone entre Yvonand et Cheyres et présentent des caractéristiques assez semblables. Seul le transect 5 est retenu en raison de l'ampleur des phénomènes d'envasement dans la beine.	5
Groupe II (transect 7): ce transect (Yvonand) a été isolé dans l'analyse en raison de sa pauvreté. Il ne compte en effet qu'une modeste surface de marais non boisé, et une zone de villas occupe la place de la forêt riveraine. Il n'est pas retenu.	

GROUPES DE TRANSECTS	TRANSECTS RETENUS
Groupe III (transects 30 et 21): du point de vue de la végétation ces deux transects sont semblables. Toutefois, les deux sont retenus, le premier (Cudrefin) en raison d'une situation de delta rarement échantillonnée à laquelle s'ajoutent une belle roselière lacustre en remplacement de la dune et, plus rare, une prairie à molinie, le second (Portalban) en raison de la proximité d'un site de surveillance de la faune du GEG. De surcroît, cette dernière zone est relativement sous-échantillonnée.	**30, 21**
Groupe IV (transects 28 et 12): les deux transects présentent des zones perturbées comparables (villas, routes), mais le transect 12 (Estavayer-le-lac), nettement plus diversifié (pinède, roselière intérieure, dune boisée, moliniaie, proximité d'un ruisseau), est retenu.	**12**
Groupe V (transects 22 et 19): en raison de l'exceptionnelle situation de l'étang de Chevroux, c'est le transect 19 qui est retenu, au détriment du transect 22 qui présente des zones passablement perturbées.	**19**
Groupe VI (transects 29 et 20): le transect 29 (Cudrefin) est retenu en raison de la situation de delta, d'un double cordon littoral boisé (cordon fossile?) et d'une intéressante ripisylve de transition de lac. En outre, il est moins perturbé que le transect 20 (baie d'Ostende).	**29**
Groupe VII (transects 13 et 8): le transect 13 (Estavayer, La Corbière) est retenu car il présente une aulnaie noire de bas de falaise unique parmi tous les autres transects. Moins accessible, cette zone est davantage naturelle et présente en plus une moliniaie, une pinède et une roselière lacustre.	**13**
Groupe VIII (transect 10): ce transect est isolé dans l'analyse, essentiellement en raison de la présence simultanée d'une aulnaie blanche et d'une aulnaie noire. Le transect est retenu en tant que seul représentant du site globalement très important constitué par la Réserve de Cheyres.	**10**
Groupe IX (transects 4 et 3): le transect 4 (Châble-Perron) est retenu car il est plus diversifié en forêt (présence d'une pinède) et compte en plus un étang, une roselière intérieure ainsi qu'un ruisseau.	**4**
Groupe X (transect 15): ce transect (Autavaux, zone de tir) a été isolé dans l'analyse car il est uniquement forestier (essentiellement de la pinède). Visiblement surélevé par rapport au lac, ce transect peut être éliminé.	

GROUPES DE TRANSECTS	TRANSECTS RETENUS
Groupe XI (transects 1 et 2): le transect 2 est retenu en raison du caractère unique, pour la rive, des étangs de Champ-Pittet. D'autre part, ce transect a fait l'objet de tests altimétriques.	**2**
Groupe XII (transect 14): malgré sa roselière lacustre, ce transect essentiellement forestier est éliminé pour les mêmes raisons que le transect 15.	
Groupe XIII (transects 16 et 17): le transect 16 (Forel) est retenu car la végétation y est plus diversifiée et moins perturbée. Il présente notamment un double cordon de saulaie (dune fossile?) et une clairière à choin et molinie.	**16**
Groupe XIV (transects 26 et 18): les deux transects sont supprimés en raison du double emploi avec respectivement les transects 27 et 19, et compte tenu de la contrainte de ne pas dépasser 15 transects au total.	
Groupe XV (transect 25): ce transect (Chabrey-Champmartin) est retenu, son intérêt principal étant d'être associé à un système lagunaire, situation rare sur la rive.	**25**
Groupe XVI (transects 27, 11 et 9): les transects 9 et 27 sont retenus. Le premier en raison de l'opportunité de compléter les études de surveillance de l'avifaune qui se font dans ce secteur par le GEG, ainsi qu'en raison de la valeur globale du site. Le second en raison de son intéressante zonation de forêts (pinède, ripisylve de transition et aulnaie blanche).	**9, 27**
Groupe XVII (transects 23 et 24): comme les transects 25 et 27 ont été sélectionnés, c'est le transect 23 (Chabrey-Champmartin) qui est retenu pour préserver un bon échantillonnage spatial.	**23**

Le plan de situation annexé donne l'emplacement des 30 transects initialement choisis et, parmi eux, des 15 transects retenus. Leurs principales caractéristiques géophysiques et phytosociologiques sont illustrées dans les figures 2.2 a-c.

2.1.3 Troisième sélection: 10 transects

L'étape suivante du projet consiste en une troisième sélection destinée à ne retenir que 10 transects représentatifs en vue d'une approche écologique détaillée. Excepté une mise à jour des descripteurs rendue possible grâce au nivellement topographique et à l'étude géophysique (cf. chap. 2.2 et 2.3), la démarche adoptée reste, dans son principe, la même que pour le passage de 30 à 15 transects:

- quantification des descripteurs naturels et analyse multivariable (analyse statistique d'aide à la décision);

- prise en considération d'autres critères objectifs non quantifiables (connaissances d'experts des milieux considérés).

Il résulte de cette procédure que les 5 transects à éliminer sont les Nos 2, 10, 16, 25, et 29.

Toutefois, lors de la séance de commission d'experts au cours de laquelle ces résultats ont été présentés et discutés, certaines craintes ont été formulées quant au risque de perdre des informations intéressantes en cas d'abandon de ces sites d'étude. Pour pallier cet inconvénient, le Groupe d'étude et de gestion des rives du lac (GEG), également intéressé à la mise en valeur de ce type de données, a décidé d'assumer les relevés piézométriques sur les 5 transects compris entre Champ-Pittet et Cheyres. Cette contribution a permis de conserver les 15 transects issus de la deuxième sélection afin de les soumettre, comme prévu, à une investigation écologique détaillée (phytosociologie, piézométrie, pédologie), améliorant du même coup la définition des relations végétation - nappe - sol (typologie globale).
En raison de son abandon, cette troisième procédure de sélection n'est présentée qu'en annexe (annexe 1).

2.2 Nivellement et pose des piézomètres

Nous présentons brièvement l'ensemble des opérations de terrain qui ont été nécessaires à la mise en place du dispositif d'étude sur les 15 transects retenus. Pratiquement, les tracés sélectionnés sur cartes et photos aériennes lors de la procédure de réduction de 30 à 15 transects ont été concrétisés de la manière suivante:

Piquetage

Cette première phase a permis le choix du tracé définitif au contact des différentes unités de végétation, tout en respectant l'orientation choisie grâce à un guidage précis à l'aide de la boussole. L'utilisation du fond cartographique des zones alluviales d'importance nationale (GALLANDAT et al. 1993) s'est révélée d'un précieux concours.

Ouverture

Afin de réduire au maximum le nombre de stations de mesure, puis de faciliter les déplacements ultérieurs, les transects ont été ouverts à 2 - 3 m de largeur, depuis le pied de falaise jusqu'au lac. Les tranchées rectilignes, alignées au théodolite, ont été défrichées par un bûcheron pour la partie forestière, et débroussaillées mécaniquement par nos soins dans les marais.

Levé altimétrique

La partie technique de prise de mesure a été entièrement assurée par un géomètre du bureau Pillonel d'Estavayer-le-lac. Dans ce contexte, nous avons nous-mêmes choisi l'ensemble des points cotés en tenant compte des règles générales suivantes:

- une seule mesure par point, avec la mire posée délicatement de manière à n'être soumise qu'à l'action de son propre poids;

- la mesure est faite dans l'entre-touffe ou, dans le cas des roselières, sur l'entrelacs de rhizomes. Dans les étangs vaseux et sans sol, c'est le substrat minéral qui est mesuré. Quelques sommets de tourradons ont fait l'objet d'une mesure complémentaire indicative;

- l'intervalle des points de mesure a été déterminé de manière à restituer une bonne vue d'ensemble des surfaces régulières (pentes, replats) mais aussi tous les accidents de terrain évidents: ruptures de pente, anciens cordons littoraux, étangs, cuvettes, fossés, route, voie CFF. Les ornières, parfois profondes, dues au fauchage mécanisé des marais n'ont pas été prises en considération. Dans la mesure du possible, les limites grossières des groupements végétaux ont également été positionnées, ainsi que l'emplacement d'un piézomètre au minimum par groupement, parfois davantage lorsque ce dernier était très étendu;

- certains points ont été marqués à l'aide de piquets bien visibles: les piézomètres, les bornes d'extrémités (repères photogrammétriques) et les talons de stations de mesures, les points zéro de chaque transect (pied de falaise, ou obstacle artificiel en situation de delta). Pour les piézomètres, ce marquage a également permis d'éviter leur destruction lors des opérations de fauchage et d'entretien des marais.

Les coordonnées des premiers et derniers piézomètres de chaque transect figurent dans le tableau suivant:

Transect	Station	Coordonnées
2	2	182.100 / 541.525
	6	182.230 / 541.427
4	1	182.905 / 541.427
	10	183.102 / 542.870
5	1	183.480 / 547.540
	9	183.698 / 547.602
9	1	186.083 / 551.093
	16	186.435 / 550.778
10	1	186.798 / 551.898
	11	187.163 / 551.561
12	1	189.410 / 555.333
	10	189.743 / 555.130
13	1	190.659 / 556.595
	8	190.890 / 556.415
16	1	192.512 / 558.190
	7	192.740 / 558.043
19	1	193.887 / 560.156
	14	194.460 / 559.901
21	1	195.411 / 562.158
	10	195.135 / 561.805
23	1	197.079 / 563.775
	6	197.324 / 563.580
25	1	198.024 / 564.660
	6	198.141 / 564.570
27	1	199.238 / 566.164
	9	199.595 / 565.916
29	1	201.793 / 569.211
	9	201.988 / 569.035
30	1	202.535 / 570.210
	4	202.805 / 570.008
	10	202.980 / 569.635

Représentation graphique du levé altimétrique

Il entrait également dans les attributions du géomètre de livrer des plans détaillés de l'ensemble des levés de terrain. Sur la base de nos indications relatives aux modalités de

Représentation graphique du levé altimétrique

Il entrait également dans les attributions du géomètre de livrer des plans détaillés de l'ensemble des levés de terrain. Sur la base de nos indications relatives aux modalités de présentation (échelle, légende, lissage,...), les données informatisées ont été traitées par le programme AUTOCAD. Un tirage original sur papier a été réalisé aux échelles 1:50 (verticale) et 1:250 (horizontale), valeurs limites pour la lisibilité des zones à nombreux points de mesure. Sur le tirage définitif, nous avons reporté manuellement les données issues de l'investigation géophysique (épaisseur de l'aquifère jusqu'au niveau imperméable, classes de perméabilité).

Ainsi complétés, ces graphes représentent, en l'état, un outil de travail indispensable pour l'appréhension globale de chaque site d'étude. Ils ont par exemple permis d'évaluer de manière précise les altitudes moyennes des groupements (tab. 2.2 et fig. 2.3). Cette première image de la zonation altitudinale par rapport aux plages de battement du lac met en évidence, en termes d'influence potentielle du lac, des unités:

- **directement influençables**: roselières, marais à laiche des rives, marais à laiche élevée, groupement à massette;
- **occasionnellement influençables**: marais à petites laiches, groupement à marisque, prairie à molinie;
- **rarement influençables**: saulaie de manteau, aulnaie blanche, marais à choin;
- **jamais influençables**: ripisylve de transition (y. c. plantations), aulnaie noire, chênaie, pinède, frênaie à aulne noir et forêts non alluviales.

Il convient de remarquer en particulier l'écart important, au-dessus de 430 m, qui sépare les unités forestières aujourd'hui indépendantes de l'influence du lac des autres groupements situés à une altitude inférieure.

Pose des piézomètres

Pour les besoins de l'étude géophysique (cf. chap. 2.3), nous avons posé dans chaque groupement d'importance une première série de piézomètres (tubes PVC noirs de diamètre 5 cm, crépinés sur toute la longueur, fermés par un capuchon aux 2 extrémités). Dans ses conclusions, l'hydrogéologue auteur de l'étude met en évidence l'insuffisance de ce type de matériel, notamment en ce qui concerne les possibilités de détection des nappes captives. Nous avons donc décidé de compléter cette installation initiale de manière à pouvoir répondre aux questions suivantes:

- nature de la nappe mesurée: nappe perchée ou captive;
- dynamique de ces nappes: origine et importance des recharges et des pertes;
- effet réel des cordons littoraux: liaison directe avec le lac ou liaison retardée.

En conséquence, nous avons posé une deuxième série de piézomètres répondant mieux aux exigences d'une étude plus poussée de l'aquifère sur chaque transect: pose battue de piézomètres gris de 2,5 cm de diamètre (diamètre réduit afin d'améliorer le temps de réponse) et dont le crépinage est limité et adapté à l'observation de nappes captives ou superficielles, à diverses profondeurs (fig. 2.8). Cette pose a été effectuée en excluant la partie des transects située sur molasse et au-dessus de la zone d'influence du lac. Pour un point donné, le nombre de piézomètres a parfois été doublé ou triplé en fonction de la superposition de matériaux à perméabilités différentes. Dans ce cas, une description lithologique plus fine a également été effectuée de manière à pouvoir caractériser, le cas échéant, deux nappes indépendantes.
Au total, l'équipement des 15 transects comprenant 131 sites a nécessité la pose de 125 piézomètres de 5 cm de diamètre et 162 piézomètres de 2,5 cm de diamètre, ainsi que de 4 règles graduées pour le suivi des niveaux d'eau des étangs (transects 2, 5, 19 et 25). Les caractéristiques techniques de ce matériel figurent dans l'annexe 2.

Lors de la pose des piézomètres de petit diamètre, des sondages supplémentaires à la tarière ont été réalisés partout où l'étude géophysique présentait des données manquantes (milieux inondés, nouveaux transects).

La campagne de mesures hebdomadaires couvre une période de 63 semaines.

2.3 Géophysique

Préambule

Ce chapitre présente un résumé de l'étude géophysique figurant en annexe (annexes 3a et 3b), ainsi que des explications concernant le report des données géologiques sur les coupes topographiques livrées par le géomètre. La problématique liée à la mise en place du dispositif piézométrique y est également évoquée.

2.3.1 Résumé de l'étude géophysique

Introduction

Cette étude géophysique a pour but de caractériser la lithologie des premiers mètres de sédiments et d'estimer leur conductivité hydraulique. De plus, une série de mesures piézométriques hebdomadaires effectuées sur un mois, ainsi qu'un chapitre spécial sur la réserve de Châbles, complètent ce travail. Un exemple de transect géophysique est donné dans la fig. 2.4.

Structure de l'étude

Les résultats sont présentés sous forme de fascicules (un par transect) intitulés "Coupes, commentaires et logs de sondages". Ils comprennent une carte de situation, un plan des points de mesure avec coupe géophysique et coupe des perméabilités (voir fig. 2.4), le tout accompagné de commentaires. Les logs (descriptions lithologiques) effectués lors de la pose des piézomètres font l'objet de fiches descriptives (voir fig. 2.5). Certains transects sont accompagnés de mesures de variations spatiales et temporelles de niveau de nappe, conductivité et température. Les données brutes et leur interprétation figurent dans une brochure à part intitulée "Données brutes et interprétation".

Généralités

Du point de vue géologique, la rive sud est dans le bassin molassique et la plupart des falaises sont constituées par la molasse d'eau douce inférieure (MDI). Celles qui s'étendent de Font à Cheyres appartiennent à la molasse marine supérieure (MMS). Les dépôts quaternaires sont d'origine glaciaire, avec des alluvions lacustres et des matériaux d'origine fluviatile. Leur épaisseur varie de 20 cm à 7 m. A l'embouchure de la Broye leur puissance dépasse 200 m.
Du point de vue de l'hydrogéologie, les paramètres essentiels sont, pour le bassin versant délimité par la falaise molassique: les précipitations, les variations du niveau du lac, la profondeur de la molasse et la conductivité hydraulique des sédiments ou perméabilité. Vu la texture fine de la couverture sédimentaire on peut s'attendre à une perméabilité globale relativement faible. Signalons encore deux particularités: le delta de la Broye, dont l'hydrogéologie est rattachée à celle du Grand Marais et la zone Font-Cheyres, où les aquifères génèrent des sources entre la MDI et la MMS .

Géophysique

Trois méthodes d'investigation permettent de répondre aux questions posées. Ce sont le sondage électrique Schlumberger (SE), le sondage Very Low Frequency à résistivité multifréquence (VLF-R) et la sismique de réfraction (SIS).
Les deux premières méthodes mesurent la résistivité apparente (Ra) en fonction de la profondeur et permettent, par calcul, de déduire l'épaisseur des diverses couches ainsi que leur résistivité vraie (R), qui dépend de la lithologie et de l'eau d'imbibition.
La troisième méthode permet de différencier les sédiments meubles des formations molassiques. Elle est un complément indispensable aux SE et VLF-R.

Il est possible d'estimer la conductivité hydraulique, grâce à une relation empirique liée à la résistivité (cf. fig. 2.6). De ce fait cette donnée n'a qu'une valeur indicative.
De cela, il résulte que les molasses ont une résistivité de l'ordre de 20-90 ohm*m, valeurs caractéristiques des molasses marines inférieures et molasses lacustres inférieures. La couverture sédimentaire quant à elle présente des résistivités de 30-70 ohm*m, valeurs en accord avec celles données pour les sables limoneux ou limons sableux.

Signalons enfin que la présence d'eau affecte fortement ces mesures et empêche une description géophysique par les méthodes électriques des zones inondées.

Piézométrie

La pose de piézomètres de grand diamètre et crépinés sur toute la longueur s'est faite conjointement avec une description lithologique. Cette dernière permet de mieux préciser la nature et la profondeur (jusqu'à 2 m) des couches sédimentaires.
Les mesures piézomètriques effectuées pendant un mois ont permis de mettre en évidence des situations hydrologiques variées:

- transects entièrement imperméables;
- présence d'une dune plus ou moins colmatée;
- existence d'une nappe phréatique captive, connectée ou non au lac;
- existence d'une nappe perchée;
- recharge des nappes par diverses voies: lac, étang, source ou précipitations;
- influence de l'évapotranspiration.

Ces observations montrent à l'évidence qu'une adaptation technique de la piézométrie est nécessaire : diamètre plus faible des tubes, crépines sélectives et plusieurs piézomètres par station, piézomètres battus pour limiter l'influence de l'eau de surface.

Conclusions générales

Géophysiquement parlant, le **plancher de la molasse est à moins de 7 m**, sauf pour les transects 29 et 30 (cf. fig. 2.7). Cette **molasse est marneuse, imperméable**, sillonnée parfois de chenaux gréseux. La couverture sédimentaire limono-sableuse présente des **conductivités hydrauliques faibles**, de 10^{-6} à 10^{-7} m/sec.
En ce qui concerne l'hydrologie, des **situations très spécifiques** sont mises en évidence et orientent l'étude de l'hydrodynamique dans des domaines bien précis. De plus, le chapitre particulier de la réserve de Châbles montre qu'en absence de pluie, **l'apport d'eau de la falaise** est non négligeable, puisqu'il peut se chiffrer à près de 1 l/min/m linéaire de falaise.

2.3.2 Interprétation conjointe des données géophysiques et altimétriques

Généralités

L'étude géophysique et la campagne de nivellement ont été menées simultanément. Aussi, le géologue n'a pas pu bénéficier des levés topographiques pour la conclusion de ses travaux. La confrontation graphique, par nos soins, de l'hydrogéologie et du relief permet d'établir une première typologie des transects (cf. fig. 2.7) et de nous guider lors de l'installation des piézomètres.

Les transects

Exception faite des transects 29 et 30 situés sur le delta de la Broye, toutes les situations présentent un plancher molassique imperméable à moins de 7 m de profondeur. L'examen de la figure 2.7 montre des objets intéressants pour la compréhension de l'hydrodynamique et plus spécialement pour les relations hydriques lac-marais-forêts riveraines. Ce sont:

- des **cordons littoraux** bien marqués, pouvant jouer un **rôle de barrage entre le lac et le marais**. Exemples: transects 2, 4, 19, 21 et 25;
- des cordons littoraux moins élevés, avec un effet de barrage atténué. Exemples: transects 5, 9, 12, 23 et 27;
- un **rivage sans cordon littoral**. Exemples: transects 10, 13 et 16;
- des **étangs en liaison directe avec le lac**. Exemple: transect 2;
- des **étangs captifs, isolés du lac par effet colmateur de la dune**. Exemples: 5, 9, 19, 21, 25 et 27. Certains étangs sont peu marqués. Exemples: transects 5, 9, ou 27;
- des **nappes captives mises en charge par le lac**, cas du transect 13, **ou par le ruisseau de falaise**, cas du transect 19, ou encore avec une liaison sous une zone limoneuse, cas du transect 30;
- des **nappes perchées**, parfois alimentées par l'étang. Exemples: transects 19, 23, 27, 29 et 30;
- certains transects ont, sur un bon tiers de leur longueur, un **plancher molassique nettement au-dessus du niveau du lac**. Exemples: transects 2, 4, 12, 13, 16, 25 et 27;
- l'aquifère du transect 10, par son altitude relative, semble être **totalement indépendant du lac**.

Les observations telles que commentées ci-dessus ne sont du point de vue fonctionnel que de simples hypothèses. Celles-ci pourront être partiellement vérifiées à la suite de la campagne de mesures piézométriques.

2.3.3 Conclusions

L'étude géophysique et altimétrique permet de **délimiter sans équivoque le bassin versant riverain**: falaise de molasse - plancher molassique - lac.
La **perméabilité globale** des sédiments, par leur nature relativement uniforme, donne des **valeurs basses, de l'ordre de 10^{-6}-10^{-7} m/sec**.
Divers objets géomorphologiques méritent une étude plus détaillée du point de vue fonctionnel. Ce sont les cordons littoraux, les dépressions, les étangs et leur relation avec les nappes phréatiques.
Cette étude montre enfin la **nécessité d'une connaissance plus approfondie de la perméabilité des sédiments**, et en particulier quels sont leurs effets dans les situations les plus critiques.

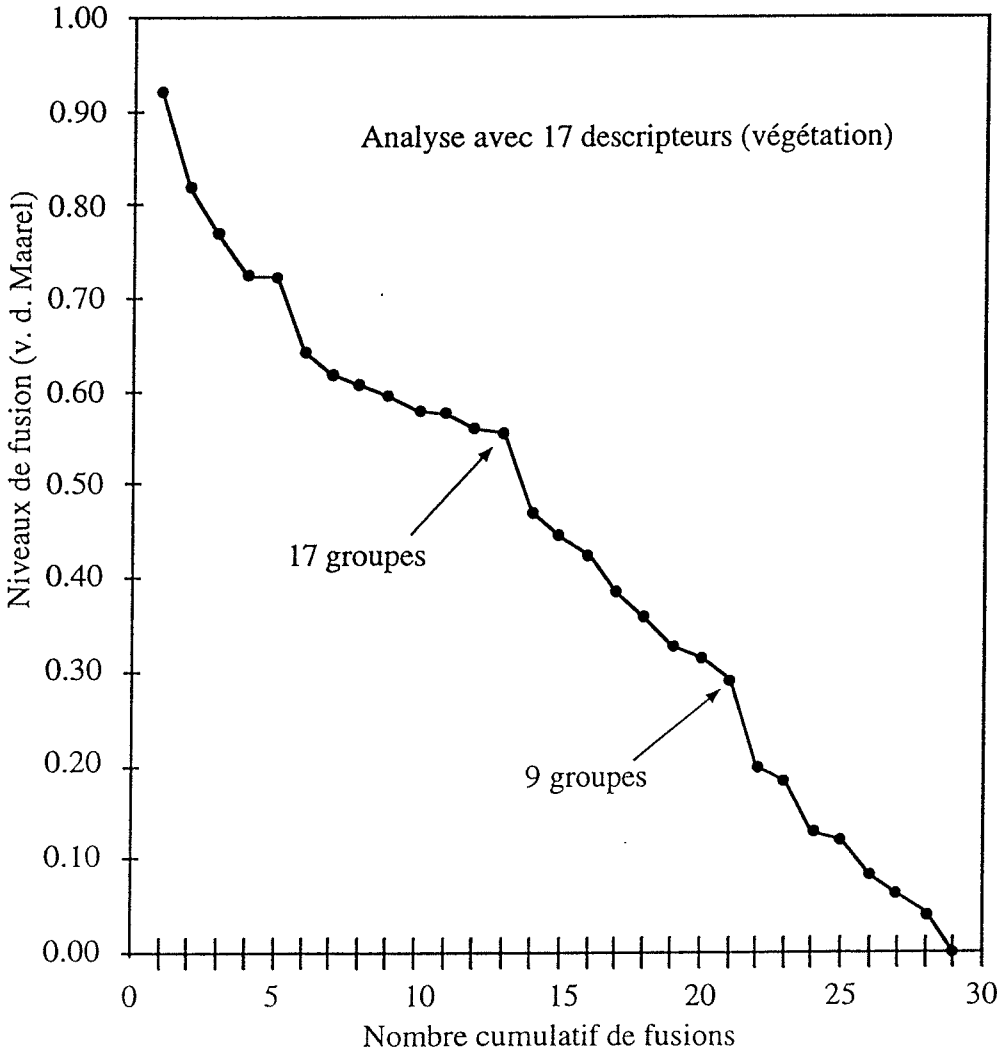
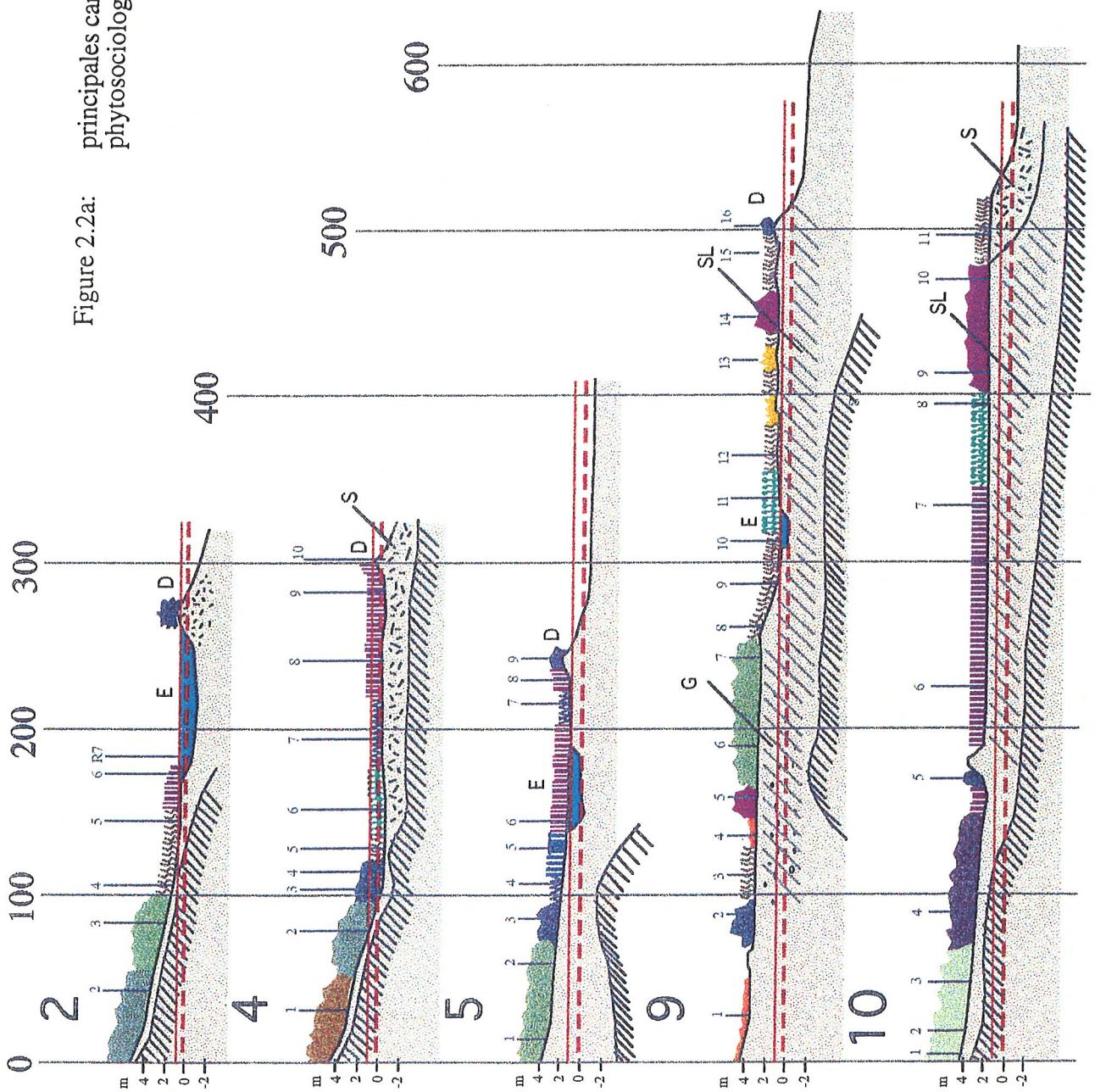


Figure 2.1 Courbe des niveaux de fusion du dendrogramme de classification (sélection des transects)

Figure 2.2a: principales caractéristiques géophysiques et phytosociologiques des transects 2 à 10



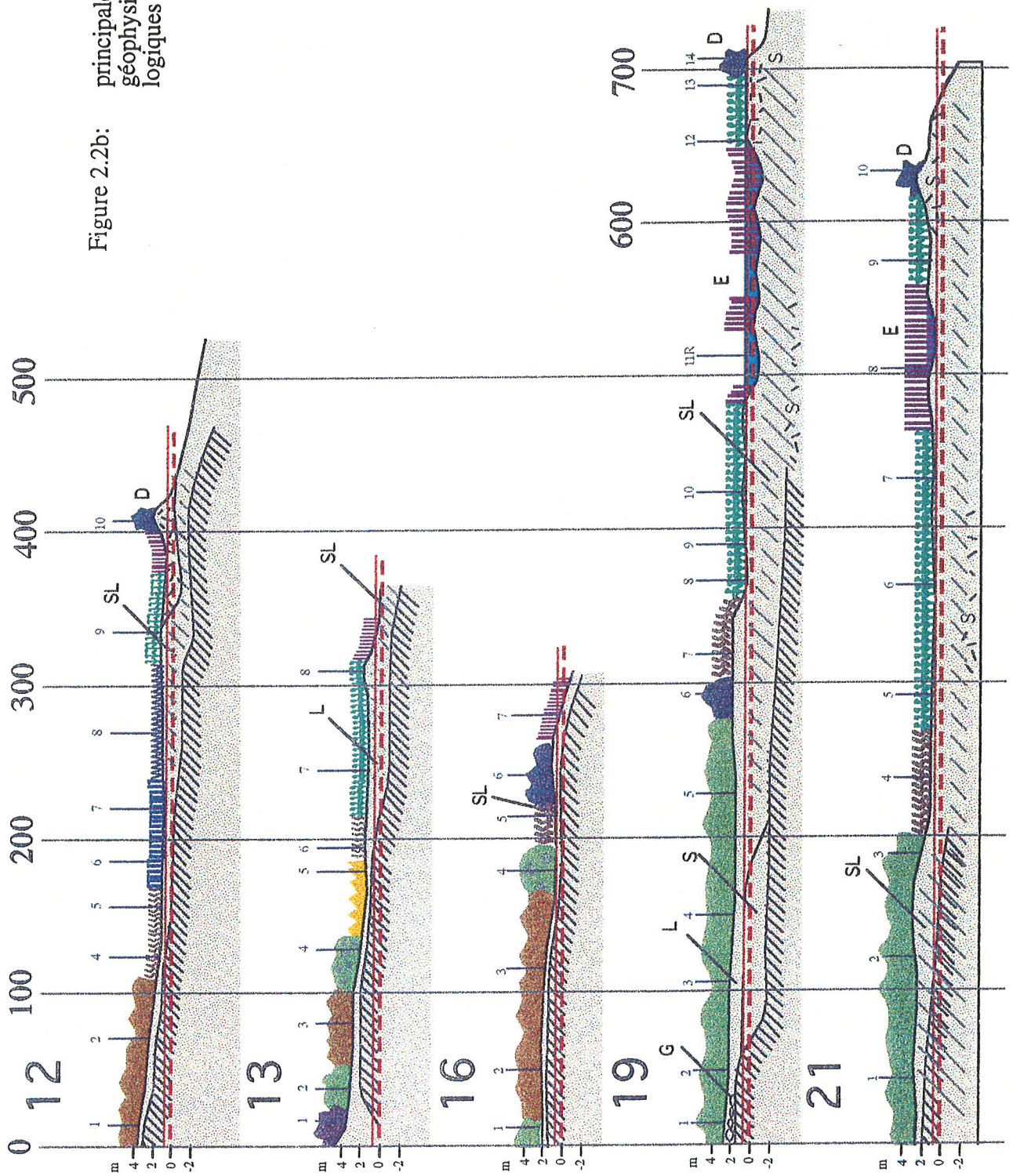


Figure 2.2b: principales caractéristiques géophysiques et phytosociologiques des transects 12 à 21

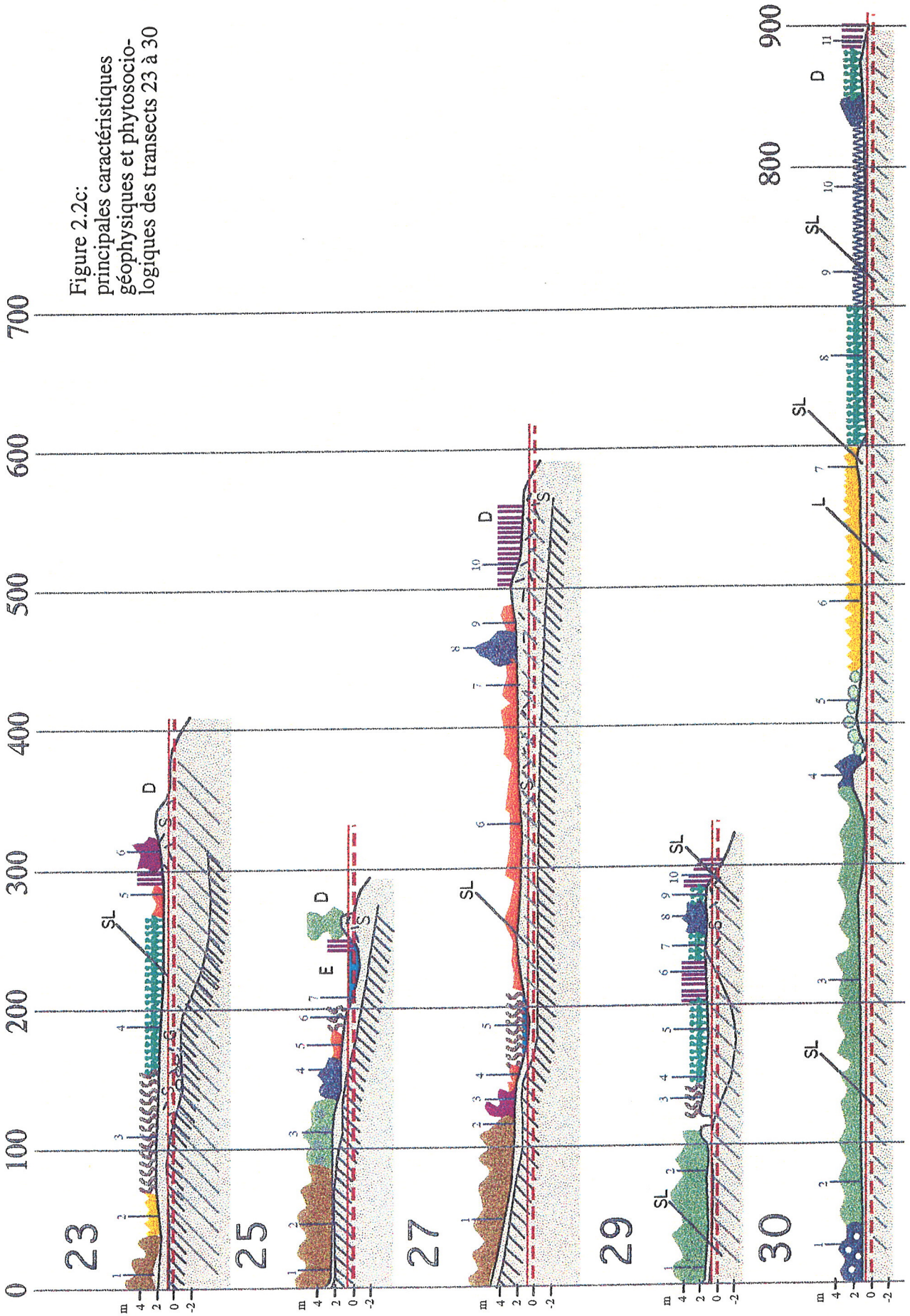
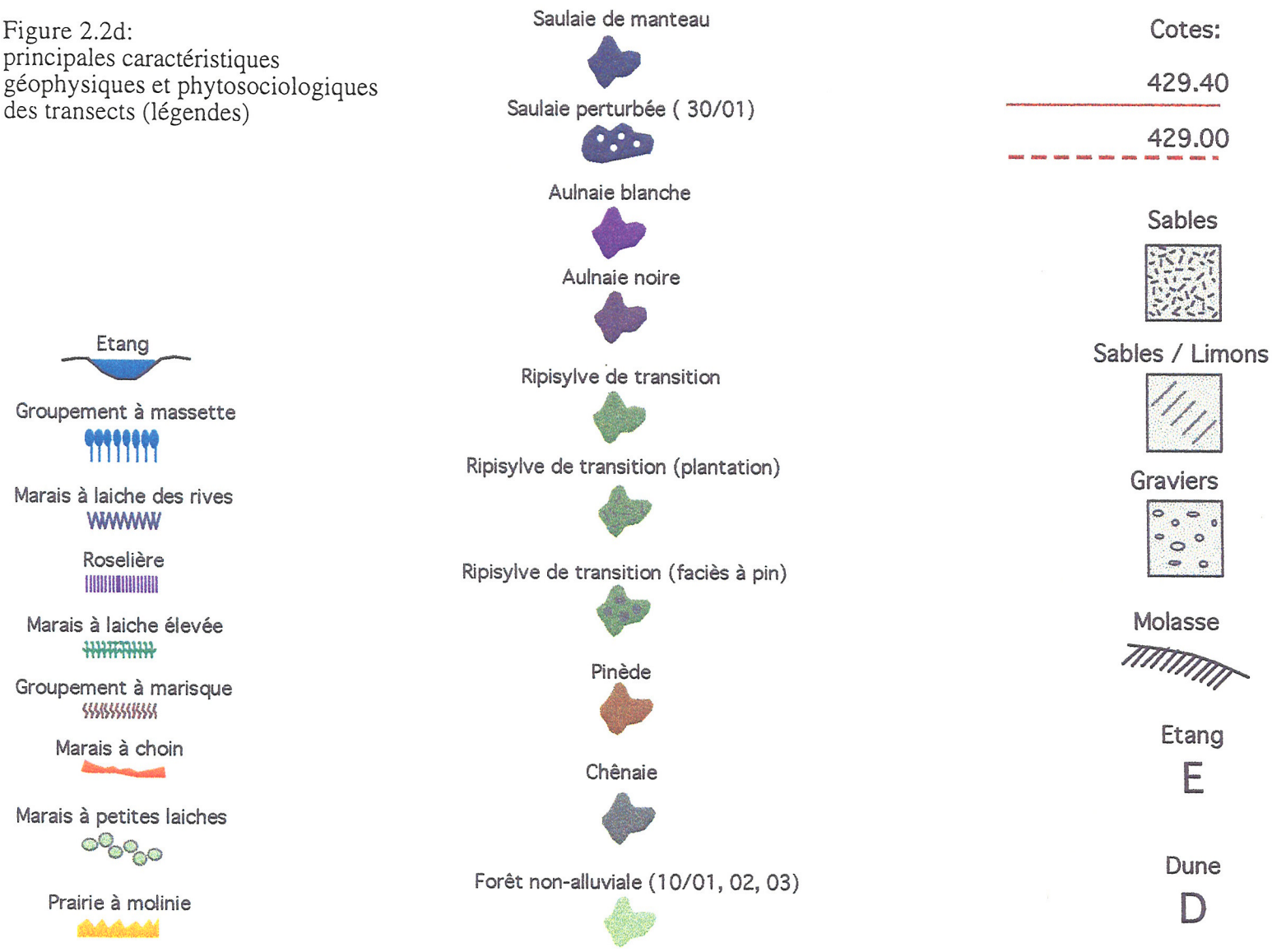


Figure 2.2c: principales caractéristiques géophysiques et phytosociologiques des transects 23 à 30

Figure 2.2d:
principales caractéristiques géophysiques et phytosociologiques des transects (légendes)



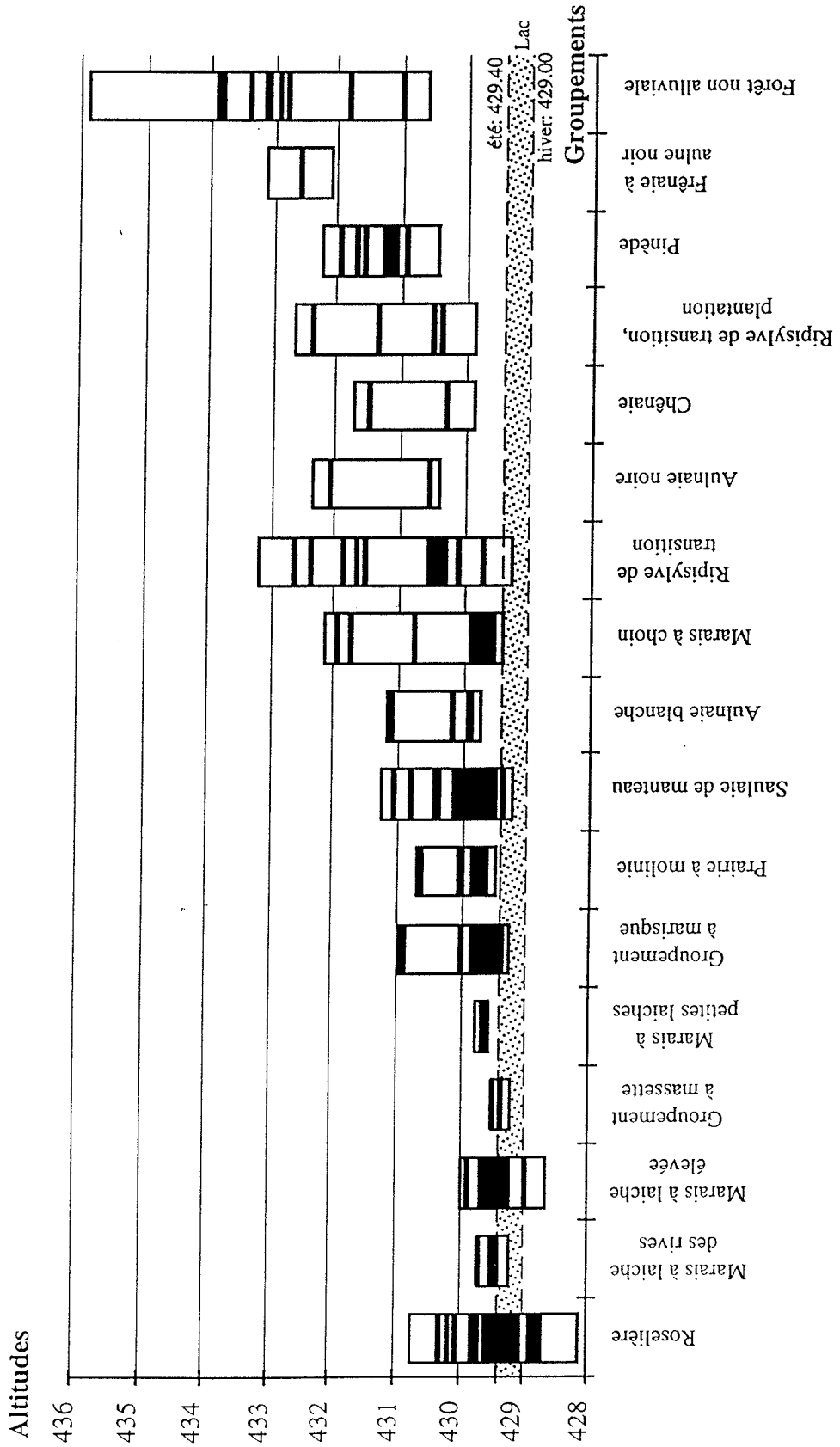


Figure 2.3 Altitude des sites d'étude classés selon les unités synsystématiques d'après Clerc (à paraître)

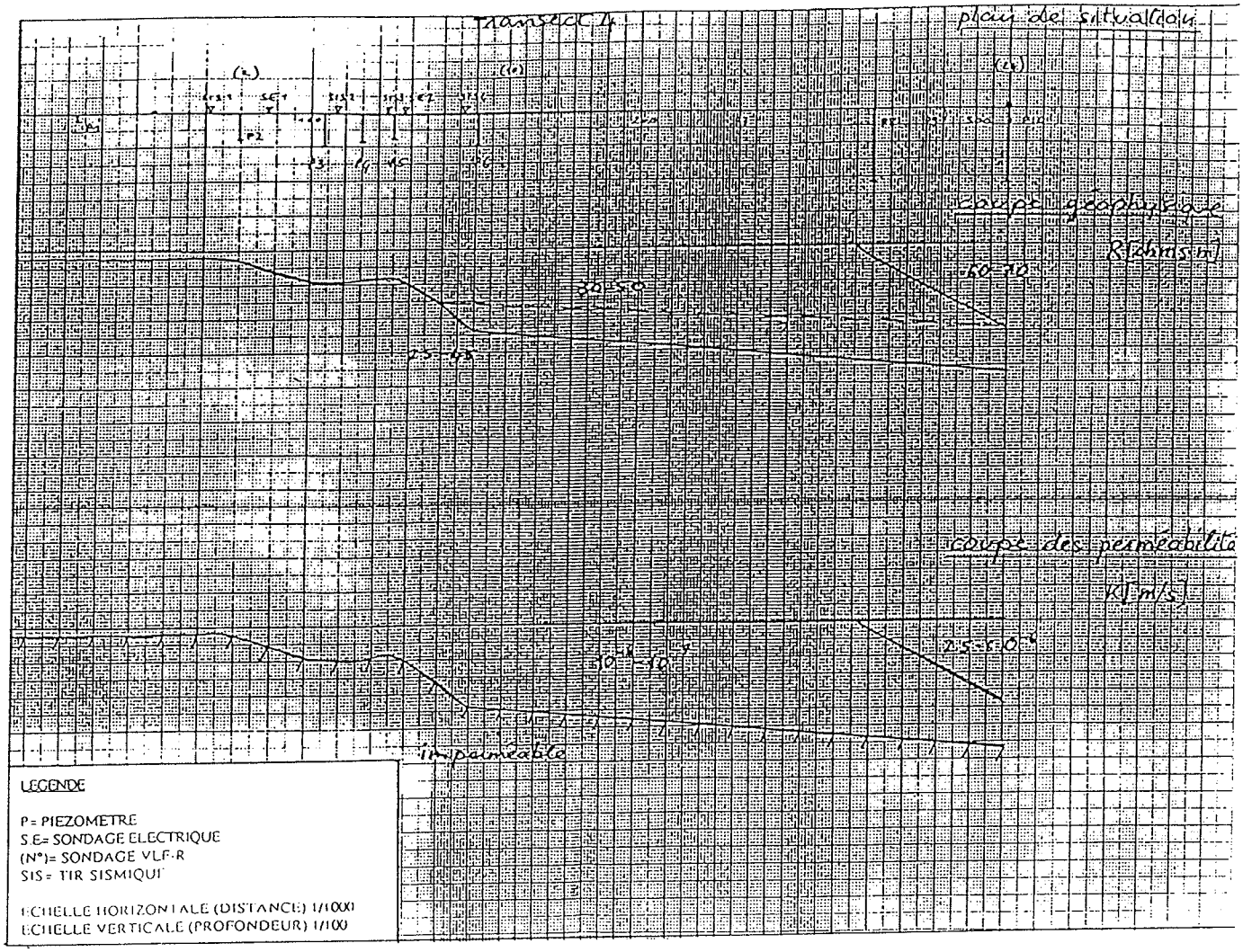


Figure 2.4 Exemple de transect géophysique

ETUDE RIVE SUD DU LAC DE NEUCHATEL
SONDAGE A LA TARRIERE ET EQUIPEMENT PIEZOMETRIQUE

Transect 4
Date 13/9/90

prof. (m)	profil	description lithologique	géologie	eau	remarques perméabilité indicative	prof. piézo
0.00						
0.10		sol brun sableux				
		sable moyen beige limoneux	alluvions lacustres at cours d'eau			
0.30		sable moyen beige peu limoneux				
0.60		alternance de sable et limon gris				
0.75						
1.00		gravier fin ϕ 1cm sablo-limoneux gris. Bien trié				0.98
			molasse			

piézomètre 4/3 distance 104 ? tarrière/battu (T/B) T

diamètre 5 alt 429.77

entièrement crépiné (O/N) O

profondeur de la crépine ou du piézo 0.98 m

association végétale manteau de saule

Figure 2.5 Exemple de fiche lithologique

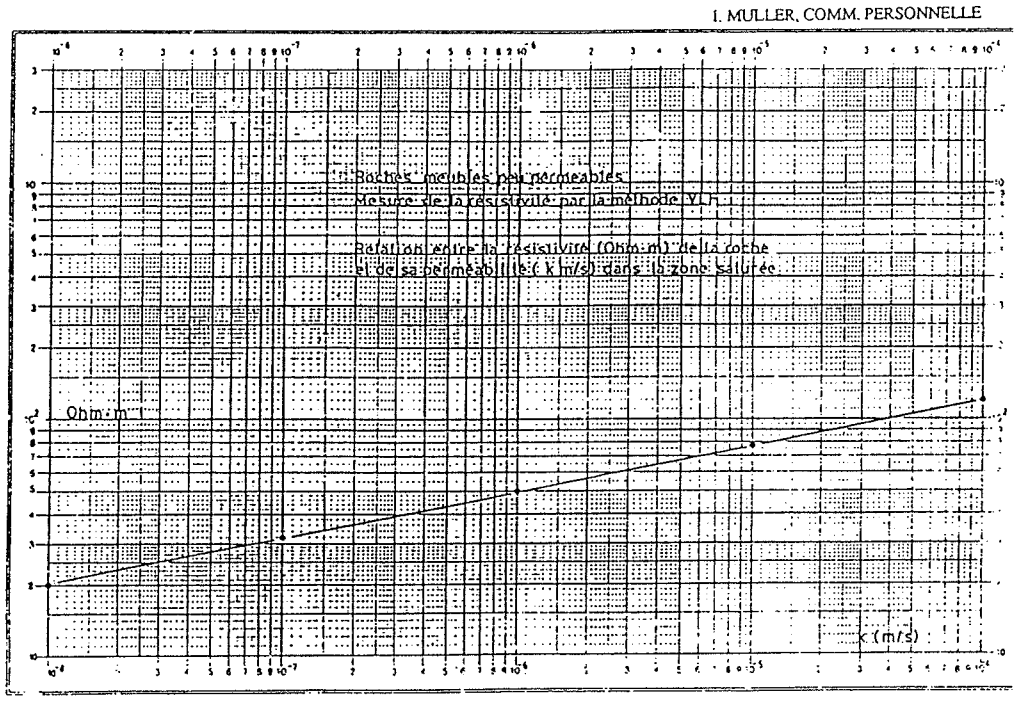


Figure 2.6 Graphique liant la conductivité hydraulique à la résistivité

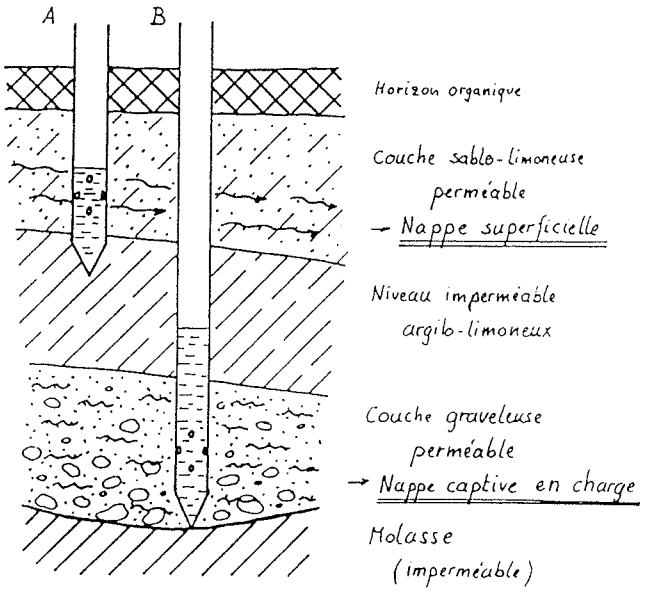


Figure 2.8 Exemple de station piézométrique

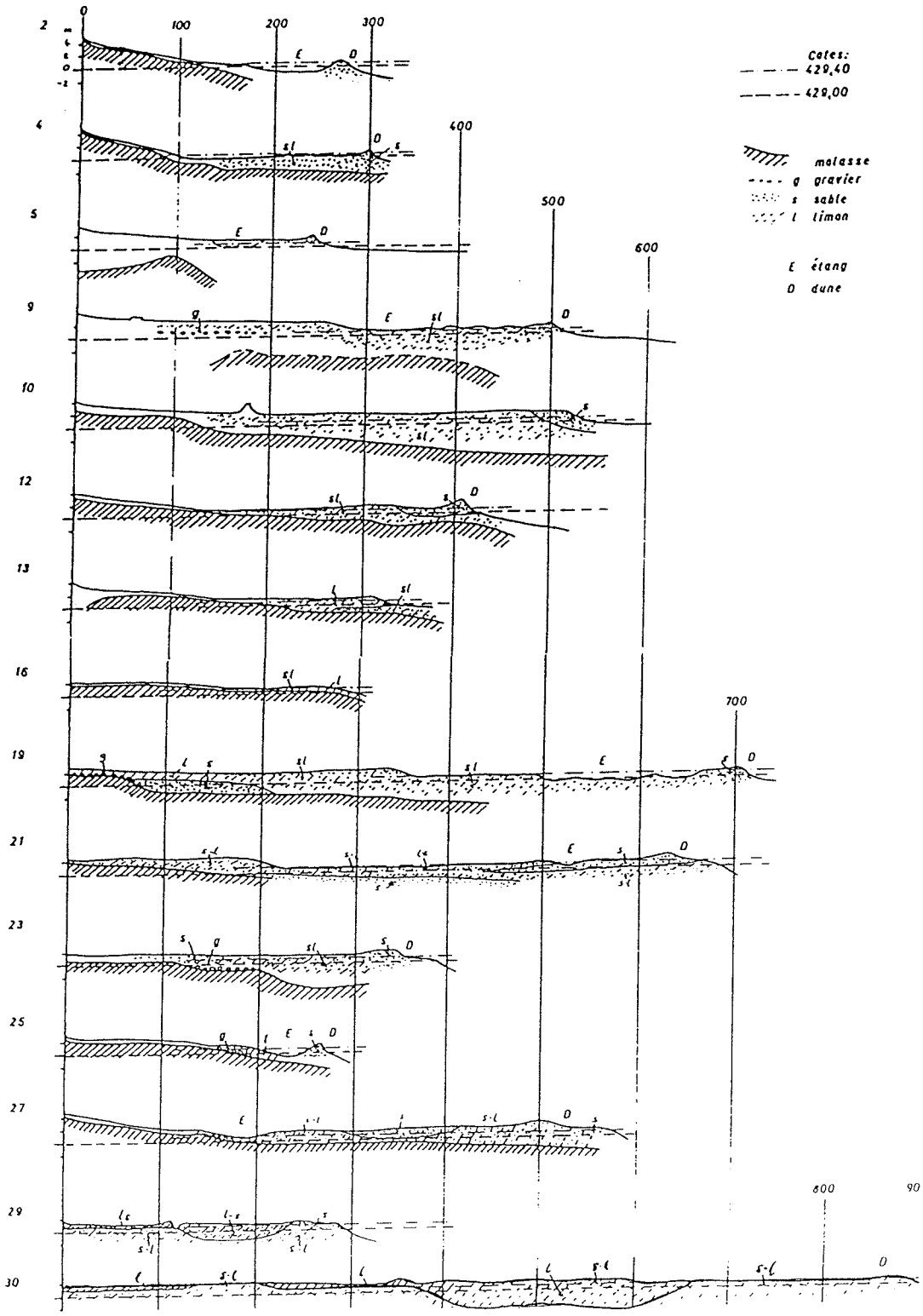


Figure 2.7 Coupes géophysiques schématiques des 15 transects

	Transect No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	Roselière lacustre					1	1	1				1		1	1		1	1	1		1	1	1	1			1	1	1	1	1
2	Roselière intérieure	1	1		1	1	1	1			1	1	1						1	1			1			1		1			
3	Etang-lagune	1	1		1	1	1													1			1			1					
4	Marais à laiche élevée	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	Groupement à marisque	1	1	1	1				1	1		1	1	1					1	1	1	1	1	1	1		1	1	1		
6	Marais à choin		1	1					1	1		1	1	1			1						1	1	1	1		1	1		
7	Prairie à molinie												1	1			1		1	1	1		1				1			1	1
8	Forêt de saule blanc	1	1	1	1								1		1	1	1		1	1	1	1	1	1	1					1	1
9	Forêts d'aulne blanc et manteaux									1	1	1							1							1	1	1			
10	Forêts d'aulne noir								1		1			1																	
11	Forêt de frêne et d'aulne noir	1	1												1																
12	Ripisylves de transition de lac	1					1		1	1		1	1	1	1		1	1	1	1		1	1			1	1	1	1	1	1
13	Forêts de chêne			1	1																										
14	Forêts de pin sylvestre et manteaux				1							1	1	1	1	1	1	1	1						1	1	1	1			
15	Forêts+manteaux alluv. à statut indéterminé		1	1			1		1	1	1				1	1	1	1		1	1		1	1	1	1	1	1			1
16	Forêts+manteaux non alluviaux	1		1									1	1			1	1	1						1	1	1		1		
17	Sylviculture intensive					1	1						1									1							1		1
18	Présence d'une falaise	1	1	1	1					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
19	Situation de delta					1	1	1	1																					1	1
20	Dune	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
21	Longueur du transect: 100-300m		1	1	1	1		1	1						1	1	1				1					1				1	
22	Longueur du transect: 300-600m	1					1			1	1	1	1	1				1						1	1			1	1		
23	Longueur du transect: 600-900m																			1	1		1	1			1				1
24	Voie CFF	1	1	1	1					1	1																				
25	Route, chemin	1	1	1	1					1		1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1		
26	Probablement molasse en surface	1	1	1	1					1		1		1	1	1	1	1	1					1	1	1	1	1			
27	Proximité d'un ruisseau	1			1	1	1		1	1	1	1	1				1	1		1	1	1		1			1			1	1

Remarque: pour les forêts, la nomenclature est basée sur la légende de la carte de végétation de la cartographie des zones alluviales d'importance nationale (GALLANDAT et al. 1993)

Tableau 2.1a Tableau brut des descripteurs utilisés pour la réduction de 30 à 15 transects

Grp	Relevé groupe No	8	7	7	6	6	6	5	4	4	7	7	0	2	5	5	3	3	6	6	9	9	1	1	4	4	1	1	3	3	2
	Relevé No	0	3	8	1	7	9	5	8	6	3	4	5	7	9	2	6	7	9	0	4	3	1	2	2	8	5	6	1	0	4
6	Forêts d'aulne noir	1	1	1																											
7	Forêts d'aulne blanc et manteaux	1			1	1	1	1	1	1																					
2	Marais à laiche élevée	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	Groupement à marisque		1	1	1	1	1		1	1	1	1			1	1				1	1	1	1	1	1	1			1		
2	Forêts+manteaux non alluviaux		1					1	1	1		1			1		1	1				1	1		1	1					
2	Forêts de pin sylvestre et manteaux		1		1	1		1	1	1		1	1				1	1			1				1						1
2	Forêts+manteaux alluv. à statut indéterminé	1		1		1	1	1		1	1	1	1		1	1	1	1		1		1		1				1		1	1
2	Marais à choin		1	1	1	1	1	1			1	1				1	1					1		1	1	1					
4	Etang-lagune							1							1	1					1		1	1			1	1			
4	Roselière intérieure	1			1	1		1	1					1	1	1					1		1	1	1		1	1			
1	Forêt de saule blanc								1		1	1	1		1	1	1		1	1	1	1	1	1	1				1	1	1
1	Roselière lacustre		1		1	1			1	1	1			1		1	1	1	1	1						1	1	1	1	1	1
1	Prairie à molinie		1						1	1					1	1	1		1	1					1					1	
1	Ripisylves de transition de lac		1	1	1	1	1	1	1	1					1	1	1	1	1				1		1	1		1	1	1	1
8	Forêts de chêne																				1	1									
3	Sylviculture intensive																								1	1	1	1	1	1	
5	Forêt de frêne et d'aulne noir																						1	1							1

Tableau 2.1b Tableau structuré à l'aide des seuls descripteurs phytosociologiques

Groupements	Piézo Nb		Longueur				Altitude				
							Min		Max		Moyenne
	G	N	[m]	% marais	% forêts	% total	moyen	absolu	moyen	absolu	pondérée
Roselière	15	10	1059	27.6%		16.9%	429.21	428.08	429.61	430.80	**429.36**
Marais à laiche des rives	6	5	236	6.2%		3.8%	429.42	429.19	429.50	429.73	**429.41**
Marais à laiche élevée	24	15	1116	29.1%		17.8%	429.38	428.64	429.57	430.01	**429.45**
Groupement à massette	3	3	68	1.8%		1.1%	429.32	429.20	429.50	429.51	**429.45**
Marais à petites laiches	1	1	77	2.0%		1.2%	429.56	429.53	429.68	429.79	**429.63**
Groupement à marisque	22	19	641	16.7%		10.2%	429.59	429.23	429.84	430.95	**429.70**
Prairie à molinie	8	5	250	6.5%		4.0%	429.79	429.42	430.01	430.71	**429.77**
Saulaie de manteau	27	17	387		15.8%	6.2%	429.75	429.19	430.06	431.25	**429.96**
Aulnaie blanche	4	3	142		5.8%	2.3%	430.15	429.68	430.34	431.18	**429.98**
Marais à choin	11	8	386	10.1%		6.2%	430.14	429.37	430.36	432.15	**430.03**
Ripisylve de transition	25	18	1055		43.2%	16.8%	430.43	429.24	431.23	433.19	**430.71**
Aulnaie noire	1	2	73		3.0%	1.2%	431.10	430.38	431.52	432.36	**430.80**
Chênaie	2	2	40		1.6%	0.6%	430.51	429.84	431.24	431.74	**430.81**
Ripisylve de transition, plantation	6	3	281		11.5%	4.5%	430.63	429.83	431.66	432.63	**431.05**
Pinède	3	10	432		17.7%	6.9%	430.94	430.41	431.67	432.23	**431.26**
Frênaie à aulne noir	0	0	33		1.4%	0.5%	432.21	432.05	432.96	433.11	**432.58**
Forêt non alluviale	4	4	205		8.4%	3.3%	432.10	430.59	433.80	435.85	**432.71**
Total	162	125	6481								
Total marais	90	66	3833	61.1%							
Total forêts alluviales	68	55	2443	38.9%							

Légende:
Piézo G: piézomètres gris (diamètre 2,5 cm), crépinage limité
Piézo N: piézomètres noirs (diamètre 5 cm), crépinage intégral
% marais: proportion par rapport à la longueur totale des transects en marais
% forêts: proportion par rapport à la longueur totale des transects en forêts alluviales
Min (Max) moyen: moyenne des minima (maxima) de toutes les fractions mesurées
Min (Max) absolu: valeur extrême des minima (maxima) de toutes les fractions mesurées
Moyenne pondérée: moyenne des altitudes pondérées par les longueurs des fractions mesurées

Tableau 2.2 Longueurs et altitudes moyennes des groupements végétaux

3 ETUDE DE LA VEGETATION

3.1 Introduction

Un des objectifs du projet est de mettre en relation les variations du niveau du lac et la végétation. Il s'agit de déterminer la part de responsabilité de la régulation actuelle par rapport à l'état et à la dynamique des unités végétales.
De manière générale, cette partie de l'étude doit permettre de décrire cette végétation, d'évaluer sa vitalité, sa richesse, sa sensibilité par rapport aux conditions écologiques, principalement celles liées à la dynamique de la nappe. Dans cette perspective, rappelons que la composition floristique des groupements végétaux dépend d'une multitude de facteurs, dont les facteurs du milieu comme le type de sol ou le régime hydrodynamique (VANDEN BERGHEN 1982). En fait, plus prosaïquement dit, il s'agit surtout d'établir son "bulletin de santé". Montre-t-elle des signes d'évolution progressive, ou d'évolution régressive? Existe-t-il des décalages floristiques, dûs à "des inerties de réaction" différentes à l'égard de l'assèchement du milieu, tels que ceux décrits par GALLANDAT et al. (1993).

Au chapitre 3.2, nous présentons les méthodes mises en oeuvre et discutons de l'opportunité de tel ou tel choix.
Divers travaux réalisés sur la rive sud du lac de Neuchâtel, que ce soit en écologie végétale (BUTTLER 1987, CORNALI 1992, BUECHE, à paraître) ou en cartographie phytosociologique (GALLANDAT et al. 1993), montrent que, du seul point de vue altitudinal, on peut raisonnablement séparer cet écosystème en deux parties: une zone potentiellement sous influence lacustre, le marais avec quelques cordons littoraux boisés ainsi que quelques lambeaux forestiers et, au delà, une zone hors de l'influence lacustre constituée de l'ensemble des forêts riveraines, à l'exception de quelques éléments de marais ou de forêts arbustives ouvertes dont il s'agit de déterminer le statut. Ainsi, aux chapitres 3.3 (résultats) et 3.4 (discussions) nous présentons séparément le marais et la forêt.

Concernant le marais, BUTTLER (1987) cite trois phénomènes qui peuvent intervenir de façon décisive dans l'agencement spatio-temporel des unités palustres: la zonation, la succession autogène et la succession allogène (voir chapitre 1.4.2). D'autre part, cet auteur présente un modèle de succession autogène, marqué principalement par son affranchissement de l'eau. Ces considérations nous amènent à étudier le marais selon deux axes: 1) une **approche fonctionnelle** (3.4.1) nous rattachant à la question centrale: quelle végétation pour quel lac? 2) une **approche phytosociologique** (chap. 3.4.2) pour faire le lien avec les travaux existants.

Concernant les milieux boisés, l'étude est moins poussée. Par la cartographie des zones alluviales d'importance nationale (GALLANDAT et al. 1993) nous disposons déjà d'une base solide et fiable. De plus, ces milieux sont, pour la plupart, hors de l'influence lacustre. Au point 3.4.3, nous précisons le statut phytosociologique des cas douteux.

Pour terminer, au point 3.5, une synthèse permet de dégager les caractéristiques principales des unités décrites quant à leur assujettissement aux fluctuations de la nappe lacustre.

Du point de vue de la bibliographie existante, nous bénéficions, en phytosociologie, de travaux spécifiques à la rive sud, notamment ceux de BERSET (1949/50), KELLER (1969/70), PRADERVAND (1981), ROULIER (1983), GALLANDAT et al. (1993) et CLERC (à paraître).
Pour des considérations plus générales sur la végétation palustre, herbacée ou forestière, nous nous sommes inspirés de MOOR (1958), KLOETZLI (1969), ELLENBERG et

KLOETZLI (1972), KLOETZLI (1972), AMMANN-MOSER (1975) et OBERDORFER (1992a et 1992b).
En ce qui concerne le traitement des données, nous nous sommes référés à GUINOCHET (1973), VAN DER MAAREL (1979), LEGENDRE-LEGENDRE (1984), WILDI (1986) et WILDI et ORLOCI (1990).

3.2 Méthodes

3.2.1 Généralités

Pour étudier la végétation par la méthode floristique, il est nécessaire de bien connaître la flore du territoire considéré et, surtout, de bien relever les espèces puisqu'elles nous renseignent, entre autre, sur les caractéristiques hydriques de la station. Par conséquent, nous devons choisir les méthodes d'échantillonnage et de traitement des données propres à satisfaire les objectifs de notre recherche.
Pour l'approche de terrain, les méthodes d'échantillonnage qui nous intéressent sont au nombre de deux: l'une est issue de la phytosociologie sigmatiste de Braun-Blanquet, l'autre de la phytosociologie synusiale intégrée. Ces deux méthodes permettent de décrire les unités de végétation. Une troisième méthode peut être mise en oeuvre, il s'agit de l'échantillonnage par transect, afin de déterminer les limites des unités de végétation sur cet axe d'échantillonnage.
Pour le traitement des données nous avons fait appel à l'analyse multivariable, par le biais de l'outil informatique Mulva-4 de WILDI et ORLOCI (1990).
La nomenclature des plantes supérieures est celle de "Flore de la Suisse. Le nouveau Binz" d'AESCHIMANN et BURDET (1989). Le statut phytosociologique des diverses unités est inspiré de ROULIER (1983), BUTTLER (1987) et GALLANDAT et al. (1993).

3.2.2 Rappel méthodologique

<u>*La phytosociologie sigmatiste*</u>

La présente définition est tirée de VANDEN BERGHEN (1982) et de DE FOUCAULT (1986). Cette approche consiste à reconnaître sur le terrain l'individu d'association, dont la physionomie globale et la composition floristique présentent un bonne homogénéité, dans une surface clairement définie: l'aire minimale. Cette reconnaissance établie, il s'agit de dresser la liste de toutes les espèces rencontrées, auxquelles on ajoute des coefficients semi-quantitatifs d'abondance-dominance qui traduisent l'importance de chaque espèce dans cette aire minimale. Ces coefficients exprime le recouvrement (dominance) en % de l'aire minimale par l'espèce considérée ainsi que l'abondance (classification Braun-Blanquet).

5 recouvrement par l'espèce de	>	75%	de la surface
4 " " "	50 -	75%	de la surface
3 " " "	25 -	50%	de la surface
2 recouvrement par l'espèce de	5 -	25%	de la surface, ou individus très nombreux
1 recouvrement par l'espèce de	<	5%	de la surface, ou individus nombreux

+ recouvrement très faible, individus très peu nombreux
r espèces rares

Rappelons qu'une espèce peu abondante ou non dominante peut être porteuse de plus d'information qu'une espèce très abondante ou dominante si, du point de vue écologique, elle revêt une forte signification (par exemple: *Viburnum opulus* indique un sol compact et humide). Ainsi, lors du traitement des données, il est possible, en utilisant un code de remplacement approprié (voir pour cela VAN DER MAAREL, 1979), de donner plus d'importance à certaines espèces sous-représentées.

La phytosociologie synusiale intégrée

Cette méthode, réactualisée par GILLET et al. (1991), est conçue comme un perfectionnement de l'approche sigmatiste. Toute surface de végétation peut être considérée comme la juxtaposition de différents individus d'associations, les synusies. Ces dernières, séparées par des discontinuités plus ou moins nettes, servent de base à la définition floristico-statistique de l'association végétale. Partant de ce constat, on applique une démarche systémique et structuraliste en trois temps. Premièrement on analyse chaque élément phytocoenotique pour lui-même (démarche "intra"), deuxièmement on établit les relations spatio-temporelles entre les éléments pour aboutir aux systèmes phytosociologiques (démarche "inter") et enfin, par comparaison de ces systèmes, on dégage les invariants relationnels et on définit les structures formelles permettant des généralisations et des prédictions sur l'ensemble du système phyto-écologique (démarche "trans").
Sur le terrain, cette approche nécessite plus de temps, mais permet d'affiner l'interprétation de la végétation. Elle donne, par le schéma relationnel, une meilleure vue d'ensemble, surtout dans les cas de surfaces hétérogènes, en mosaiques, de systèmes perturbés, ou de phases de transition.

Méthode du transect (coupe)

D'après VANDEN BERGHEN (1982), il s'agit de faire une série de relevés de végétation le long d'un tracé plus ou moins linéaire. Par des méthodes appropriées, il est possible de déterminer, pour un seuil de sécurité donné, les limites entre les divers ensembles de végétaux. Cette méthode est particulièrement efficace dans le cas de limites peu claires et difficiles à fixer, et en cas de gradient écologique important.

Méthode d'analyse multivariable

Les principes de cette méthode sont exposés dans GUINOCHET (1973), LEGENDRE et LEGENDRE (1984) et WILDI (1986). Elle permet de dégager les grandes tendances de la variabilité d'un échantilon composé de relevés ou objets caratérisés par des descripteurs. La combinaison de diverses opérations (transformation de données, groupement, ordination) permet d'obtenir un tableau de végétation dans lequel les relevés sont classés en groupes, caractérisés par un cortège d'espèces, les descripteurs, qui leur sont propres et ont une signification écologique. Le détail de ces méthodes sera repris plus bas.

3.2.3 Le marais

Compte tenu de ce qui précède, nous avons opté pour une méthode qui permet d'accentuer l'information écologique apportée par les espèces dominantes. Autrement dit, il s'agit de **faire ressortir le caractère adaptatif de ces taxons face à la contrainte de l'eau**, puisque l'inondation plus ou moins marquée du sol peut se traduire par une plus ou moins grande vitalité et exubérance.
Afin de faire ressortir ce caractère de bioindication dans nos analyses, et aussi pour limiter la durée de travail sur le terrain, nous avons choisi une **voie médiane entre la méthode classique et la méthode synusiale**. La première nous semble trop statique du point de vue descriptif et peu adaptée à faire ressortir certains caractères écologiques, mais l'échantillonnage est plus rapide. La seconde, par son aspect dynamique et systémique, est idéale, mais nous avons jugé délicate sa mise en oeuvre sur nos transects. De plus, les **données existantes, auxquelles nous désirons pouvoir nous rattacher**, ont été relevées selon la méthode classique (cartographie du Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel, GEG, CLERC en préparation).
Par conséquent, nous avons effectué les relevés, en tenant compte de la morphologie des espèces les plus dominantes, de la manière suivante:

Phragmites australis	1	0-150 cm	hauteur de la dernière feuille
Phragmites australis	2	150-300 cm	
Phragmites australis	3	> 300 cm	
Carex elata	1	gazonnant	
Carex elata	2	petits tourradons	
Carex elata	3	grands tourradons > 30 cm, feuilles > 1m.	
Cladium mariscus	1	< 80 cm	feuilles en position naturelle
Cladium mariscus	2	80-140 cm	
Cladium mariscus	3	> 140 cm	
Schoenus nigricans	1	30 cm, pas de tourradons	
Schoenus nigricans	2	> 50 cm, tourradons de diam. 20 cm	

Les relevés ont été effectués sur toutes les stations des marais non boisés le long des 15 transects (au total 80 relevés).

Le traitement des données est adapté à notre problématique: une variante a pour but de faire ressortir la dimension écologique liée à la contrainte "eau" par l'établissement d'une typologie fonctionnelle, une autre présente une typologie phytosociologique.
Dans les deux cas nous avons codé les coefficients d'abondance-dominance (B.-B.) en 6 points:

coefficient B.-B.	+	1	2	3	4	5
code	1	2	3	4	5	6

Ce codage favorise l'information apportée par la structure de la végétation, alors qu'un codage en présence-absence, au contraire, accentue l'aspect composition floristique, où chaque espèce a le même poids, quelle que soit son abondance.

Typologie fonctionnelle

Après constitution d'un fichier d'origine, nous avons établi une typologie fonctionnelle par un enchaînement de techniques analytiques (BUTTLER, document interne Univ. Neuchâtel 1991) qui peuvent se résumer ainsi (cf. organigramme, tab. 3.1):

1) Première étape (macrocommande APLCLEAN): calcul d'une valeur de similarité entre les relevés et, par quelques essais, d'une valeur limite au-delà de laquelle les relevés les plus dissemblables sont écartés (relevés atypiques);
2) Deuxième étape (macrocommande APLTABL): classement des relevés et des espèces en groupes. Ici également, le nombre de groupes est choisi à la suite de quelques essais. Par la sélection d'espèces discriminantes, il est possible d'épurer la matrice de données et d'établir un arrangement selon un gradient entre les groupes de relevés et d'espèces, et également un gradient à l'intérieur de ceux-ci. Correctement interprétés, ces gradients mettent la contrainte écologique dominante en évidence;
3) Troisième étape (macrocommande APLIDEN): les relevés atypiques sont "réinjectés" dans l'ensemble des données triées, à côté des groupes les plus proches, ce qui permet d'obtenir un tableau complet de végétation.

Typologie phytosociologique

Afin de dresser une carte de la végétation des marais, le Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel (GEG), par l'intermédiaire de son collaborateur M. C. Clerc, a établi une typologie phytosociologique. Par commodité, nous nommerons dorénavant les données de C. Clerc: GEG, et les nôtres: CEJ.
Dans le but d'une harmonisation de nos données avec celles du GEG, il a été nécessaire d'opérer quelques modifications: regroupement des catégories morphologiques des espèces dominantes, harmonisation des numéros de catalogue des espèces pour les

plantes ligneuses (arbres, arbustes, plantules et semis). De cette manière, il a été possible d'assembler les fichiers sources GEG-ORIG (265 rel. et 151 sp.) et CEJ-ORIG (80 rel. et 144 sp.) en un seul fichier MARAIS-ORIG (345 rel. et 207 sp.).

A ce stade, deux options restent possibles: considérer l'ensemble des relevés CEJ comme atypiques et les intégrer dans le tableau GEG par la même procédure que celle décrite ci-dessus, ou faire participer les relevés CEJ à l'analyse et répéter l'enchaînement tel que pratiqué par le GEG.
Dans le premier cas, si les relevés CEJ sont trop différents de ceux du GEG, l'identification sera faussée; de plus, des unités propres à CEJ pourraient ainsi échapper à la description. Dans le deuxième cas, le risque est de modifier fondamentalement la typologie GEG, solution à écarter au vu de l'avancement des travaux de C. Clerc.
Enfin, si les relevés CEJ sont semblables à ceux du GEG, les deux voies sont possibles.

Dans le but d'évaluer la ressemblance entre ces deux jeux de données, CEJ et GEG, nous avons pratiqué un essai préliminaire. Partant du fichier global MARAIS-ORIG, où les relevés CEJ représentent 23 % de l'ensemble, nous avons réalisé une série d'identifications en modifiant successivement la valeur limite de similarité. Dans chaque cas nous avons dénombré, parmi les relevés atypiques, la part des relevés CEJ. Les résultats sont les suivants:

valeurs de similarité	0,45	0,5	0,6
nombre de rel. atypiques	2	14	104
nombre de rel. CEJ	2	5 (35%)	36 (35%)

Proportionnellement, le nombre de relevés atypiques CEJ est donc légèrement supérieur. De plus, l'examen des valeurs de l'analyse des concentrations pour les deux voies analytiques montre que celles-ci sont très proches:

	1er cas	2ème cas
chi carré	7070	8610
c	0,121	0,111

Vu ce qui précède, les relevés CEJ apparaissent manifestement comparables à ceux du GEG. La comparaison des tableaux de végétation confirme cette ressemblance. Finalement nous retenons la deuxième option (faire participer les relevés CEJ dans le processus analytique), à partir de laquelle il est en outre plus facile d'identifier et de commenter les différences.

3.2.4. Les forêts

Comme déjà dit plus haut, les phytocoenoses forestières sont, **de manière générale, hors de l'influence du lac**. Ainsi, nous pourrions faire l'économie d'une étude des forêts. De plus, avec la **cartographie des zones alluviales d'importance nationale** (GALLANDAT et al., 1993), nous disposons d'une **base typologique suffisante** pour décrire ces milieux.
Toutefois, par le phénomène d'érosion des rives, certaines stations boisées sur les cordons littoraux ont été modifiées par rapport à 1987, époque de l'échantillonnage, alors que d'autres occupent une position marginale avec d'importants effets de lisière. Parfois, on peut observer un **décalage floristique** tel que mentionné en introduction. Dans un tel cas, la nature de la phytocoenose forestière, ou de certains de ses éléments, ne correspond pas à la dynamique actuelle de la nappe. Rappelons que l'élément ligneux a une inertie de réaction plus grande que les plantes herbacées face aux influences des facteurs écologiques. D'une certaine manière, il conserve l'empreinte des situations antérieures.

Pour toutes ces raisons, et dans la mesure où une cartographie réalisée à l'échelle nationale n'est pas toujours suffisamment fine pour traiter ces problèmes, nous avons jugé nécessaire d'aborder à nouveau l'étude des milieux boisés.

Soulignons que l'échantillonnage pour la cartographie des zones alluviales (GALLANDAT et al., 1993) a été réalisé selon la méthode classique sigmatiste, et non selon la méthode synusiale intégrée. Dans le cas d'une problématique forestière alluviale, où l'étude de la structure joue un rôle capital, une approche systémique, par découpage de la phytocoenose en synusies, serait tout-à-fait appropriée.
Précisons ici que, pour GILLET et al. (1991), la synusie comprend un ensemble d'organismes végétaux suffisamment proches par leur espace vital, leur comportement écologique et leur périodicité pour occuper un même milieu au sein d'une biogéocoenose. Dans les forêts riveraines du bord du lac de Neuchâtel, cette définition correspond parfaitement aux strates arborescentes homogènes dans l'aire minimale choisie. Au niveau des arbustes inférieurs, et plus particulièrement encore dans les strates herbacées, le découpage est plus confus. Les strates y sont formées d'une mosaïque de synusies dans lesquelles, par l'intermédiaire des semis et plantules, la stratégie de colonisation se met en place (fig. 3.1).

Conscient de l'importance de l'approche synusiale, et compte tenu de l'échantillonnage pratiqué pour la cartographie des zones alluviales, nous choisissons **une voie intermédiaire en intégrant dans nos relevés la composante structurale**. Pour ce faire, nous complétons la prise de données classique en trois strates par le découpage vertical suivant:

- strate arborescente:	A1	grands arbres dominants
	a2	arbres dominés, pouvant constituer le peuplement d'avenir
- strate arbustive:	B1	espèces arborescentes sous forme arbustive (réserve) ou grands arbustes en recherche de lumière dans des trouées de A1 et a2
	b2	strate arbustive, montrant souvent des discontinuités en rapport avec des stratégies différenciées ou des contraintes écologiques diverses
- strate herbacée:	H	mosaïque de groupements différents, liés souvent à une microtopographie en cuvettes et en bosses

La strate muscinale, bien que très importante, est négligée dans le cadre de notre étude.

Les relevés ont été effectués sur un certain nombre seulement de stations forestières des 15 transects (au total 41 relevés).

Les coefficients d'abondance-dominance sont codés de la manière suivante:

coefficient B.-Bl.	0	+	1	2	3	4	5
code	0	2	3	5	7	8	9

La procédure de traitement des données est semblable à celle décrite pour les marais.

3.3 Résultats

Les résultats de l'échantillonnage et du traitement des données sont présentés séparément pour chaque type: unités fonctionnelles de marais, unités phytosociologues de marais et unités forestières. Ils sont consignés séparément dans les tableaux 3.2, 3.4 et l'annexe 4.

3.3.1. Unités fonctionnelles de marais

Avant d'activer l'enchaînement complet des techniques informatiques, il s'agit de fixer la valeur limite du seuil de similarité, le nombre de groupes de relevés, le nombre de groupes d'espèces et le nombre d'espèces discriminantes.
Le graphique (fig. 3.2), dans lequel les seuils de similarité sont représentés en fonction du nombre de relevés atypiques, montre une légère inflexion pour un coefficient de 0,4. En choisissant cette valeur, 7 relevés atypiques sont momentanément écartés. Les valeurs supérieures à 0,4 sont jugées trop contraignantes.

Pour les relevés, un nombre de 5 groupes a été choisi à l'aide de la courbe des niveaux de fusion du dendrogramme de classification (non représentée). Pour les espèces, ce nombre de groupes est fixé à 29.
Le nombre d'espèces discriminantes est choisi en fonction du tri décroissant des valeurs F calculées selon Jancey (WILDI et ORLOCI, 1990) et la valeur indicatrice de l'espèce. Ainsi, le choix des 100 espèces les plus discriminantes n'élimine pas les taxons ayant une bonne valeur indicatrice quant à leur tolérance hydrique.

La procédure de traitement (cf. chap. 3.2.3 et tab. 3.1) fourni un tableau de végétation avec une classification des relevés et des espèces les plus discriminantes en gradients inter- et intragroupes. Un dernier examen du tableau révèle la possibilité de mieux mettre en évidence les espèces à forte valeur indicatrice. Quelques relevés à l'intérieur des groupes sont réarrangés manuellement. Le tableau 3.2 montre un tableau résumé dans lequel les groupes d'espèces sont réduits à l'essentiel par fusion et suppression des espèces les moins significatives.
Les espèces ligneuses en semis ou plantules sont rassemblées dans un seul groupe, de manière à mieux mettre en évidence les effets de l'atterrissement.

Pour les groupes d'espèces caractéristiques ou différentielles, nous avons calculé les moyennes de trois valeurs indicatrices (LANDOLT, 1977):

F	val. d'humidité:	1	sols très secs
		2	sols à sécheresse modérée
		3	sols à humidité moyenne
		4	sols humides à très humides
		5	sols mouillés, détrempés
N	val. de substances nutritives:	1	sols maigres prononcés
		2	sols maigres
		3	sols moyens
		4	sols à substances nutritives
		5	sols fertilisés à pollués
D	val. de dispersité:	1	sols rocailleux
		2	sols pierreux-graveleux
		3	sols sableux, bien aérés
		4	sols à sable fin, poussiéreux
		5	sols argileux ou tourbeux, asphyxiants

Le tableau 3.3 contient les valeurs indicatrices moyennes par groupes de relevés et d'espèces.
Le tableau 3.2 fait apparaître une diagonalisation résultant d'une répartition des occurences et des coefficients d'abondance à l'intersection des groupes de relevés et des groupes d'espèces. La signification du gradient mis en évidence sera discutée plus bas.

- le groupe de relevés 1 est très bien caractérisé par le groupe d'espèces 1 et surtout par le groupe 2, puisque son cortège d'espèces n'apparaît pas dans le groupe de relevés 2. Le groupe d'espèces 4 présente un gradient remarquable, de gauche à droite, entre les groupes de relevés 1, 2 et 3;

- le groupe de relevés 2 est très bien caractérisé par le groupe d'espèces 3 et par l'absence du groupe d'espèces 2. De ce fait, ce groupe de relevés se démarque bien de ses voisins;
- le groupe de relevés 3, le plus important, occupe une position centrale et est caractérisé pàr le groupe d'espèces 4, dans lequel les coefficients d'abondance sont les plus élevés pour les deux espèces principales: *Phragmites australis 2* et *Carex elata 2*;
- le groupe de relevés 4 occupe une position intermédiaire entre les groupes 3 et 5. Il est très bien caractérisé par *Cladium mariscus 2*, un peu moins par les groupes d'espèces 5 et 7. Ces groupes contiennent des espèces remarquables par leur présence: *Carex panicea* et *Hydrocotyle vulgaris*, et par leur comportement: *Phragmites australis 1* et *Carex elata 1*;
- le groupe de relevés 5 réuni des groupes d'espèces qui sont en nette opposition avec les groupes 1, 2, 3 et 4. Les espèces remarquables, mentionnées précédemment, y sont mieux installées. Des espèces nouvelles apparaissent avec les groupes 9 et 10, certaines avec de forts coefficients d'abondance.

Une dernière remarque: le groupe d'espèces 8 réunit les espèces ligneuses, présentes dans la strate herbacée des marais sous forme de semis ou plantules. Ce groupe de ligneux émerge dès le groupe de relevés 3 et s'affirme dans les groupes 4, puis 5.

Les moyennes des valeurs indicatrices (tab. 3.3), bien qu'il s'agisse de les interpréter avec prudence, montrent certaines tendances: la valeur d'humité F décroît de gauche à droite et de haut en bas; il en est de même pour la valeur des substances nutritives N. Le comportement de la valeur de dispersité D est moins net.
Pour les moyennes des nombres d'espèces, on constate un accroissement de gauche à droite.

3.3.2 Unités phytosociologiques de marais

Conformément à ce qui a été dit plus haut (cf. chap. 3.2.3), le traitement des données pour déterminer les unités phytosociologiques est basé sur la typologie du GEG.

Dans le tableau global figurant en annexe 4, comme précédemment, on constate une diagonalisation. Les relevés CEJ sont ventilés dans presque toutes les unités GEG (voir tableau récapitulatif ci-après). La numérotation et la nomenclature des unités est celle de la clé du GEG (CLERC, à paraître). Les noms d'unités en gras sont ceux adoptés pour la nomenclature CEJ. La numérotation des relevés CEJ est celle des stations étudiées (l'incrémentation de +5000, figurant dans le tableau global, a été supprimée). Le numéro des unités correspond à ceux de la clé typologique du GEG.

N°	Unités GEG	Nbre	et n° rel. CEJ		
6	**Groupement à massette** (*Typhetum s.l.*)	3	505	1206	1207
7	**Marais à laiche des rives** (*Caricetum ripariae*)	6	407	540	507
			1208	3009	3010
	Roselière s.l. (*Phragmitetum s.l.*)				
	9.1 Roselière type	11	408	410	508
			1607	1911	1991
			2108	2710	2906
			2910	3011	
	9.3 variante à berle dressée (*Berula erecta*)	2	1006	1007	
	3 variante à pesse d'eau (*Lemna*) et utriculaire (*Utricularia*)	1	506		
	11 variante à laiche élevée (*Carex elata*)	2	206	409	
	Marais à laiche élevée (*Caricetum elatae*)				
	12.1 variante type	9	406	1008	1906
			1912	1913	2109
			2304	2905	3008
	12.2 variante à espèces aquatiques (*Utricularia, Nymphea alba,...*)	6	1209	1909	1910
			2105	2106	2107
	12.3 variante à myosotis des marais (*Myosotis palustris*)	4	1307	1398	2907
			2909		
	13.1 Prairie à laiche élevée atterrie type	1	2904		
	13.2 variante à laiche à utricules velus (*Carex lasiocarpa*)	1	911		
	Groupement à marisque s.l.(*Cladietum s.l.*)				
	16 Prairie à marisque type	6	204	405	903
			1011	1204	1306
	11 Prairie à laiche élevée et à marisque	5	205	910	2303
			2506	2705	
	variante à alpiste (*Phalaris arundinacea*)	1	908		
	14 Prairie à marisque et à laiche faux-panic (*Carex panicea*)	5	909	912	915
			1907	2104	
	variante à saule cendré (*Salix cinerea*) et à bourdaine (*Frangula alnus*)	3	1205	1605	2903
	Marais à petites laiches (*Ranunculo-Caricetum hostianae*)				
	17.1 Prairie à laiche faux-panic type	1	3005		
	Marais à choin (*Schoenetum s.l.*)				
	18 Prairie à choin noirâtre (*Schoenus nigricans*) et laiche faux-panic (*Carex panicea*)	1	2709		
	19.1 Prairie à choin noirâtre type	6	901	904	2305
			2505	2704	2706
	19.2 variante à choin ferrugineux (*Schoenus ferrugineus*)	1	2707		
20	**Prairie à molinie** (*Molinietum s.l.*)	5	913	1305	2302
			3006	3007	

L'intervention des relevés CEJ dans l'analyse fait apparaître quelques petites variations quant au statut phytosociologique de certains groupes. Cette question sera reprise plus bas (cf. chap. 3.4.2).

3.3.3 Les forêts

Les unités forestières des stations peuvent être déterminées par la carte des zones alluviales d'importance nationale (GALLANDAT et al. 1993). Toutefois, conformément à ce qui a été dit plus haut (cf. chap. 3.2.4), les observations de terrain ont mis en évidence quelques incertitudes. Le tableau ci-après dresse un bilan de cette situation:

Nom d'unité selon GALLANDAT et al. 1993	**Appréciations sur la conformité des unités**			
	conforme	**dune**	**transition**	**décalage**
Saulaies	208	509 916 1210 1914 2110	404 503 902 1005 2708 3001	403 905 1606 1906 2306 2504 2703 2908 3004
Aulnaies blanches	1009 1010			914
Aulnaies noires	1004 1301			
Ripisylves	906 1203 1302 1601 1904 1905 2103 2508 2702 2902 3002		203 1304 1604 1901	907 1902 1903 3003
Chênaies			202 402	
Pinèdes	401 1201 1303 1602 1603 2502 2503 2701		1202 2301	
Autres forêts en zone alluviale	1001 1002 1003 2501			
Plantations				501 502 2101 2102 2901

Explication des termes:
- conforme : correspond aux cartes de GALLANDAT et al. 1993
- dune : peuplement de dune plus ou moins dégradé
- transition : station dans des zones de transition ou en lisière de peuplement
- décalage : peuplement en situation de décalage probable (par ex.: strate herbacée non conforme aux strates ligneuses) ou peuplement potentiel dans une plantation

Les stations non conformes ont nécessité un relevé (numéro souligné), sauf pour les sites 404, 916 et 1005 où un échantillonnage sérieux était impossible (station non homogène). Quelques relevés ont tout de même été réalisés, par sécurité, dans des stations conformes. Comme dans le cas du traitement des unités fonctionnelles, nous avons déterminé, par une série d'essais, un seuil optimal de similarité. Le graphique (fig. 3.3) montre un point d'inflexion à la valeur de 0,4, pour laquelle 14 relevés atypiques (sur 41) sont écartés.

En ce qui concerne le groupement des relevés, 5 groupes ont été choisis, ce qui correspond au nombre d'unités forestières selon GALLANDAT et al. (1993) rencontrées sur les transects. Ce sont les saulaies, les aulnaies, les ripisylves de transition, les chênaies et les pinèdes. Pour les espèces, 28 groupes ont été retenus. Les espèces discriminantes sont choisies parmi celles dont la fréquence est supérieure à 2; leur nombre s'élève à 145.

Le terme du traitement des données est un tableau (tab. 3.4) présentant les caractéristiques suivantes:

- en en-tête de tableau, figurent les nombres d'espèces par strate, de même que le nombre total d'espèces, ainsi que le nombre de descripteurs (une même espèce peut être répétée plusieurs fois selon la structure). Nous remarquons que les nombres d'espèces arborescentes et arbustives sont élevés dans les groupes de relevés 1, 2 et surtout 3. Les différences entre le nombre total d'espèces et le nombre de descripteurs sont plus marquées à gauche. Les taux de recouvrement sont indiqués par strate, ainsi que la hauteur moyenne de la strate dominante;
- le groupe de relevés 1 comprend les plantations. Les groupes d'espèces 27, 28, 17 et 19 représentent un ensemble d'espèces différentielles. Les arbres dominants sont *Populus nigra* (A1, populiculture) et *Juglans regia* dominés (a2 et b2), de même qu'*Alnus glutinosa* (B1 et b2); les groupes d'espèces 7, 3 et 5 caractérisent les groupes de relevés 1, 2 et 3, ils montrent un gradient de fréquence dans le groupe 5;
- le groupe de relevés 2 se distingue surtout par les groupes d'espèces 13, 1, 12 et 9, et un peu par le groupe 8. Ce dernier est absent du groupe de relevés 3, mais on le retrouve dans le groupe de relevés 5;
- le groupe de relevés 3 est caractérisé massivement par les groupes d'espèces 7 et 5, et un peu par le 4. Les groupes d'espèces 6, et surtout 21, se rencontrent de manière égale dans les groupes de relevés 3, 5 et 4. Ce groupe est individualisé par les groupes d'espèces 10, 14 et 16, et dans une moindre mesure par le 11;
- le groupe de relevés 5 compte le plus grand nombre de relevés atypiques. Il est bien caratérisé et individualisé par les groupes d'espèces 8, 24 et 20, un peu moins par le 22, ainsi qu'une partie du 9. Le groupe d'espèces 23 est commun aux groupes de relevés 4 et 5;
- le groupe de relevés 4 ne compte que deux relevés bien typés et individualisés par les groupes d'espèces 25 et 26.

De manière générale, ce tableau présente une bonne diagonalisation des groupes de relevés et d'espèces, de gauche à droite et de haut en bas.

3.4 Discussion

Concernant les généralités sur la dynamique de la végétation, nous renvoyons le lecteur au paragraphe 1.4.2. Nous traiterons séparément la typologie fonctionnelle, la typologie phytosociologique du marais et la forêt.

3.4.1 Typologie fonctionnelle des marais

Les supports de la discussion sont le tableau résumé de la végétation (tab. 3.2) et le tableau des valeurs indicatrices (tab. 3.3).
Nous allons présenter successivement chaque groupe de relevés (Gr) à la lumière des groupes d'espèces (Gs).

Groupe Gr 1

Dans ce groupe *Phragmites australis 3* domine largement par son abondance et sa fréquence. Il est formé d'individus de plus de 3 m de hauteur avec, à l'intérieur du peuplement *Phragmites australis 2* (hauteur 1,5-3 m). Ce groupement végétal est généralement très dense et le roseau ne laisse que peu de place à d'autres espèces. Les grands carex (*Carex elata 2* et *3* et *Carex riparia*) parviennent parfois à former des touffes denses et annoncent les groupements du *Magnocaricion.. Typha angustifolia, Lycopus europaeus, Berula erecta* et *Iris pseudacorus* constituent, à côté de *Phragmites australis*, les espèces caractéristiques de la roselière du *Scirpo-Phragmitetum australis* (OBERDORFER, 1992).

Quelques espèces du Gs 1 montrent par leur présence une certaine parenté avec des unités végétales colonisant les milieux inondés devant la dune, ou derrière celle-ci, dans des fossés à eau plus ou moins stagnante. *Ranuculus sceleratus* par exemple se rencontre dans des stations riches en substances nutritives.
Dans le Gs 2, la présence de *Solanum dulcamara* implique un stade terminal de la roselière (AMMANN-MOSER, 1975) et annonce la saulaie colonisant la dune.
Dans le Gs 4, un gradient met en évidence une diminution du facteur eau libre, et corrélativement l'apparition, à droite du groupe, d'espèces ayant leur centre de gravité dans les prairies humides plus ou moins inondées: *Galium palustre, Mentha aquatica, Scutellaria galericulata* et *Stachys palustris.* ROULIER (1983) fait la distinction suivante entre la roselière lacustre et la roselière intérieure: pauvreté en espèces dans la première, flore plus riche et plus diversifiée dans la deuxième. Rien de tel n'est observé dans le cas de nos relevés si ce n'est peut-être la présence d'espèces très nitrophiles derrière la dune, ainsi qu'un appauvrissement du Gs 2, partiellement compensé par un enrichissement du Gs 4.

Dans le tableau des moyennes des valeurs indicatrices, les valeurs d'humidité F sont élevées dans les trois groupes d'espèces 1, 2 et 4, entre 4.6 et 5.0, ce qui correspond à des sols mouillés ou durablement inondés. Les valeurs de substances nutritives montrent que les sols en sont moyennement pourvus. Le facteur de dispersité D, entre 4.0 et 4.9, indique un substrat plutôt argileux, asphyxiant. Le nombre moyen d'espèces, autour de 11.6, est le plus bas pour l'ensemble de nos relevés.

Du fait de ses caractéristiques morphologiques, Gr 1 prend le nom de **groupement à grands roseaux**. Il est situé de part et d'autre de la dune. Le substrat fin et asphyxiant est inondé en permanence. L'exubérance de *Phragmites australis* ne laisse que peu de place aux espèces des groupements voisins, exception faite de quelques grands tourradons de *Carex elata 3* (>30 cm, feuilles >1 m). La fréquence de *Solanum dulcamara* permet peut-être d'établir un lien entre la dune, avec ses saulaies, et la roselière, dont les bords peuvent être fortement atterris par accumulation de litière de roseau.

Groupe Gr 2

Dans cette catégorie, *Phragmites australis 3* diminue de vitalité, laissant la place à *Phragmites australis 1* et 2, de même que les espèces caractéristiques de la roselière du Gs 2. En revanche, *Carex elata 2*, en petits tourradons, conquiert le terrain, avec des coefficients d'abondance élevés; il en est de même pour *Cladium mariscus 1* et 2. Selon KLOETZLI (1969), cette espèce colonise les vases calcaires ou les tourbes riches en calcaire; elle tolère des inondations de 0-50 cm. Ainsi que le signale BUTTLER (1987), *Cladium* a un fort pouvoir reproducteur par voie végétative, pour autant qu'un assèchement périodique se réalise.

A ce sujet, le Gs 3 est intéressant puisqu'il représente un ensemble d'espèces caractéristiques d'étang. ROULIER (1983) mentionne que ces groupements d'eau libre se développent bien en compagnie de *Phragmites australis* ou de *Carex elata* si suffisament

de lumière atteint le plan d'eau. PASSARGE (1965) in BUTTLER (1987) parle dans ce cas de complexe d'association. Ceci montre que les stations caractérisées par ce groupe Gr2 sont inondées en permanence, ce qui semble contradictoire avec les exigences de *Cladium*.

En réalité, la colonisation de ces sites par *Cladium mariscus* a pu se faire avant la 2ème correction des eaux du Jura, alors que l'amplitude du battement de la nappe était plus importante qu'aujourd'hui et déterminait, de ce fait, des périodes d'assèchement.
Sur le terrain, les stations de ce groupe se rencontrent toutes dans des cuvettes ou dépressions inondées durant toute l'année, avec parfois de très courtes et rares périodes d'assèchement. *Cladium* y garde une vitalité moyenne, en équilibre avec celle de *Carex elata* et de *Phragmites australis*.

Il est permis d'imaginer qu'une modification sensible du régime hydrique, avec une tendance prolongée à l'assèchement, puisse avoir des effets néfastes sur cet équilibre. *Cladium* pourrait alors s'imposer et le groupement s'appauvrir en espèces.
De ce fait, le Gr 2 constitue peut-être le groupe le plus fragile, dont les caractéristiques peuvent se résumer ainsi: **groupement à roseaux et laiches élevées en tourradons**, en équilibre grâce **à l'eau libre permanente**.
Les moyennes des valeurs indicatrices des Gs 3-6 confirment nos observations: les valeurs d'humidité et de dispersité élevées montrent un substrat argileux et inondé. Les valeurs moyennes de substance nutritives (<3) signalent des sols peu riches, voire maigres. Ceci s'explique peut-être par le fait que la nappe est renouvelée essentiellement par l'eau de pluie, ainsi que par les phénomènes de dénitrification..

Groupe 3

Par les Gs 4, 5 et 7, cet ensemble correspond tout-à-fait au *Caricetum elatae* reconnu sur les rives des lacs subjurassiens et largement commenté par KELLER (1969-70), AMMANN-MOSER (1975), ROULIER (1983) et BUTTLER (1987). On y rencontre toutes les espèces caractéristiques: *Carex elata, Scutellaria gallericulata, Stachys palustris, Peucedanum palustris* et *Carex riparia. Carex elata* forme de petits tourradons et n'est jamais de forme gazonnante, sauf pour les trois stations marginales 504, 910 et 1308. Celles-ci annoncent un affranchissement de l'eau et une transition vers le Gr 5.
La constance de *Phragmites australis 1* et *2,* de taille inférieure à 3 m, révèle une parenté étroite entre ce groupe et les Gr précédents 1 et 2. En fait, sur le terrain, ces groupements ne sont jamais clairement individualisés. Ils forment un continuum, dans lequel il est parfois difficile de placer des limites. L'examen des Gs 4 et 7 est à cet égard édifiant, et la diagonalisation des coefficients montre bien ce phénomène.

La présence de certaines espèces permet de reconnaître des variantes selon KLOETZLI (1969, 1972). Ainsi, *Iris pseudacorus, Symphytum officinalis* ou *Thalictrum flavum* signalent des stations inondées aux substrats riches en substances nutritives. Ce sont généralement des stations situées en bordure d'étang ou de fossés humides, à eau stagnante, sur des substrats vaseux et asphyxiants. De même, *Carex acutiformis* indiquerait une sous-association annonçant l'aulnaie noire, sur les mêmes types de substrat (AMMANN-MOSER, 1975). L'invasion progressive par des semis ou plantules d'espèces ligneuses, Gs 8 avec *Salix cinerea, Alnus glutinosa, Alnus incana* ou *Rhamnus catharticus*, confirme cette situation (cf. fig. 3.4).

Concernant les valeurs indicatrices, les Gs 1 et 2 présentent des moyennes élevées, révélant des sols inondés et riches en substances nutritives. Les Gs 7 et 8, par leurs moyennes plus basses, indiquent des sols humides et moyennement riches en substances nutritives.

Au sein de l'ensemble des unités de marais, le Gr 3 se situe au carrefour des tendances antagonistes qui agissent sur cet écosystème. Par ces caractéristiques floristiques et écologiques, il contient en germe toutes les potentialités d'évolution vers un milieu palustre, de type roselière s.l. ou vers un milieu prairial, plus ou moins humide, livré à l'embroussaillement.
Pour résumer cette ambivalence, nous lui donnons le nom de **groupement à roseaux, à laiches élevées en tourradons et à semis d'arbustes, à eau libre temporaire**.

Groupe Gr 4

Dans ce groupe, une espèce domine largement; il s'agit de *Cladium mariscus 2* dont les feuilles atteignent entre 80 et 100 cm de hauteur en position naturelle. Le Gs 4 s'amenuise fortement, notamment *Phragmites australis 2. Phragmites australis 1* (> 150 cm), à vitalité réduite, montre un déclin progessif du roseau.
Les stations de ce groupe sont, de manière générale, faiblement inondées ou seulement immergées pendant des périodes de courte durée.

Référence faite à la littérature, le *Cladietum type* se rencontre sur des sols à craie lacustre ou sur de vieilles tourbes calcaires; l'inondation y est permanente, égale ou supérieure à 25 cm (KLOETZLI, 1969). La marisque aurait une prédisposition pour l'eau claire et pour les sols argileux (KELLER, 1969-70). La plupart des auteurs (KLOETZLI 1969, AMMANN-MOSER 1975, ROULIER 1983 ou BUTTLER 1987) observent plusieurs variantes situées entre le *Caricetum elatae* (prairie à laiche élevée) et l'*Orchio-Schoenetum* (prairie à choin), certaines fréquemment intermédiaires avec le *Ranunculo-Caricetum hostianae* (prairie à petits carex). Ces variantes correspondent au degré d'inondation qui détermine la vitalité de *Cladium* et, corrélativement, la richesse spécifique de l'ensemble. D'autre part, le fort pouvoir concurrentiel et la résistance à des assèchements prolongés de cette espèce agissent négativement sur l'évolution des peuplements. Ainsi, la succession vers les prairies les moins humides à partir d'une cladiaie en voie d'assèchement a de la peine à se réaliser. *Cladium* s'impose longtemps et donne au groupement considéré le caractère de relique (OBERDORFER 1977/83 in ROULIER 1983).
ROULIER (1983), puis BUTTLER (1987) décrivent une variante inondée, dans laquelle *Cladium* domine avec une forte vitalité. Cette variante serait apparentée à la variante à *Carex panicea* du *Caricetum elatae*. A l'opposé, une variante plus sèche, dans laquelle *Cladium* a une vitalité plus réduite, est voisine de la prairie à petits carex. Elle est plus riche en espèces et comporte plusieurs semis ligneux ou arbustes comme *Frangula alnus* et *Fraxinus excelsior*.

Dans le cas du Gr 4, *Cladium* a une vitalité moyenne, et le nombre moyen d'espèces est de 19. *Carex elata* y est en forte régression, alors que *Hydrocotyle vulgaris* et *Carex panicea* apparaissent comme différentiels par rapport au Gr 2. En effet, il existe une certaine parenté entre ces deux groupes. Le Gr 2, par son cortège d'hydrophytes, présente des similitudes avec la variante la plus humide décrite par KLOETZLI (1969) ou KELLER (1969-70). Notons encore que les espèces ligneuses arrivent en force dans ce groupement: *Salix cinerea, Alnus incana, Fraxinus excelsior* et *Frangula alnus*.
La présence de *Molinia coerulea* et *Schoenus nigricans* montre une transition vers le Gr 5 voisin.
Du point de vue fonctionnel, ce groupe s'apparente à l'aile sèche du *Cladietum type*. Les stations sont situées bien en retrait de la rive, à une altitude moyenne supérieure à 429,50 m. L'existence de ce *Cladietum* sec pourrait constituer, dans ce cas, une relique de la situation antérieure à la 2ème correction des eaux du Jura.
De ce fait nous donnons à ce groupe le nom de **groupement à marisque**, auquel nous pourrions ajouter le qualificatif de "relique".

Groupe Gr 5

Dans ce groupe, le Gs 4 s'amenuise encore davantage, alors que le Gs 5 s'affirme mieux, en particulier *Carex panicea. Cladium mariscus* est toujours présent, mais avec une vitalité plus réduite, puisque la hauteur des feuilles ne dépasse pas 80 cm. Les Gs 7 et 8 ont la même importance que dans le groupe précédent. Le Gs 9 est dominé par *Molinia coerulea* et *Schoenus nigricans 2* en petits tourradons d'environ 20 cm. Une partie du Gs 9 et le Gs 10 constituent un ensemble d'espèces différentielles.

A l'examen, le Gr 5 rassemble probablement les associations les plus "sèches" pour le marais: *Orchio-Schoenetum nigricantis* (prairie à choin), *Ranunculo-Caricetum hostianae* (prairie à petits carex) et *Molinietum coerulae* (prairie à molinie).
Pour KLOETZLI (1969), l'*Orchio-Schoenetum* se rencontre dans les milieux oligotrophes, riches en calcaire. Il peut prendre naissance à partir du *Cladietum* (KELLER, 1969-70). Les espèces caractéristiques sont *Spiranthes aestivalis* et *Orchis palustris*. ROULIER (1983), de même que BUTTLER (1987), distingue plusieurs variantes: variante où *Schoenus nigricans* domine, variante à éléments du *Magnocaricion* (prairies à grands carex), variante humide à *Galium palustris* ou variante sèche avec beaucoup d'arbustes, généralement située sur molasse. *Molinia coerulea*, de même que *Cladium mariscus, Phragmites australis* et *Lythrum salicaria,* accompagnent fidèlement cette association.

Le *Ranunculo-Caricetum hostianae* (prairie à petits carex) recouvre de petites surfaces et forme des taches en mosaïque avec le *Caricetum elatae* ou le *Cladietum* dans leurs formes les moins humides. *Taraxacum palustris* ou *Sanguisorba officinalis* constituent des différentielles propres à ces unités.
Le *Molinietum coerulae* (prairie à molinie) occupe les zones surélevées, sèches en été, périodiquement inondées, sur des substrats bien aérés (BUTTLER 1987).

Pour terminer, remarquons que les valeurs d'humidité sont plus basses dans les Gs 7-10: elles caractérisent des sols à humidité moyenne, plutôt maigres. Quant aux mesures de dispersité, elles montrent des sols argileux, peu aérés pour les Gs 9 et 10 caractérisant la prairie à choin. Le nombre moyen d'espèces (20) de ce groupe est le plus élevé.
Du point de vue fonctionnel, il comprend les stations les moins humides dont certaines sont inondées faiblement, surtout en hiver. Souvent situées en bordure de forêt ou sur d'anciens cordons littoraux, ces stations sont probablement hors de l'influence de la nappe lacustre. Compte tenu de leur composition floristique, nous les nommons **groupements à choin et à molinie**.

3.4.2 Typologie phytosociologique des marais

Dans ce chapitre, nous allons discuter uniquement des différences entre le tableau final GEG proprement dit et le tableau issu des analyses intégrant les relevés CEJ (cf. annexe 4). Pour une présentation plus complète des unités GEG, nous renvoyons le lecteur au rapport accompagnant la cartographie GEG (CLERC, à paraître).

Roselière

Les 2 variantes 3 et 11 (cf. tableau global à la section 3.3.2) sont marginales. La variante à pesse d'eau et utriculaire présente une certaine parenté avec les groupes 3 et 4, étang à pesse d'eau et à nénuphar, du tableau phytosociologique (annexe 4). La fréquence élevée de *Phragmites australis*, avec des taux d'abondance prononcés, explique la présence de ces relevés avec la roselière. Un échantillonnage selon la méthode synusiale aurait certainement fait apparaître deux synusies indépendantes: l'une liée au plan d'eau libre, l'autre à la stratégie de colonisation du roseau.

La variante à laiche élevée balance, selon les modalités d'analyse, entre la roselière et le marais à laiche élevée. L'importance du groupe d'espèces 7 situe cette variante dans une phase de transition vers le marais à laiche élevée.

Marais à laiche élevée

Dans ce cas, nous ne distinguons qu'un seul groupe, alors que la clé du GEG en reconnaît deux: l'un lié à l'aile humide, l'autre à l'aile sèche atterrie. La majorité des stations CEJ sont groupées dans l'unité 12, marais à laiche élevée.

Prairie à marisque

Comme nous l'avons vu ci-dessus (cf. 3.4.1, groupe 4), la marisque est en contact avec plusieurs associations. Selon le degré d'inondation, elle peut être en position de colonisation, ou de relique. Faire un seul groupe avec ces unités disparates est une opération délicate, bien qu'elles présentent certaines similitudes. Le tableau du GEG montre que les unités ou variantes à marisque peuvent être éclatées entre le marais à laiche élevée et les prairies plus ou moins atterries. Les stations CEJ à marisque apparaissent principalement dans les groupes 16, prairie à marisque type, 11, prairie à laiche élevée et marisque, et 14, prairie à marisque et à laiche faux-panic.

Prairie à choin

La clé du GEG distingue une prairie pure à choin (unité 19), et une prairie mélangée à laiche faux-panic (unité 18) qui pourrait représenter une forme de transition. La prairie à choin 19 comprend la majorité des stations CEJ.
Ces comparaisons mettent en évidence le fait que les relevés CEJ s'inscrivent très bien dans l'ensemble des données GEG. Les seuls cas où l'on observe une différence sont ceux de stations marginales. Celles-ci constituent, dans le premier cas, des complexes d'association au sens de PASSARGE (1965), dans le deuxième cas une phase de transition. Pour le reste, la typologie phytosociologique du GEG correspond parfaitement à nos observations.

3.4.3 Typologie forestière

Si l'on compare le tableau du chapitre 3.3.3 avec le tableau de végétation des unités forestières (tab. 3.4), nous pouvons sans peine caractériser les cinq groupes de relevés grâce à l'intégration, dans le traitement des données, de quelques relevés conformes.

Groupe Gr 1

Trois relevés parmi les quatre effectués dans des plantations sont regroupés. Ils se trouvent tout à gauche du tableau et constituent l'aile sèche de ce dernier. Le relevé de la station 2901 se retrouve dans le groupe Gr 3 qui, nous le verrons plus bas, est une ripisylve de transition. En effet, dans cette station, le caractère "planté" est totalement estompé grâce à l'interruption des pratiques sylviculturales d'entretien.

Groupe Gr 2

Dans ce cas, les groupes d'espèces 1, 13, 12 et 9 rassemblent des espèces fidèles aux pinèdes : *Coronilla emerus, Berberis vulgaris, Juniperus communis, Calamagrostis varia* ou *Molinia littoralis* pour les plus remarquables. A noter que le relevé 2503 est une pinède selon la carte des zones alluviales.

Dans ce groupe, nous trouvons les relevés de stations non cartographiées en pinède mais dans d'autres unités: 1604, 1304 et 203 dans les ripisylves de transition, 402 dans la

chênaie et 2103 dans une ripisylve conforme expurgée du Gr 2. En fait, ce groupe contient à la fois des pinèdes, des ripisylves avec un faciès à pin et une chênaie. Leur point commun est une localisation sur des sols secs, généralement minces (pararenzines) et inondés qu'en période hivernale. Durant l'été, la réserve hydrique s'épuise rapidement.

Groupe Gr 3

Les groupes d'espèces 7 et 5, formés de nombreux arbustes mésophiles, permettent de reconnaître une ripislve de transition. Tous les relevés conformes figurent dans ce groupe. L'identité des autres se résume ainsi: 1901, 1902, 1903, 3003, et 907 en ripisylve à décalage. Ces cinq relevés montrent que, par l'analyse, il s'intègrent parfaitement à ce groupe-là.

Groupe 4

L'analyse confirme le statut d'aulnaie blanche. Le traitement des données, tel qu'il est pratiqué ici, montre que les incertitudes formulées plus haut peuvent être écartées. Toutefois, le grand nombre de relevés atypiques du groupe Gr 5 indique tout de même que le statut des saulaies reste incertain. Une étude spécifique de ce type d'unité permettrait de mieux comprendre leur dynamique.

Groupe Gr 5

Les groupes d'espèces 8, 24 et 20, représentent un cortège d'espèces hydrophiles, dont certaines herbacées caractérisant les associations de marais. La majorité des relevés provient de stations dont le statut phytosociologique nous semblait assez flou pour justifier la prise de relevés. En fait, tous appartiennent aux saulaies et le traitement des données, dans ce contexte, ne permet pas de dégager de tendances divergentes. Les relevés 509 et 1914 font exception, mais nous les retrouvons dans le lot des relevés atypiques du groupement voisin.

3.5 Conclusions

Dans cette partie de l'étude, nous avons tenté de comprendre la dynamique de la végétation et de mettre en lumière les réactions de certaines combinaisons d'espèces face au facteur hydrique. A cet effet, dans les marais non boisés, nous nous sommes focalisés sur **la bioindication révélée par la morphologie de trois espèces dominantes, en particulier par rapport au facteur eau.**

Ainsi, le tri des données des marais a permis de dégager **5 groupes de relevés** qui se distinguent par leur fonctionnement relativement à la nappe. Parmi ceux-ci, 3 jouent un rôle central en révélant la sensibilité du marais au facteur hydrique.
Le groupe 3, groupement à roseaux, à laiches élevées en tourradons et à semis d'arbustes, à eau libre temporaire qui, par sa nature, contient toutes les potentialités d'évolution vers l'aile humide ou vers l'aile sèche du marais, constitue un **groupement charnière**.
Par sa principale caractéristique, l'eau libre permanente, **le groupe 2, groupement à roseaux et laiches élevées en tourradons**, constitue le **garde-fou inférieur pour ce qui est de l'inondation**. La nappe devrait y rester élevée. Dans le cas contraire, on pourrait assister à un envahissement du milieu par la marisque, ainsi qu'à une diminution de la biodiversité et à un risque de déséquilibre en faveur du groupe 3.
Le groupe 4, groupement relique à marisque, représente une **limite supérieure à l'inondation**. Un apport hydrique plus fréquent et prolongé pourrait être envisagé, mais avec un risque de revitaliser la marisque, ce qui pourrait affecter, vers l'amont, la stratégie de colonisation des petits carex.

Dans tous les cas, **le groupe 5, groupements à choin et molinie**, doit être **préservé d'une inondation importante, particulièrement celle occasionnée par le lac.**

Le tableau comparatif (tab. 3.5) des unités fonctionnelles et des unités phytosociologiques utilisées pour la cartographie (CELRC, à paraître) montre que toutes les prairies à laiche élevée appartiennent, du point de vue fonctionnel, aux groupes 2 et 3, les prairies à marisque aux groupes 2 à 5. La roselière se trouve essentiellement dans le groupe 1, et les groupements de marais à choin et prairie à molinie essentiellement dans le groupe 5.
En définitive, la carte du GEG permet une utilisation satisfaisante, en termes de surface, de résultats obtenus sur la base de 15 transects linéaires.

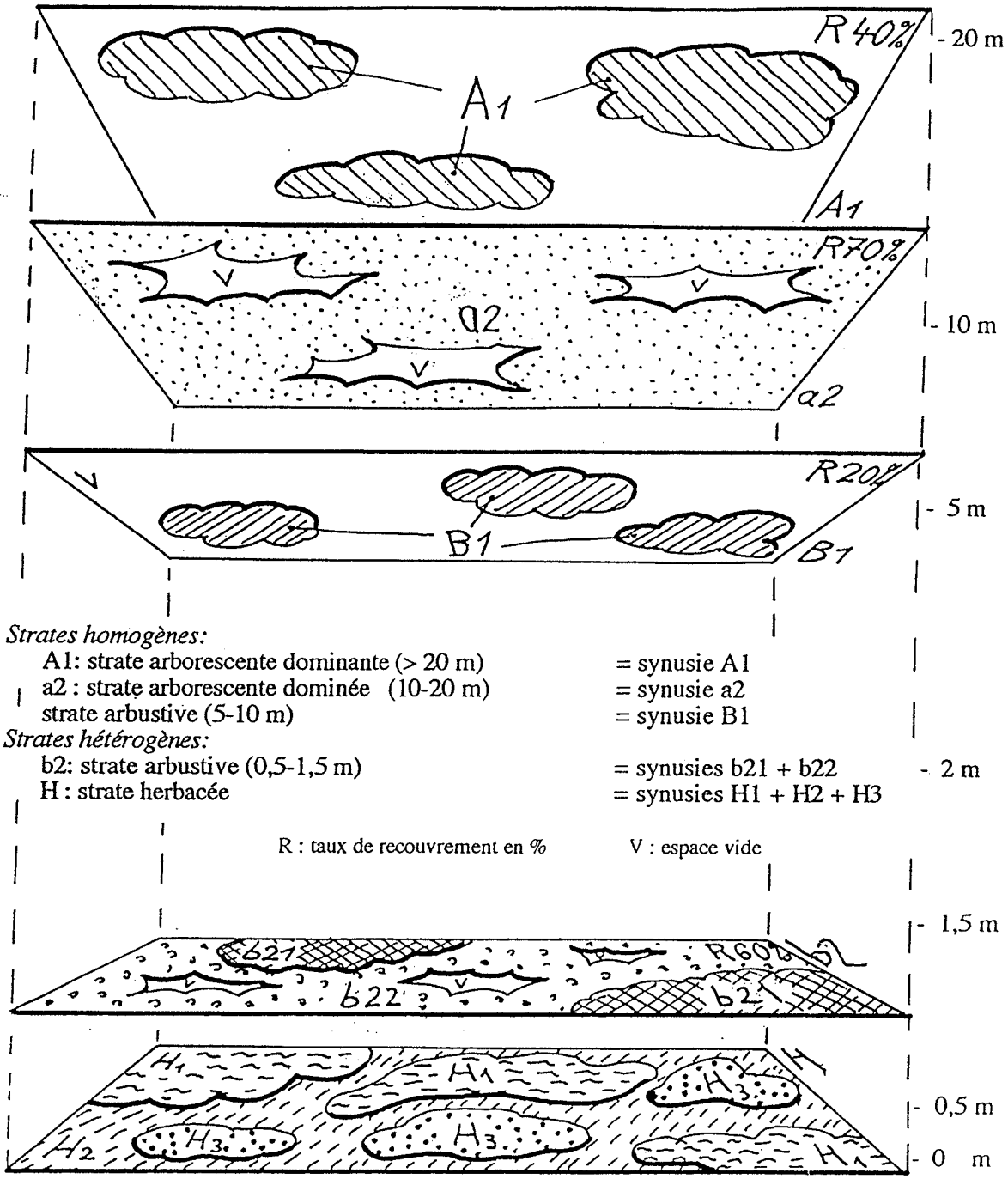


Figure 3.1 Représentation schématique de l'occupation de l'espace par une phytocoenose forestière

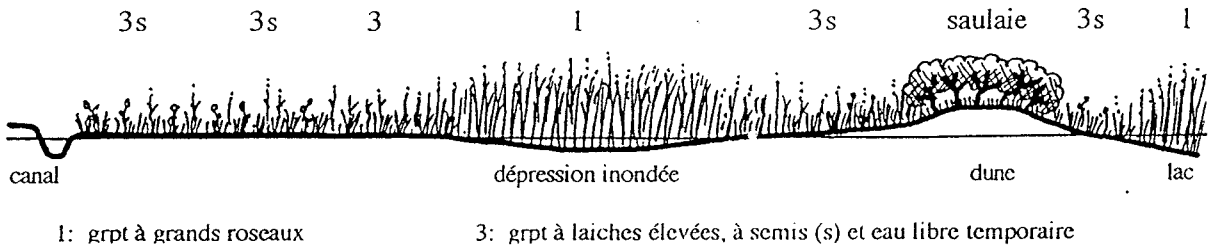


Figure 3.4 Situation du groupement fonctionnel 3 sur le transect 29

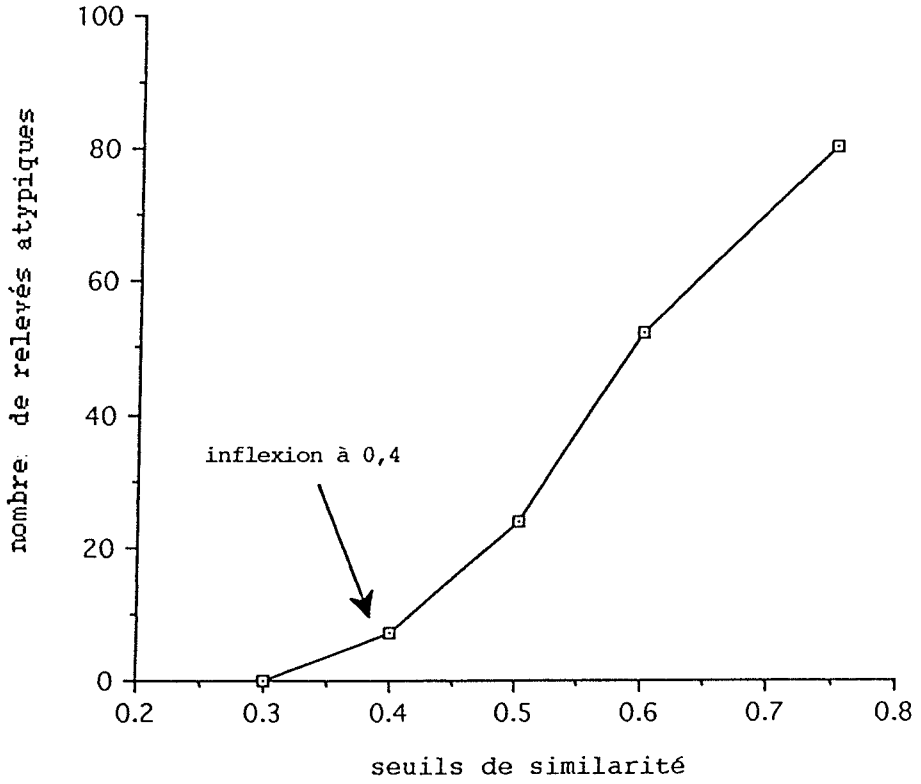


Figure 3.2 Graphique des valeurs de similarité pour les unités fonctionnelles des relevés de marais

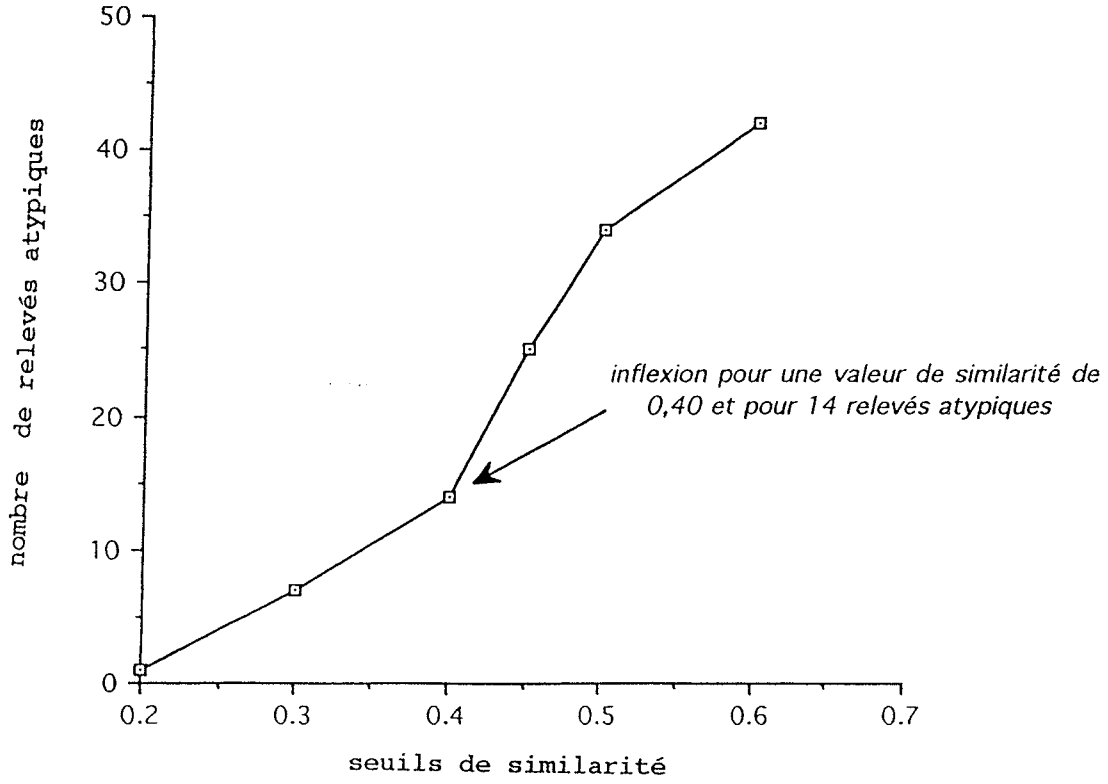


Figure 3.3 Graphique des valeurs de similarité pour les forêts

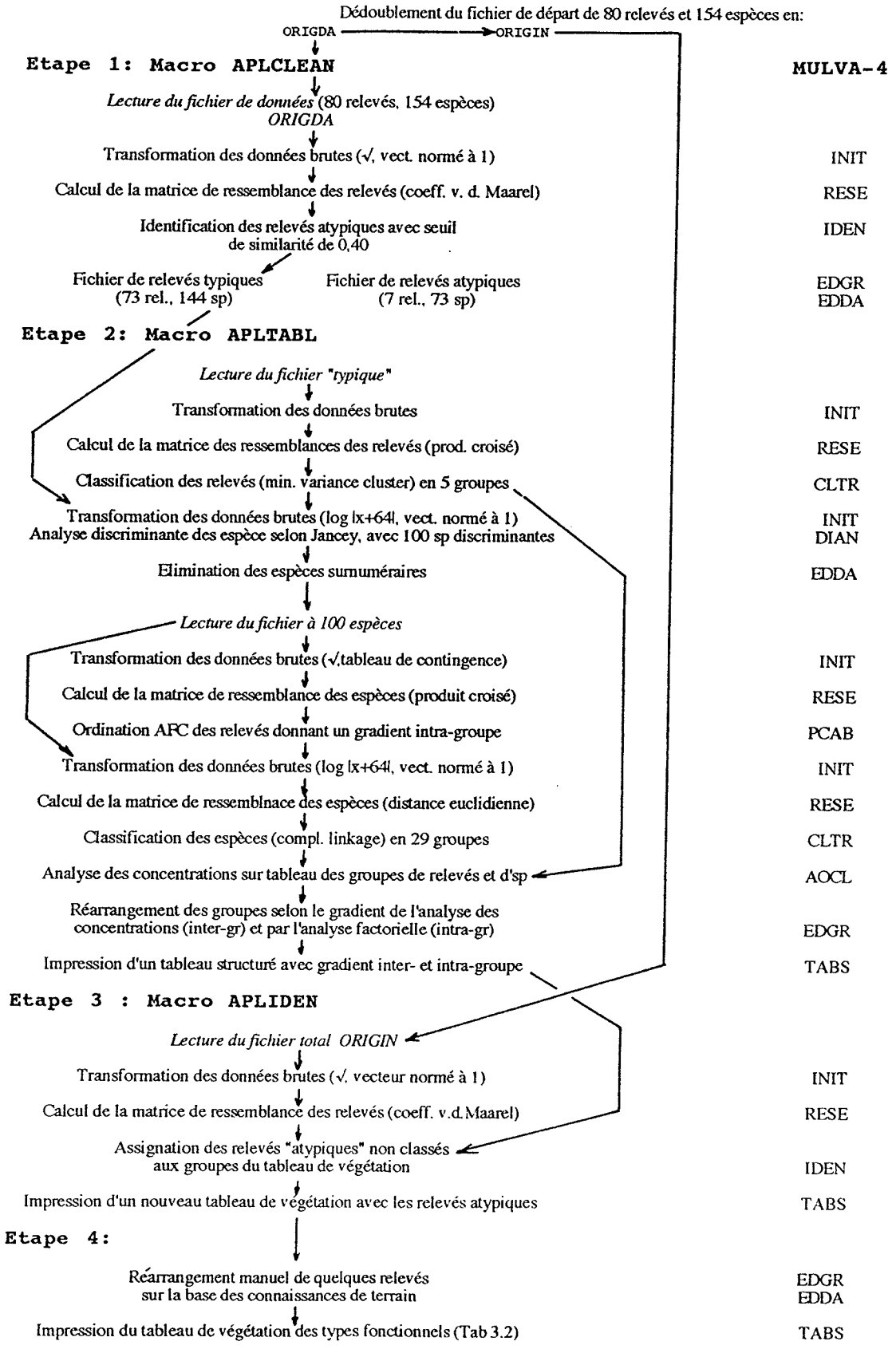


Tableau 3.1_Organigramme illustrant la démarche du traitement des données

RELÉVE GROUP NO.		1111111111111111112	2222222222222	3333333333333333333333333	4444444444444	5555555555555555
RELEVE No (80 relevés)		1112 1 2233 3	2221221 122	1111211 221122132 12	111112	222 2 12233312
		524099945649700407	119119291150	2209994939223930953959	9492203639	9937795995700037 2
		000019010001101010	000000100000	0000011010000000000001	0010010000	0100000100000000 0
		668611608770090915	569970584857	7887236143693478978540	8554516554392	2471537665675 94
NBRE D'SP/REL. (73 espèces)		111111 11 11 111	1111111111	111 2121111311122121111122	2211211122 1	1121121211 133221
		320486722890450080	6822123249	4219870979555837260247401	5922436519	7747434165992485 8
139 Carex pseudocyperus	1	++ +				
136 Riccia fluitans	1	++				
106 Ranunculus sceleratus	1	+ ++				
64 Phragmites australis 3	1	53++53231215+ +	+ +	+ + + + +		
79 Cardamine amara	1	+ 2+ + + +	+	+ 1 + + +		+
84 Carex elata 3	1	2 1+	+	++ 3 4		
99 Typha angustifolia	1	1 + + 1	+ +	3 2 2		
85 Lemna minor	2	3+ +++ 1 + 1		+ +		
88 Lycopus europaeus	2	++ + ++ + +		+ + + +		+
49 Berula erecta	2	1 3 + +		4 + + 1		+
96 Solanum dulcamara	2	++ 2 1++ ++ 1		++ + + ++	+ + +	
38 Carex riparia	2	++++ + 4 43++		+ 4 1 1 2 2		
28 Iris pseudacorus	2	+ + +		++ ++ + ++ +++++ +	+	+
62 Symphytum officinale	2	+ +		1 1 + ++1 1		++
80 Chara sp	3		322+11+1++	+ 2		
82 Utricularia ochroleucum	3	++ +	221111+ ++	++ +		
95 Nuphar lutea	3	+	22 +2			
119 Nymphea alba	3		1 1 1	1 + +		
134 Utricularia vulgaris	3		+ +			
143 Potamogeton gramineus	3		+			
122 Schoenoplectus tabern.	3		+ +	+ +		
20 Phragmites australis 2	4	3551344544+54555	++2223222+5	43422332 ++1+++1+3312441	+ + ++++	+ 1 +++
27 Carex elata 2	4	3+1++++1 1 ++24	11+3514352	1421134543342453444 43 +	+ ++ 1	+ + 2+ +
25 Galium palustris	4	+ ++++ ++ +++	+ +++++++	+2321+++1++121+111+++1++	+++++++ +	+++ + +++ 1+++++
42 Mentha aquatica	4	1 2+ + +	+ + +	+1112 11++ ++ +2 + +++	+++ + +	+ +++ +++ 122++
46 Scutelaria galericulata	4	+ +++ +	+ ++++ +++	+ + + +++ +++++++1 + +	+++ ++++++	+ + + +
45 Stachys palustris	4	+ + +	+ ++	+ 1++11 +++ +++ + ++	+ +	+ +
47 Epilobium palustris	4			++ 1 +1 ++++1+ ++	+	++
26 Phalaris arundinacea	4	2 + +		+ ++ 1++11223	2+ +	+ 1
18 Carex acutiformis	4		+	+ 1+ +	1 ++	
32 Filipendula ulmaria	4			+ + +		
43 Phragmites australis 1	5		1221211 11	2 1 1 112 12222++11+ +	1+1++++121	+1+++ ++111222+2+
89 Hydrocotyle vulgaris	5		+	++++2+ +1++	+1 + 1 +	22+++ +1++2211
24 Carex panicea	5		2	+ + +2 +	+2+1 +++	22++1 23 +2323+
22 Cladium mariscus 2	6		3443 3	2 + 2	4544454512	+3
70 Cladium mariscus 1	6		++321+3	++ 3+		33211 11412 15
68 Cladium mariscus 3	6		3		4 + 5	
48 Peucedanum palustre	7		+	2 ++++ +++1 + 1 +	++ + + +	+ 1 ++ +++1
21 Lysimachia vulgaris	7	+ +	+ 1+	+ 1++1++++12+21+1 2+2+	1+++++ 1++1	+ ++++ +111++
50 Thalictrum flavum	7	+	+	+ + + + + + ++	+ + + +	+ ++ ++++
37 Calamagrostis epigeios	7			++ 2 +12+	+ +++++ 11	++ 3 + +22
69 Carex elata 1	7	+ +	+	2 11	1 ++ + 1	12 +++ 2+ +
30 Eupatorium cannabinum	7	+		+ + 1 +	1++ 12	+ +
117 Juncus alpinus	7		+ +	1	+	+ + ++ +11+
93 Senecio palustre	7		+	+ ++	+ +	+ +++
54 Agrostis gigantea	7	+		+ + 1	+	+ +++22
108 Epipactis palustris	7					+ 1 + ++1
31 Alnus glutinosa B	8			1	1 1	
57 Rhamnus catharticus B	8			+ + + 1		+
35 Salix cinerea B	8			1 4 1	+ 3 +	+
10 Alnus incana B	8			+ 1	+ +1 ++1	+ 2 +
14 Fraxinus excelsior B	8			+	+ ++	+
1 Fraxinus excelsior s	8			+	1+ + ++	+1 + + +++
11 Frangula alnus B	8			+ +	++ 2 1+	+ 1++
15 Frangula alnus s	8			+ +	++++ +	++ + 1+ ++++
135 Salix cinerea s	8	+		+		1 +
53 Rhamnus catharticus s	8			+		+ +++
6 Viburnum opulus s	8				+	++
92 Betula pendula s	8			+	+ +	+
123 Pinus sylvestris s	8					++ + +
19 Molinia coerulea	9			+	++ 312	212213 122333++
77 Schoenus nigricans 2	9				34	44441 1 +2+
41 Equisetum palustris	9	+		+	+ +	+ + 1+
132 Beleocharis palustris	9		+	+ +		+ ++ ++
114 Taraxacum palustre	9		++	+	+	+++ +++
120 Cirsium palustre	9			+		+ ++
147 Eriophorum latifolium	9				+	+
12 Molinia litoralis	10				+	1 2 2
146 Schoenus ferrugineus	10					3 +
61 Inula helvetica	10					+ 3 +
151 Spiranthes aestivalis	10					+ +
76 Schoenus nigricans 1	10					4++++ 1
111 Sanguisorba officinalis	10					+ +

Tableau 3.2 Tableau résumé des unités fonctionnelles de marais

Groupe d'espèces		Groupe de relevés 1	2	3	4	5
1	F	5.0		5.0		
	N	3.1		3.0		
	D	4.4		4.9		
2	F	4.6		4.4		
	N	3.3		3.5		
	D	4.9		4.7		
3	F		5.0			
	N		2.5			
	D		4.9			
4	F	4.9	4.9	4.8	4.8	4.7
	N	3.0	2.9	2.9	3.0	2.8
	D	4.4	4.7	4.7	4.8	4.8
5	F		4.9	4.9	4.7	4.6
	N		2.8	2.6	2.5	2.3
	D		4.2	4.4	4.5	4.7
6	F		5.0	5.0	5.0	5.0
	N		2.0	2.0	2.0	2.0
	D		5.0	5.0	5.0	5.0
7	F			4.1	4.0	4.0
	N			2.9	3.1	2.7
	D			4.3	3.8	4.2
8	F			3.9	3.6	3.1
	N			2.4	2.6	2.3
	D			4.5	3.9	3.7
9	F				4.1	4.1
	N				2.0	2.1
	D				5.0	5.0
10	F					3.7
	N					2.4
	D					5.0
Nbre d'sp		198	129	424	207	343
Nbre de rel.		17	11	24	11	17
Nb. sp. max.		18	16	35	25	34
Nb. sp. min.		5	8	9	12	9
Nb. sp. moy.		11.6	11.7	17.7	18.8	20.2

F = Humidité
N = Subs. nutritives
D = Dispersité

Tableau 3.3 Tableau des moyennes des valeurs indicatrices pour les marais

N° des groupes de relevés		111222222223333333333355555555555555554444	
N° des relevés: (42 relevés)		22 2121 12 3211211 3 1 2232 31 1122 211 1	
		511365324210999999909995709409952637910059	
		000000000000000000000000000000010100001010 1	
		112143432232153224637154818346430663209094	
Surface (m2)		11 1 11111 111	
		5003765 510000008000341216 2 21111411 25	
		0000000 020000000000050000805500500350033	
		0000000 000000000000000000000000000000000	
Nbre d'sp / strate: arbres		1 11	
		6127576834566705024437403202244322520022 31	
arbustes		111111121111121111111 112 11 11 1	
		1757599068766753957349965894178407705 13520	
herbacées		21111111 211111211112111111222 11211 12111	
		7027587127572474055871387770069246419609 80	
Nombre total d'espèces		1322233222322242322222222222233112321112221	
		6439510925665812889496989469028868163745 31	
		//	
de descripteurs		2324344332433353443333334223332124221122221	
		4891542919794822926537645766371965634756 31	
Recouvrement/strate: arbres A		11	
		6456685776770049775759 7 43 123343382 4621	
		0000000000000000000000000000555000000000	
		1 1 1 1	
arbustes B		4707877555540647975951580495957579302 222	
		0000005000000005000000000000000005000055000	
		1 1	
herbacées H		3733176438711888877744835790326584126009790	
		0000000000000000000000005000000000000000500	
mousses M		278811331 5224532642 8111 1221 21 14	
		2005000000050000000000000000005000000--00-0	
Hauteur moyenne de la strate arborescente dominante		333112132 2232222223121 11 1 1111221 11	
		0008808055655850052025582250825520024544--	
104 Circea lutetiana	27	+ 2	
101 Humulus lupulus B2	27	+	
98 Juglans regia A2	27	1 1	
102 Ribes alpinus B2	27	+ + +	
94 Populus nigra A1	28	333 2 2 1 1	
99 Juglans regia B2	28	+++ +	
217 Viola reichenbachiana	17	1	
216 Silene vulgaris	17	+	
215 Trifolium pratensis	17	+	
214 Dactylis glomerata	17	+	+
213 Holcus lanatus	17	+	+
190 Corylus avellana H	17	+ +	
205 Epilobium montanum	17	+ +	
33 Rubus caesius H	17	23+++ 11 31+ 1 + 1 +	
181 Hypericum perfoliatum	17	+ + +	
211 Agrostis stolonifera	17	2+ + + ++ 1+ 1 1	+
166 Equisetum arvense	19	+ 1	
93 Alnus glutinosa B2	19	+ 1 + + + 1 +	
52 Alnus glutinosa B1	19	113 + 2 + 1+	
131 Deschampsia cespitosa	10	++ + 2+ 31++2 ++ 2 +	
202 Salix alba A2	10	1+ 1	
65 Prunus spinosa B2	10	+ ++ +	
25 Corylus avellana B2	7	++ 1 ++++ +	
24 Corylus avellana B1	7	2 1 11211 1 1 1	
4 Picea abies B1	7	+ +1 1+ + 111 +	
58 Cornus sanguinea B1	7	2312 21 112+32+11113 1	
11 Fraxinus excelsior A2	7	1 211111 331112122 21	
114 Picea abies B2	7	+ + ++ ++1 1 +	
23 Cornus sanginea B2	7	1211 2 1+ +21+1+1121 ++1 + +	
37 Viburnum opulus B2	7	+ ++ +11+++1++ 1+ +	
124 Quercus robur B2	7	++++ + +++ + + + +	
29 Ligustrum vulgare B2	7	++2+2 22 2211232221 111 + + 3	
61 Rubus caesius B2	7	224+12 1 14313322+1 114 ++ 1 31	
100 Cornus sanguinea H	3	+++++1 + 1+++ 2 +++ +	
60 Evonymus europaeus H	3	+ + +1 + ++ +++ + + + + + + +	
63 Viburnum opulus B1	3	2 + 2 + + 1 + + 1 1+1 + 1+	
17 Prunus avium A2	13	2 1	
226 Coronilla emerus H	13	+	
225 Berberis vulgaris H	13	+	
222 Pinus sylvestris B2	13	+	
10 Pinus sylvestris A2	13	3 1 1	
174 Berberis vulgaris B1	13	1+ + +	
177 Fagus sylvatica H	13	++ + +	
77 Calamagrostis varia	13	2 + + 1 3	
34 Viburnum lantana B1	5	2+31221221 1++ 111 1	
95 Prunus padus A2	5	1 1 111 432 2	
97 Prunus padus B1	5	1 2 +1311122 3 1 1	
197 Picea abies A2	5	1 1 11	
201 Daphne mezereum B2	5	+ + ++ ++ +	
8 Quercus robur A1	5	211113 31 12 1	
96 Prunus padus B2	5	+ 2 1+11+1+ 1 +	
56 Fraxinus excelsior B1	5	113 +11 ++1 +12+12 12 1 + +	
125 Quercus robur H	5	++++++ ++ + + + +++++ + + +	
32 Lonicera xylosteum B2	5	++112 11 + 12+211++ 1 + +	+
51 Carex flacca	5	1212332 + 11+1+1 2 +	
71 Fraxinus excelsior B2	5	++1+ 1 + 2++1211+ + ++ + + 1	
6 Fraxinus excelsior H	5	++1+1++ +2+1+1+1121 21 + + + + 1 1	
50 Brachypodium sylvaticum	5	22111211 221214313231 2+ 1+ 2	
5 Fraxinus excelsior A1	5	22111 21 322221132 1 1 1	
38 Viburnum opulus H	5	+ +++1++++ +11+1+++1+ 1+ ++ + +	

Tableau 3.4 Tableau des unités forestières

			Plantations	Pinèdes et ripisylves à faciès à pin	Ripisylves de transition	Saulaies	Aulnaies blanches
159	Rosa canina B1	1		+ +		+	
157	Ligustrum vulgare B1	1		222 2+	+ +		
26	Crataegus monogyna B1	1	+	1+2222 +	1+ 1		
31	Lonicera xylosteum B1	1		+ 1 2		1+	
59	Crataegus monogyna H	1		+++ + +	++ +	+ + + +	
1	Pinus sylvestris A1	1		232 3		2 1 +	
233	Populus canescens B2	14			+1	1	
172	Populus canescens A2	14		13 3	121 1		
13	Quercus robur A2	14		1 2	111 11 +		
36	Viburnum lantana B2	4		+1 2 11	1+1+ 1	1 + 1	
35	Viburnum lantana H	4		+++ ++	+ + ++ +	1+ +	
27	Crataegus monogyna B2	4		+ 2 2+	+ ++ + +	+ + + 1	
9	Quercus robur B1	11		1 1	+ +		
188	Acer pseudoplatanus H	11			1 + 2		
186	Acer pseudoplatanus A2	11			1 2 2		
224	Berberis vulgaris B2	12		+ +		+	
153	Pinus sylvestris B1	12		1 + 1		1	
227	Juniperus communis B2	9		+ 2			
231	Malus sylvestris A2	9		1			
171	Juniperus communis B1	9		2+			
178	Rosa canina B2	9		+2	++	1	
74	Evonymus europaeus B2	9	+1+	2	+ + ++	++ + ++ +	
120	Calamagrostis epigeios	9	2	3 3	1	1+ + +++ 3	1
182	Agrostis gigantea	9		1		+ + + + +	
57	Frangula alnus B2	9		2 +	++	+1+211+ 1 1	
68	Molinia litoralis	8		2 3+ +3	3 1	11+4 +	
72	Frangula alnus H	8		++ +		+ +	
7	Frangula alnus B1	8	+	21221 1+		1 23 1+12 +31	2
212	Rhamnus catharticus B2	24	+	+	++ + +	1+1+ +	
117	Salix cinerea B2	24			+ + +	+1+ + + ++	
109	Salix purpurea B1	24		1		23 2 1 4322 1	1
75	Salix cinerea B1	24		+	+2	321 3+331 331 1	
62	Salix purpurea B2	24		+		1 ++ +	
200	Acer pseudoplatanus B2	16	+		+ +		
154	Populus canescens B1	16	+	+ +	+ ++	1	
133	Angelica silvatica	16	1+	+	++ 1+ +++	+	++
3	Betula pendula A 1	6		1 2 2	121 2 342	1 33 111 2	
70	Alnus incana H	6		+++ +	+++ +++++ +	1 + +1+1 ++1+	
129	Rhamnus catharticus B1	6		2223 2	13 2 22	111 1 2 3	1+
115	Alnus incana A2	6		2 1 3	4111222 2	1 2 3	33
54	Alnus incana B2	21		+ 2 +	2+111+2+	211++11 1 2	1
78	Carex acutiformis	21	2	1+21 1	++34233333	312 411+41+11 2	32
76	Salix nigricans B1	21		1 2	+ 111	223 1+1 1 1 11	1
53	Alnus incana B1	21	1	+2+ +12	11+111111	+33+13313 +41	22
116	Betula pendula B2	21				+ + + +	
162	Vicia cracca	22	+	+		++ +	
239	Inula helvetica	22				11 1	
145	Stachys palustris	22				+ +	+ +
79	Molinia coerulea	20		3	+ + +	122 4+1+ 11	
55	Betula pendula B1	20		+1		+ 111++++	
81	Lysimachia vulgaris	20		+	+ + +	+ +111++ + + +1	+
82	Cladium mariscus 2	20				+1 2 + ++ 1	+
84	Lythrum salicaria	23			+ + 1+	+++1+1++ ++ ++	++
80	Phragmites australis 2	23		+ +	+ ++ ++	111+1122 1311111	2335
88	Carex elata 2	23			+	+++1+ 1 2	+
91	Eupatorium cannabinum	23		+	+ 1+ +	+ 1+ +	+++
90	Cirsium arvense	23		+	+	+1 1++ + 2	+
69	Alnus incana A1	25				1 112	12
106	Alnus glutinosa A1	25			1	1 3 1	11
86	Galium palustre	25				+ + + +	1+ +
150	Humulus lupulus B1	25		+		1	1
152	Thalictrum flavum	25					++
111	Urtica dioica	25				+1	+2+
151	Solanum dulcamara B1	25				1	2
137	Mentha aquatica	26				+ +	+ 1+ +
136	Solanum dulcamara H	26				+ +	1+11
149	Berula erecta	26					+
144	Sparganium ramosum	26					+
143	Athyrium filix-femina	26					+
139	Phragmites australis 1	26				2	21
148	Peucedanum palustre	26					++
147	Epilobium palustris	26					++
146	Scutelaria galericulata	26				+	++
142	Dryopteris filix-mas	26			+		++
141	Epilobium hirsutum	26					++

Tableau 3.4 Tableau des unités forestières (suite)

		MARAIS: comparaison des unités fonctionnelles et phytosociologiques																						
Gr.	Unités fonctionnelles	No sta.	Unités phytosociologiques (cf annexe 4)																					
			3	5	7	9	10	11	12	13	14	15	17	18	19	20	21	23	24	27	28	29	30
1	Grands roseaux	506			1																		
		206						1															
		408				1																	
		1006					1																
		1911				1																	
		1991				1																	
		2906				1																	
		410				1																	
		508				1																	
		1607				1																	
		407		1																			
		2910				1																	
		2710				1																	
		3009		1																			
		3010		1																			
		409						1															
		3011				1																	
2	Roseaux et laîches	2705												1									
	élevées en tourradons,	2105							1														
	à eau libre permanente	2106							1														
		1909							1														
		2109									1												
		2107							1														
		1910							1														
		205												1									
		1908									1												
		2104															1						
		2108				1																	
3	Roseaux, laîches	505	1																				
	élevées en tourradons	1007					1																
	et semis d'arbustes, à	1207	1																				
	eau libre temporaire	1208		1																			
		1008									1												
		2907								1													
		1912									1												
		1913									1												
		406									1												
		911										1											
		2304									1												
		2903																1					
		1206	1																				
		1209									1												
		2303												1									
		2904											1										
		1307								1													
		3008									1												
		2909								1													
		507		1																			
		1308								1													
		2905									1												
		504		1																			
		910												1									

Tableau 3.5 Tableau comparatif des unités fonctionnelles et des unités phytosociologiques des marais

4	Marisque	908														1										
		405															1									
		915																1								
		1204															1									
		1205																	1							
		1011															1									
		1306															1									
		1605																	1							
		2305																					1			
		904																					1			
		903															1									
5	Prairies à choin	909																1								
	et à molinie	912																1								
		2302																								1
		2704																					1			
		2707																							1	
		901																					1			
		2505																					1			
		913																								1
		1907																1								
		2506													1											
		2706																					1			
		3005																		1						
		3006																								1
		3007																								1
		1305																								1
		2709																				1				
		204														1										

N° des groupes (Ann.4)	Unités GEG
3	Groupement à massette
5	Marais à laiche des rives
7, 9, 10, 11	Roselière
12, 13, 14, 15, 17	Marais à laiche élevée
18, 19, 20, 21, 23	Groupement à marisque
24	Marais à petites laiches
27, 28, 29	Marais à choin
30	Prairie à molinie

Tableau 3.5 Tableau comparatif des unités fonctionnelles et des unités phytosociologiques des marais (suite)

4 ETUDE DES SOLS

4.1 Introduction

"L'étude des sols revêt une importance particulière, car le profil pédologique intègre l'action conjuguée du substratum géologique, de la nappe et de la végétation. Sur la rive sud du lac de Neuchâtel on connaît, de plus, l'histoire récente de la pédogenèse, puisque celle-ci n'a débuté qu'il y a une centaine d'années, après la première Correction des eaux du Jura. Dans ces conditions de jeunesse pédologique, l'étude de la matière organique prend toute son importance puisqu'elle révèle, mieux que les horizons profonds, le type et le degré d'évolution pédogénétique" (BUTTLER, 1987).
Pour notre projet, il s'agit de comprendre les **relations entre les niveaux du lac, les nappes, la végétation et les sols**. Il est surtout important de **détecter les traces d'hydromorphie dans les sols** et de les interpréter par rapport au contexte hydrodynamique et phytosociologique.
Les sols concernés par notre étude se rattachent tous aux sols hydromorphes. Selon les stations, nous rencontrons des pseudogleys primaires, des gleys et quelques sols bruns. Suivant la série d'hydromorphie décroissante, les humus vont des tourbes aux mulls calciques, en passant par les anmoors, les hydromulls et les mulls carbonatés. Des humus intergrades assurent une transition entre ces divers types (DUCHAUFOUR, 1983) et, comme pour la végétation, présentent un véritable continuum depuis les sols inondés jusqu'aux sols secs forestiers.

La philosophie du projet implique l'observation des phénomènes actuels et la concordance des niveaux de nappe avec la tolérance hydrologique de la végétation et des sols. Ainsi, l'approche pédologique consiste en une description sommaire de chaque site sur les transects et l'**établissement d'une typologie**.
Ce chapitre comprend une description des méthodes utilisées (chap. 4.2), puis la présentation des résultats avec discussion des types décrits (chap. 4.3). Dans la conclusion (chap. 4.4), nous tentons de mettre en évidence les situations pouvant révéler un décalage fonctionnel entre la nappe et la végétation. L'étude des sols consiste, en fait, à mieux **mettre en lumière ces décalages**.

Divers auteurs ont étudié les sols hydromorphes. Nous avons consultés les ouvrages de DUCHAUFOUR (1983), MUECKENHAUSEN (1985), REHFUSS (1981), GRATIER (1980) et BAIZE et al. (1992) pour les généralités concernant l'hydromorphie; BUTTLER (1987), BUTTLER et GOBAT (1991), CORNALI (1992) et BUECHE (à paraître) pour la connaissance des sols de la rive sud du lac de Neuchâtel; DUCHAUFOUR (1976), BAIZE et al. (1992) pour la classification, ainsi que LEGENDRE et LEGENDRE (1984), LEGENDRE et VAUDOR (1985) pour le traitement informatique des données.

4.2 Méthodes

4.2.1 Généralités

La description pédologique de chaque site sur les 15 transects (140 stations) et le délai imparti ont imposé une méthode de description simple et rapide. Les travaux de BUTTLER (1987), CORNALI (1992) et BUECHE (à paraître) fournissant déjà un important matériel à exploiter, l'idée générale étant de déterminer, à l'aide de divers essais de traitement des données existantes, un petit nombre de paramètres à mesurer sur le terrain, de manière à pouvoir établir une typologie.
Le plan de travail peut se résumer comme suit:

- consultation du matériel de base;
  (les descriptions pédologiques issues des travaux cités plus haut);
- sélection de descripteurs qualitatifs, semi-quantitatifs et quantitatifs;
- traitement des données à l'aide de plusieurs techniques multivariables;
- évaluation des résultats par rapport aux données de départ;
- choix des descripteurs les plus discriminants et d'une méthode de traitement adéquate pour nos propres données;
- préparation des fiches pour l'échantilonnage de terrain;
- traitement des données échantillonnées;
- typologie des sols.

4.2.2 Résultats des essais

Choix des descripteurs.

- types d'humus: la caractérisation de l'humus, type et épaisseur, est importante pour apprécier la relation végétation - nappe - sol. Elle permet de mettre en évidence le degré d'hydromorphie passé et actuel.
  Nous avons retenu 8 catégories de descripteurs qualitatifs (binaires): moder (Mo der) - mull calcique (Mu ci) - mull carbonaté (Mu ca) - hydromull (Hy mu) - anmoor (An moo) - tourbe eutrophe (Tou eut) - tourbe minéralisée (Tou min) - horizon intermédiaire (Hor int) et 1 descripteur quantitatif: épaisseur de l'humus en cm.

Trois descripteurs sont utiles indirectement à la description de l'humus. Ce sont:

- la structure: elle décrit l'arrangement des particules du complexe organo-minéral. Nous avons retenu 6 descripteurs qualitatifs (binaires): compacte-fondue (Com fon) - fragmentaire angulaire (Fr ang) - fragmentaire sphérique (Fr sph) - fragmentaire polyédrique (Fr pol) - particulaire minérale (Par min) - particulaire organique (Par org);
- la texture de l'humus: elle décrit le classement granulométrique des particules minérales. Nous avons retenu 7 descripteurs qualitatifs (binaires): sableux (Sa) - sablo-limoneux (SL) - limoneux (Li) - limono-argileux (LA) - argileux (Ar) - squelette calcaire (Sq ca) - squelette siliceux (Sq si);
- le test à l'acide chlorhydrique de l'humus (HCl 6 N): ce test permet de déterminer si l'échantillon est décarbonaté ou non. Ce descripteur semi-quantitatif comprend 4 niveaux: 0 pas de carbonates - 1 faible effervescence, peu de carbonates - 2 effervescence moyenne, teneur moyenne en carbonates - 3 forte effervescence, teneur élevée en carbonates.

Les descripteurs suivants intéressent le substrat minéral:

- texture de l'horizon minéral: ce sont les mêmes catégories que pour l'humus. Ce descripteur permet d'estimer le degré de perméabilité du substrat minéral;
- test à HCl de l'horizon minéral: les catégories sont les mêmes que pour l'humus. Ce descripteur permet de vérifier si le susbstrat est calcaire. Ceci est généralement le cas sur la rive sud, puisque les sédiments proviennent de la dégradation de la molasse, mis à part les éléments cristallins et sédimentaires grossiers issus des colluvions fluvio-glaciaires;
- niveau d'oxydation (profondeur en cm): 5 descripteurs quantitatifs délimitent ces niveaux plus ou moins bien marqués: taches d'oxydation diffuses (Tache oxyd), niveau net entre gley oxydé et gley réduit (Go net), niveau diffus (Go diffus), plancher net des couches pseudogleyifiées (Sd net) et plancher diffus (Sd diffus). Ces descripteurs contribuent à définir le degré d'hydromorphie et d'aération du substrat minéral;

- horizon B (profondeur en cm): ce descripteur quantitatif permet de détecter l'existence d'un horizon d'accumulation et donne un indice du degré d'évolution du sol;
- molasse: 2 descripteurs quantitatifs donnent (en cm) la profondeur du plancher molassique: celui de la molasse altérée (C altér) et celui de la molasse compacte (C comp). Ces valeurs indiquent l'épaisseur du sédiment meuble, ainsi que celle de l'aquifère.

La transcription de ces descripteurs dans le fichier de données est présentée dans le tableau 4.1. A la suite des premiers essais d'analyse des données, nous avons pu réduire le nombre des descripteurs (tab. 4.4).

Echantillonnage

Sur la base des descripteurs sélectionnés, nous avons établi une fiche de terrain (tab. 4.2) de manière à faciliter l'échantillonnage.
Pour des questions d'efficacité, nous avons renoncé au creusage de fosses pédologiques, opération de toute façon impossible en terrain inondé. En conséquence, nous avons prélevé des échantillons au moyen d'une tarière spéciale en tube d'acier inoxydable (fig. 4.1). Cet outil permet, avec un minimum de destruction des structures, de sortir des carottes de 5 cm de diamètre afin de décrire le sol. Cette méthode a l'avantage de permettre le prélèvement de plusieurs échantillons en différents endroits et de les comparer simultanément lors de la description, en les disposant les uns à côté des autres (fig. 4.1).
Les structures sont observées à la loupe de terrain, la texture estimée au toucher, la présence ou non de carbonates détectée avec HCl et, au sein du profil, la profondeur des discontinuités mesurée en cm. Précisons qu'en raison des dimensions de l'outil, il n'a pas été possible de faire des prélèvements au-delà de 80 cm de profondeur. Cette cote est largement suffisante pour le marais, mais non pour la forêt sur sédiments meubles.
Un autre inconvénient réside dans le fait qu'il est parfois difficile avec cette technique, par manque de vue d'ensemble, de pouvoir apprécier correctement les niveaux d'oxydation et de déterminer la nature des traces d'oxydation. Or, cette observation s'avère indispensable pour savoir si l'on est en présence d'un gley ou d'un pseudogley. D'autre part, malgré les précautions prises, la structure de certains horizons organo-minéraux a parfois été mise à mal par tassement. Ainsi, il n'a pas toujours été possible de différencier avec sûreté un anmoor d'un hydromull, ou même d'un mull détrempé par une pluie récente.
Hormis ces réserves, cette méthode d'échantillonnage est tout à fait appropriée pour effectuer une première approche de terrain. Elle permet de trouver rapidement les principales limites pédologiques et de révéler des situations critiques. Par contre, elle n'est pas adaptée à la description sûre et précise de sols qui ne correspondraient pas aux types connus sur la rive (BUTTLER & GOBAT 1991, CORNALI 1992).

Traitement informatique

L'établisement d'une typologie par la technique du groupement nécessite une matrice de ressemblance adaptée aux données. LEGENDRE et LEGENDRE (1984) proposent plusieurs coefficients pour la mesure de ressemblance, parmi lesquels nous avons choisi le coefficient symétrique de Gower (tab. 4.3). Les calculs ont été effectués avec le progiciel R de LEGENDRE et VAUDOR (1985).
Décrivons brièvement les divers programmmes choisis:

- VERNORM: ce programme permet de vérifier et de transformer (normalisation) les données écrites dans un fichier ASCII.

fichiers ASCII ---> VERNORM ---> données transformées;

- SIMIL: ce programme permet d'établir une matrice des valeurs de similarité (coefficient S15). Une option offre la possibilité de pondérer certains descripteurs. Ainsi, dans l'analyse avec un fichier réduit nous avons choisi la valeur W=1 pour les 22 premiers descripteurs (tab. 4.4), W=8 pour accentuer l'importance du niveau d'oxydation et W=4 pour le plancher molassique.

  données transformées ---> SIMIL ---> matrice de ressemblances (S15);

- GROUPEMENT: ce programme permet de choisir entre deux algorithmes de calcul: groupement à liens proportionnels, pour lesquels il faut donner une valeur de connexité, et groupement selon l'algorithme de Lance et William. Nous avons retenu le premier, avec une connexité de 1. Ce programme fournit également des statistiques annexes permettant d'évaluer l'adéquation entre le groupement produit et la matrice de similarité d'origine (corrélations cophénétiques). Ces valeurs ont été utilisées lors des essais mentionnés plus haut.

  matrice des similarités ---> GROUPEMENT ---> dendrogramme et statistiques.

Les types de sols issus du groupement sont présentés dans le tableau 4.5, partiellement réarrangé pour regrouper les types de sols apparentés. Le tableau final (tab. 4.6) présente 4 types de sols (y compris des sous-types) avec leurs principaux descripteurs.

Conclusions sur le choix de la méthode

Compte tenu des réserves concernant l'échantillonnage, il nous a paru nécessaire d'épurer quelque peu le tableau de données inital. Après quelques analyses préalables, nous avons pu réduire le nombre de descripteurs de 40 à 24 (tab. 4.4).
Ainsi, les types d'humus passent de 8 à 7; pour la structure le nombre de descripteurs est réduit à 6; pour la texture de l'humus et de l'horizon minéral, ce nombre passe à 3. Les catégories intermédiaires de textures ont été écartées, de même que le squelette. En effet, le substrat minéral montre une grande uniformité faite d'alternances répétées de niveaux sableux et limoneux, quelques fois un peu argileux. Dès lors, une caractérisation des sols sur cette base devient délicate, voire impossible.
Concernant la distinction entre gley et pseudogley, et compte tenu de la difficulté de reconnaissance des caractères sur le terrain, nous avons préféré ne conserver qu'une catégorie: épaisseur du niveau oxydé, quelle que soit son origine: fluctuation d'une nappe profonde permanente ou nappe perchée temporaire.

4.3 Principaux types de sols

4.3.1 Résultats

Dans les travaux effectués à ce jour sur la rive sud du lac de Neuchâtel, 22 types de sols ont été décrits. En ce qui concerne nos propres données, l'examen du dendrogramme (non représenté) fait apparaître des possibilités de séparation à 6, 9 et 14 groupes. Le tableau 4.5 présente ces groupes, avec le résultat des moyennes calculées pour les descripteurs quantitatifs (la variable semi-quantitative du test HCl est considérée ici comme quantitative).
A l'intérieur de ces divisions, des sous-groupes apparaissent, qui sont présentés ci-dessous:

- groupe A : gley réduit-oxydé à anmoor, hydromull ou tourbe
  - A11 : gley réduit à anmoor tourbeux, humus 16 cm, molasse 83 cm
  - A12 : gley réduit à anmoor-hydromull, humus 16 cm, molasse 224 cm
  - A21 : gley oxydé à hydromull, humus 10 cm, niveau d'oxydation 22 cm, molasse 48 cm

- groupe B : gley oxydé à mull calcique ou carbonaté, ou à hydromull
  - B11 : gley oxydé à mull calcique, humus 8 cm, niveau d'oxydation 32 cm, molasse 60 cm
  - B12 : gley oxydé à mull carbonaté, humus 13 cm, niveau d'oxydation 32 cm, molasse 60 cm
  - B21 : gley oxydé à mull carbonaté, humus 18 cm, niveau d'oxydation 40 cm, molasse > 500 cm
  - B22 : gley oxydé à hydromull, humus 9 cm, niveau d'oxydation 23 cm, molasse > 200 cm
- groupe C : gley réduit et quelques gleys oxydés
  - C11 : gley réduit à mull carbonaté, humus 8 cm, molasse > 200 cm
  - C12 : gley réduit-oxydé, à anmoor-hydromull, humus 12 cm, niveau d'oxydation 8 cm, molasse > 500 cm
  - C13 : gley réduit-oxydé, à anmoor, humus 5 cm, niveau d'oxydation 57 cm, molasse > 200 cm
  - C21 : gley réduit à anmoor tourbeux, humus 21 cm, molasse > 200 cm
- groupe D : gley oxydé à hydromull, mull carbonaté ou mull calcique, humus 15 cm, niveau d'oxydation 38 cm, molasse > 500 cm
- groupe E : gley oxydé à mull calcique et tourbe, humus 70 cm, niveau d'oxydation 130 cm, molasse > 500 cm
- groupe F : gley oxydé à mull carbonaté, humus 15 cm, niveau d'oxydation 97 cm, molasse > 200 cm

4.3.2 Discussion

Si l'on se place au niveau des groupes, il est difficile de construire un ensemble homogène. Par contre, au niveau des sous-groupes, des unités apparaissent, malgré quelques petites irrégularités. C'est le cas notamment pour les sous-groupes A11, C12 et D (tab. 4.5).
En exposant ci-après les raisons de ces variations, nous proposons un groupement amélioré, mieux à même d'expliquer la diversité pédologique de la rive.

Groupe A11. Ce groupe à gley réduit comporte des stations à anmoor et des stations à anmoor tourbeux. Considérant les types d'humus, nous pouvons remarquer deux catégories bien distinctes:

- gley réduit à anmoor tourbeux très humide
- gley réduit à anmoor un peu moins humide.

Groupe C11. Ce groupe comprend quelques stations à anmoor-hydromull. Comme il a été dit plus haut (cf. 4.2.2), la distinction anmoor-hydromull est parfois rendue difficile par l'état détrempé de l'humus. Compte tenu de la présence d'un niveau d'oxydation marqué, il s'agit dans ce cas plus vraisemblablement d'un hydromull. Ces stations forment, avec les sous-groupes A21 et B22, un gley sous humus de type hydromull.

Groupe D. Ces stations sont toutes forestières, certaines sur des cordons littoraux, parfois anciens. Ce groupe réunit des sols relativement évolués pour la rive sud, avec des humus de type mull carbonaté ou légèrement décarbonatés en surface, voire totalement décarbonatés. Les deux premières stations, les plus jeunes de ce groupe, sont caractérisées par des hydromulls.

Finalement, compte tenu des remarques qui précèdent, un réarrangement manuel est effectué. Le tableau réduit 4.6 résume les quatre types de sols que l'on rencontre sur les

transects étudiés. Ces groupes et sous-groupes sont présentés par ordre d'hydromorphie décroissante (la numérotation en marge des tableaux ne correspond pas à cet ordre et n'est pas équivalente à celle du tab. 4.5).

Groupe 2: gley réduit à tourbe et anmoor tourbeux

Ss-groupe 23: tourbes. Une nappe permanente empêche la décomposition de la matière organique qui s'accumule et forme parfois un manchon fibreux non décomposé autour des touffes ou entre les touffes de végétation. Bien que ce processus soit très jeune sur la rive sud (environ 100 ans), nous pouvons parler d'une formation de tourbe. Les trois stations appartenant à ce sous-groupe présentent des gleys réduis surmontés d'horizons tourbeux relativement épais (de 25-34 cm) compte tenu de leur âge. Ces stations sont toujours inondées, non aérées.

Ss-groupe 21, 22: anmoor tourbeux. Lors des mouvements de la nappe, des minéraux fins mélangés à des excréments animaux et des fragments de litière déjà fortement humifiée viennent empâter la tourbe en formation. Il en résulte une masse organo-minérale à structure fondue. De brèves périodes d'assèchement activent la décomposition de cet ensemble et donne à cet humus son caractère hybride. La plupart des stations représentées ici proviennent de zones toujours inondées, parfois très brièvement asséchées.

Groupe 1: gley réduit à anmoor (-hydromull)

Comme dans le groupe précédent, la matière minérale fine, mélangée à de la matière organique humifiée sur place ou héritée (apportée par l'eau), donne un humus pâteux, gluant et de couleur très foncée, correspondant à un anmoor. Cet humus se forme dans des zones presque constamment inondées, avec de courtes périodes d'assèchement. La différence avec le groupe précédent réside dans la durée des périodes d'assèchement. Si la période est nulle ou très courte, il y aura formation de tourbe ou d'anmoor tourbeux, en conditions d'anaérobiose. Si la période d'assèchement est un peu plus longue, la décomposition de la litière, bien que peu active, est possible. L'anmoor peut aussi se former à partir de gyttja, matériau constitué de débris organo-minéraux fins, sédimentés dans une nappe d'eau bien oxygénée (MUECKENHAUSEN, 1985). Dans ce contexte, le phénomène d'héritage semble jouer un rôle important. Dans ce groupe, le gley est toujours réduit et témoigne d'une inondation permanente du substrat minéral.

Ss-groupes 11 et 13: anmoor. L'humus relativement mince est parfois exondé.

Ss-groupes 12 et 14: anmoor-hydromull. Si les périodes d'assèchement se prolongent, l'humus peut subir une intervention biologique par une faune terrestre cherchant refuge dans les tourradons voisins en période d'inondation. Ainsi cet humus devient légèrement grumeleux. Toutefois, l'observation de ce phénomène est rendue difficile par les conditions hydriques du jour.

Groupe 3: gley à hydromull

Ss-groupes 31 et 32: hydromull sur gley réduit. Lorsque, lors des alternances du degré d'hydromorphie, les périodes de sécheresse se répètent et se prolongent, le phénomène de maturation de l'humus s'accentue. C'est bien ce que l'on observe dans les stations de ce groupe.

Ss-groupes 33 et 34: hydromull sur gley oxydé. L'ampleur de l'exondation est telle qu'elle peut intéresser également une partie du substrat minéral, qui devient aéré dans ses couches supérieures. Il est ainsi possible d'observer un gley oxydé dont l'épaisseur moyenne se situe autour de 30 cm. L'épaisseur de la couche d'humus est comparable à celle de l'anmoor, ce qui constitue, compte tenu de la jeunesse de ces sols, une valeur relativement élevée.

Groupe 4: gley à mull carbonaté et à mull calcique

Vu la situation topographique de ces stations forestières, la nappe inonde très rarement les couches d'humus. Elles sont, de ce fait, soumises quotidiennement à l'action des populations de décomposeurs terrestres. De plus, ces stations forestières, avec beaucoup d'espèces ligneuses à bois tendre, produisent une litière de type améliorante qui se décompose rapidement. La matière organique se transforme en humus grumeleux, aéré, typique des mulls. Ce type représente le terme de la série des humus hydromorphes, toujours carbonatés puisque réalimentés par l'activité des organismes fouisseurs brassant l'humus.

Ss-groupe 41: mull carbonaté sur gley réduit. Dans cette série, nous observons de rares cas où le sédiment, sous un mull, est de nature réduite, notamment dans les stations de dunes peu élevées. Dans ces situations très perturbées, l'apport latéral de matière organique grumeleuse formée dans des stations plus élevées est probablement important.

Ss-groupes 42 et 43: mull carbonaté sur gley oxydé. La majorité des stations à mull carbonaté se trouvent sur des gleys oxydés relativement épais (110 cm et plus). La puissance des couches oxydées y est en relation directe avec l'intensité de l'évapotranspiration.

Les sous-groupes suivants étant très faiblement représentés, nous avons renoncé à leur attribuer une catégorie propre, bien que leurs caractéristiques le permettent.

Ss-groupe 44: mull calcique sur tourbe. Ces stations forestières sont localisées sur des tourbes de bas-marais, restes de l'ancienne plaine alluviale du Grand Marais. Ces tourbes, d'épaisseur variable, sont plus ou moins minéralisées. L'humus en surface est un mull calcique, totalement décarbonaté, car isolé du substrat minéral calcaire par l'épaisse couche tourbeuse. L'ensemble repose sur un lit de gley oxydé.

Ss-groupe 45: mull calcique. Cette division présente des sols à humus calcique, décarbonatés avec l'âge. Ils caractérisent certaines stations en chênaies ou en pinèdes; on peut les considérer comme les sols les plus anciens de la rive sud du lac de Neuchâtel.

4.3.3 La distinction gley - pseudogley

Le Référentiel pédologique (BAIZE et GIRARD 1992) souligne l'**ambiguité qui existe quant à l'utilisation des termes gley et pseudogley**. Il faut noter qu'un même mot peut recouvrir des concepts ou des objets assez différents. La description d'un horizon de pseudogley, par l'observation de taches ou bandes grisâtres et ocre, ou rouille, est somme toute assez proche de celle de l'horizon oxydé d'un gley. Ces critères de distinction paraissent vagues et peu précis. Quant au caractère hydrique, il permet de différencier ces deux catégories de sols: pseudogley = nappe temporaire perchée, d'origine pluviale, gley = nappe phréatique permanente et fluctuante. Toutefois, ce caractère ne permet pas de décrire toutes les situations.
C'est pourquoi, il est proposé de les remplacer par les termes de **réductique** et **rédoxique**, qui recouvrent des concepts bien précis, liés à la ségrégation du fer. Ils sont définis comme suit:

- *horizon réductique s.s. (Gr)*: horizon caractérisé par une couleur dominante grise, révélant une répartition **homogène** du fer.
- *horizon réductique temporairement réoxydé (Go):* horizon présentant des taches rouille au contact des vides, ou autour des racines. Il s'agit, en fait, d'une **redistribution centrifuge** du fer migrant lors de l'assèchement de l'horizon, de l'intérieur des agrégats vers leur surface. Cette **ségrégation** est **fugace**, et lors d'une resaturation du substrat, le fer redevient mobile et se répartit de manière uniforme.

- *horizon rédoxique (g ou -g):* on observe une juxtaposition de plages et traînées grises et de taches, nodules ou concrétions de couleur rouille. La répartition du fer est très **hétérogène**. A saturation, il subit une **redistribution centripète**, de l'extérieur vers l'intérieur des agrégats. Ceux-ci présentent des teintes plus marquées dans leur partie interne. Lors de la dessication, le fer migrant s'immobilise rapidement. Cette **ségrégation** est **permanente**. Lors d'une resaturation, le fer immobilisé le reste et tend à former des accumulations, siège de croissance des nodules ou concrétions.

Concernant l'existence de pseudogleys, les stations observées n'ont jamais montré de bonnes situations typiques. Le plancher de la molasse, sous les quelques sols superficiels étudiés, présente un pendage vers le lac, avec une possibilité de drainage vers l'aval. Dans ces situations, la nappe est oxygénée, mais pas suffisamment immobilisée pour permettre au fer de réaliser des migrations centripètes, vers l'intérieur des agrégats, et de former des plages, taches ou nodules de couleur rouille typiques des pseudogleys. Toutefois, il est imaginable que la lenteur du flux hydrique, la jeunesse des sols et le milieu basique, puissent être à l'origine d'une situation intermédiaire entre horizons oxydés de gley et de pseudogley. Des descriptions plus complètes et une discussion concernant ces sols sont données par BUTTLER et GOBAT (1991) et CORNALI (1992). L'insuffisance des moyens mis en jeu n'a pas permis de trancher de manière sûre cette délicate question. Les sols pouvant présenter cette situation semblent plutôt rares dans le domaine de fluctuation de la nappe lacustre.

En définitive, nous observons trois cas de figure (fig. 4.2):

1) Le gley est toujours réduit, inondé en permanence par le lac, par le ruissellement de la falaise ou l'eau météorique dans les situations à faible drainage. Le battement de la nappe a lieu au-dessus de l'humus, ou n'intéresse, de manière temporaire, qu'une partie de celui-ci, pendant la période de végétation. Ainsi, les caractères de l'humus révèlent la gradation de ces fluctuations:

   tourbe ---> anmoor tourbeux ---> anmoor ---> anmoor-hydromull

   sans période d'exondation ----------> avec courtes périodes d'exondation;

2) Les gleys sont réduits, parfois plus ou moins oxydés en surface (30 cm), et les humus sont toujours des hydromulls. Ce cas révèle une fluctuation saisonnière de la nappe, agissant sur l'humus seul ou intéressant également la partie supérieure des sédiments. L'origine de la nappe peut être lacustre ou pluviale, alors que le ruissellement de falaise ne semble pas intervenir;

3) Les gleys sont toujours oxydés en surface (exception faite des 4 stations de dune), avec des épaisseurs moyennes de 40-90 cm, voire plus selon les cas. Ces fluctuations sont fortement dépendantes de l'évapotranspiration. Les humus, des mulls carbonatés, présentent une bonne activité biologique grâce à laquelle la litière est rapidement décomposée. Des mulls calciques, sur d'anciennes tourbes ou sur des sols exondés avant la correction des eaux de Jura, caractérisent des stations extrêmes (altitude élevée, éloignement du lac).

4.4 Conclusions

Tous les sols étudiés sont influencés par la nappe et peuvent être qualifiés d'**hydromorphes**. L'altitude de la station et sa situation par rapport au lac jouent un rôle dans l'hydromorphie. Ceci se traduit par l'observation, en surface, de **diverses catégories d'humus** et, dans le substrat minéral, de **divers degrés d'oxydation**.

Comme il a été dit plus haut, **la nappe est prépondérante pour la formation et l'évolution des sols**. Ceux-ci sont jeunes, mais la végétation, du fait de sa forte production (-> 500 g/m²/an, BUTTLER et GOBAT, 1991), produit beaucoup de litière qui, si les conditions d'aérobiose sont insuffisantes (nappe permanente), est génératrice de tourbe.
Si l'on compare les types fonctionnels de végétation avec les types de sols (tab. 6.1), on constate que, pour le groupement à grands roseaux (Gr 1), les sols sont des **anmoors** ou **anmoors tourbeux**. La nappe permanente détermine clairement la typologie des sols. Pour une partie des stations (étangs), les sondages pédologiques n'ont pas été possibles à cause de l'inondation.
Le groupement à roseaux et laiches élevées en tourradons et à eau libre permanente (Gr 2) est défini (chap. 3.4.1 et tab. 3.2) comme étant en **équilibre instable du point de vue fonctionnel**. Il comprend sans exception les sols les plus hydromorphes, avec des humus du type **tourbe**, **anmoor tourbeux** et **anmoor**. Dans le groupement fonctionnel voisin, groupement à roseaux, à laiches élevées en touradons et à semis d'arbustes, à eau libre temporaire (Gr 3), l'hydromorphie est encore marquée. Toutefois, suite aux effets d'un **assèchement périodique**, certains sols présentent un **début de maturation de l'humus**. Les anmoors montrent une **évolution vers les hydromulls**. Conjointement, le niveau d'oxydation se marque peu à peu. Ce phénomène tend à s'accentuer dans le groupement à marisque (Gr4), puisque l'on note la présence d'une station (908) sur **mull carbonaté**.
Ces deux groupements fonctionnels (Gr2 et Gr3) correspondent aux milieux avec **décalages possibles entre le sol et la végétation**. Ces décalages sont réels dans quelques stations du Gr3 (2903, 2904, 2905, 2907, 2909 et 1308), les mêmes que celles annonçant les aulnaies noires (cf chap. 3.4.1).
En ce qui concerne le groupement à marisque (Gr4), ces considérations pourraient être valables également, mais la large amplitude écologique de cette espèce masque cet aspect.
Les sols du groupement à choin et à molinie (Gr5) sont des **gleys oxydés à hydromull**. Ils caractérisent des milieux à humidité très variable, nappes pluviales inondantes, alternant avec des **périodes plus ou moins longues de sécheresse**. Les sites 909, 912, 913 et 204, stations à anmoor au milieu de stations à hydromull, signalent la présence d'une microtopographie en creux et bosses, avec une mosaïque de sols hydromorphes. L'humus y oscille entre anmoor et hydromull.
La majorité des sols à gleys oxydés et mulls carbonatés accompagnent les manteaux forestiers et les forêts.

A l'évidence, l'étude des sols aide à la description et à la compréhension des groupements fonctionnels. Elle confirme la **situation d'équilibre hydomorphique incertain des groupements fonctionnels Gr2, Gr3 et Gr4**. Mieux, elle met en lumière l'effet de bascule pouvant influencer leur évolution, le facteur moteur étant le degré d'hydromorphie (cf. fig. 4.3).
Si l'étude de la végétation a permis de mettre le doigt sur des situations critiques, l'étude pédologique permet encore mieux de les cerner.
En définitive, cette étude pédologique est à considérer comme une première approche. Elle met en évidence des objets méritant des investigations plus approfondies. Dans quelques stations bien ciblées, certaines analyses de laboratoire permettraient de mieux comprendre et décrire la dynamique des humus. Quant aux niveaux d'oxydation, la mesure du potentiel rédox et les analyses sur la dynamique du fer (Tamm - Mehra-Jackson) faciliteraient l'interprétation dans les cas les plus incertains. Il serait ainsi plus aisé de trancher entre un gley oxydé et un pseudogley. Mais cette question dépasse le cadre de notre mandat.

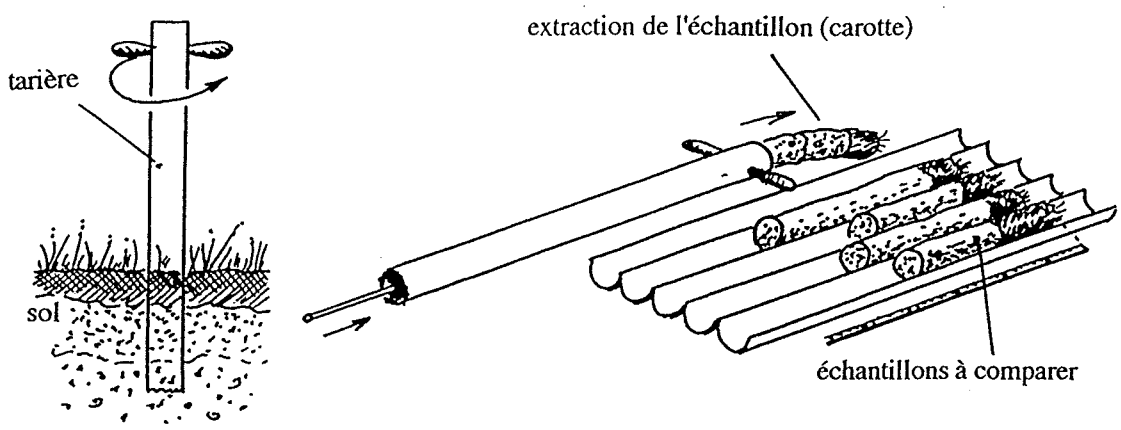


Figure 4.1 Dispositif de prélèvement et de description des carottes pédologiques

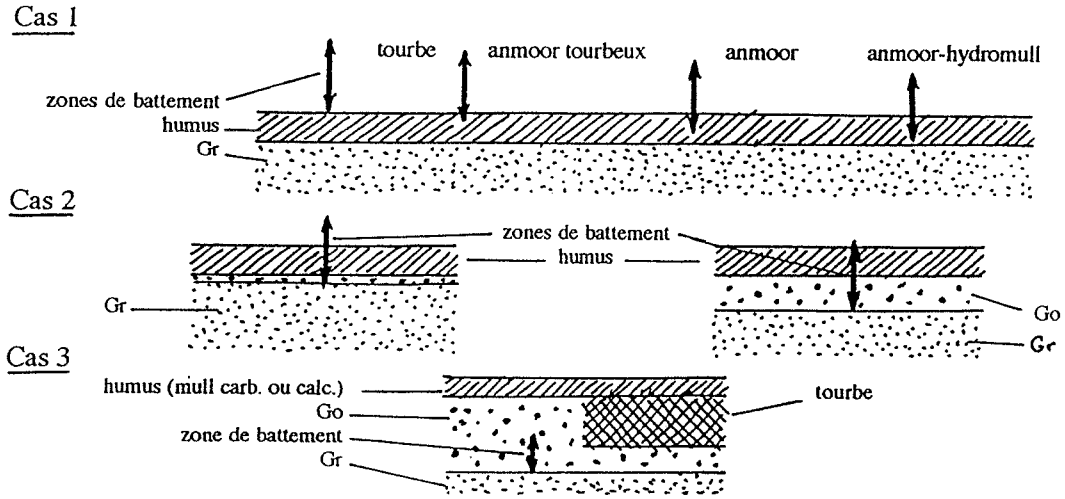


Figure 4.2 Représentation schématique des trois cas de figure du degré d'hydromorphie

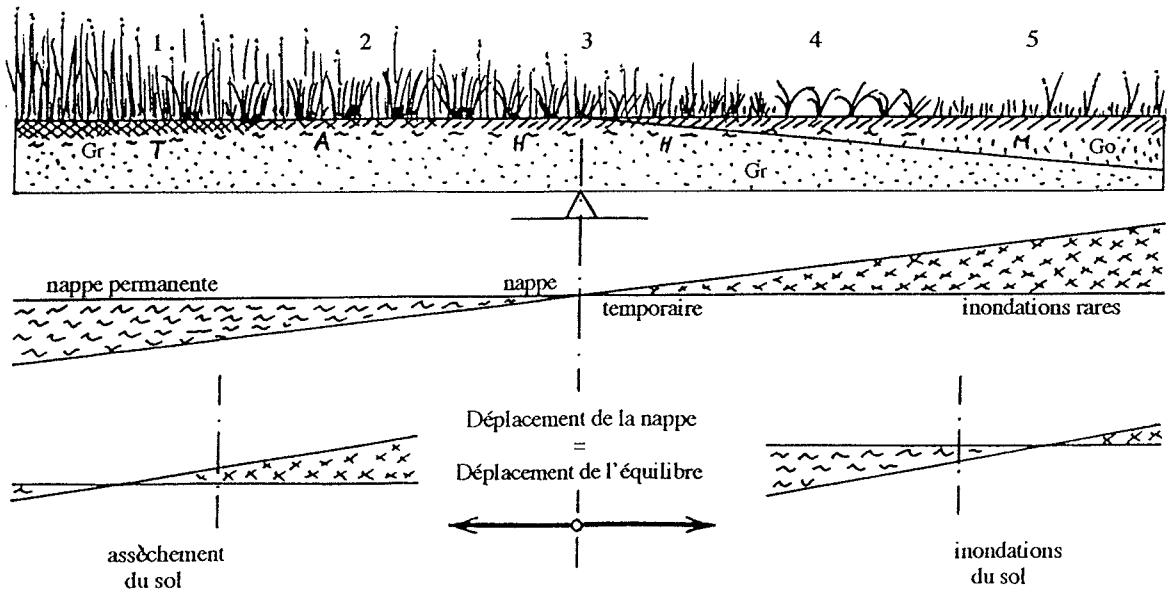


Figure 4.3 Equilibre évolutif de la végétation et du sol sous l'influence de la nappe

CEJ - Pédologie									Transect N°						T 2																											
N° sondages	Humus									Structure								Texture surface							Texture profondeur							Eff. HCl		Niveau d'oxyd.						Hor.B	Molasse	
	Mo	Mu	Mu	Hy	An	Tou	Tou	Hor	Epais.	Com	Fr	Fr	Fr	Fr	Par	Par	Sa	SL	Li	LA	Ar	Sq	Sq	Sa	SL	Li	LA	Ar	Sq	Sq	HCl	HCl	Tache	Go	Go	Sd	Sd	B	C	C
	der	cl	ca	mu	moo	eut	min	int	hum	fon	fil	ang	sph	pol	min	org						ca	sl						ca	sl	sur	pro	oxyd	net	diffus	net	diffus	brun.	altér.	comp.
	1	2	3	4	5	6	7	8	10	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	1	2	3	4	5	1	1	2
0600 T02	0	0	0	1	1	1	0	0	15	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	3	-99	-99	-99	-99	-99	-99	31	-99
0500 T02	0	0	0	0	1	1	0	0	25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	3	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	61
0400 T02	0	0	0	1	1	0	0	0	16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	2	3	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	30
0300 T02	0	1	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	3	-99	-99	-99	45	-99	-99	28	-99
0200 T02	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	3	-99	-99	-99	-99	20	-99	55	-99

Tableau 4.1 Exemple de fichier d'origine avec tous les descripteurs pédologiques (40)

Tableau 7.IV – Le choix d'une mesure d'association symétrique entre objets (mode Q) pour tableau de descripteurs physiques, chimiques, géologiques, etc.

1) Comparaison d'objets individuels ——→ voir 2

2) Descripteurs binaires ou à descriptions multiples sans similarités partielles ——→ voir 3

3) Métriques: *coefficient de simple concordance* (S_1) et dérivés S_2, S_6

3) Semimétriques: S_3, S_5

3) Non-métrique: S_4

2) Descripteurs à descriptions multiples ——→ voir 4

4) Descripteurs quantitatifs, dimensionnellement homogènes ——→ voir 5

5) Différences soulignées par mise au carré: *distance euclidienne* (D_1), *distance moyenne* (D_2)

5) Différences atténuées: *métrique de Manhattan* (D_7), *différence moyenne des descripteurs* (D_8)

4) Descripteurs sans homogénéité dimensionnelle: poids égaux (ou différents, selon la valeur w_i imposée) attribués aux descripteurs dans leur assemblage en une mesure d'association ——→ voir 6

6) Descripteurs qualitatifs (sans similarités partielles) et descripteurs quantitatifs avec similarités partielles basées sur l'écart de variation de chaque descripteur: *coefficient symétrique de Gower* (S_{15})

6) Descripteurs qualitatifs (possibilité de matrices de similarités partielles entre leurs descriptions) et descripteurs quantitatifs ou semi-quantitatifs avec fonction de similarité partielle pour chaque descripteur: *coefficient d'Estabrook & Rogers* (S_{16})

1) Comparaison de groupes d'objets ——→ voir 7

7) Tenant compte de la corrélation entre descripteurs: *distance généralisée de Mahalanobis* (D_5)

7) Sans tenir compte de la corrélation entre descripteurs: *coefficient de ressemblance raciale* (D_{12})

Tableau 4.3 Tableau du choix d'une mesure d'association symétrique (Legendre et Legendre, 1984)

CEJ - Pédologie								Transect N°					T 2													
N° sondages	Humus								Structure							Texture surf.			Texture prof.			Eff. HCl			
	Mu	Mu	Hy	An	Tou	Tou	Hor	Epais	Com	Fr	Fr	Fr	Fr	Par	Par	Sa	Li	Ar	Sa	Li	Ar	HCl	HCl	Go	C
	cl	ca	mu	moo	eut	min	int	hum	fon	fil	ang	sph	pol	min	org							sur	pro	net	comp.
	2	3	4	5	6	7	8	10	1	2	3	4	5	6	7	1	3	5	1	3	5	1	2	2	2
0600 T02	0	0	1	1	1	0	0	15	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	2	3	0	150
0500 T02	0	0	0	1	1	0	0	25	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	3	0	80
0400 T02	0	0	1	1	0	0	0	16	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	2	3	0	55
0300 T02	1	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	3	45	60
0200 T02	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	3	20	55

Tableau 4.4 Exemple de fichier réduit avec les descripteurs pédologiques les plus discriminants (24)

2ème CEJ	PEDOLOGIE		Fiche de test d'homogénéité		Page:
Station			Opérateur(s)		Date
Description générale		Sondage N°1	Sondage N°2	Sondage N°3	Sondage N°4
(végétation-sol)					
Descripteurs	*Classes de profondeur*	0 1 1 2 2 3 3 4 5 6 7 8 >8	0 1 1 2 2 3 3 4 5 6 7 8 >8	0 1 1 2 2 3 3 4 5 6 7 8 >8	0 1 1 2 2 3 3 4 5 6 7 8 >8
	(5 cm -> 40 cm, puis 10 cm)	5 0 5 0 5 0 5 0 0 0 0 0 0	5 0 5 0 5 0 5 0 0 0 0 0 0	5 0 5 0 5 0 5 0 0 0 0 0 0	5 0 5 0 5 0 5 0 0 0 0 0 0
1. Types d'humus	Litière (+)				
	Moder				
	Mull calcique				
	Mull carbonaté				
	Hydromull				
	Anmor				
	Tourbe eutrophe				
	Tourbe minéralisée				
	Horiz. intermédiaire				
2. Structure de la terre fine	Compacte-fondue				
	Fragmentaire-feuilletée				
	Fragm.-anguleuse				
	Fragm.-sphérique (grum.)				
	Fragm. polyèdrique				
	Particulaire-minérale				
	Particulaire-organique				
3. Texture de la terre fine	Sableuse				
	Sablo-lim./limono-sabl.				
	Limoneuse				
	Limono-arg./argilo-lim.				
	Argileuse				
	Squelette calcaire (> 2mm)				
	Squelette cristallin (> 2mm)				
4. Effervescence à HCl	nulle 0				
	oreille +				
	bulles ++				
	mousse +++				
5. Niveau d'oxyd.: gley	Taches d'oxydation				
	Base Go, limite nette				
	Base Go, limite diffuse				
pseudogley	Base Sd, taches ox. nettes				
	Base Sd, taches ox. peu nettes				
6. Roche mère (limite sup.)	Molasse altérée				
	Molasse compacte				
					MB / version 26.5.93

Tableau 4.2 Exemple de fiche pédologique de terrain

			CEJ - Pédologie								Transect N°																	
			N° sondages	Humus								Structure						Texture surf.			Texture prof.			Eff. HCl			
				Mu	Mu	Hy	An	Tou	Tou	Hor	Epais	Com	Fr	Fr	Fr	Par	Par	Sa	Li	Ar	Sa	Li	Ar	HCl	HCl	Go	C
				ci	ca	mu	moo	eut	min	int	hum	fon	ang	sph	pol	min	org							sur	pro	net	comp.
Groupes				2	3	4	5	6	7	8	10	1	3	4	5	6	7	1	3	5	1	3	5	1	2	2	2
A	1	1	0600 T02			1	1	1			15	1		1					1	1			1	2	3	0	150
			0500 T02				1	1			25	1							1	1		1		1	3	0	80
			0700 T16				1			1	19	1								1	1	1		3	3	0	100
			0500 T27				1			1	5	1								1	1			3	3	0	45
			0500 T16				1				15	1								1	1			2	3	0	40
			A 11 moy.								15.8													2	3	0	83
		2	0400 T02			1	1				16	1							1		1	1		2	3	0	55
			0600 T13			1	1				9	1							1			1		2	3	0	45
			0500 T13			1					5	1	1						1			1		3	3	0	40
			0700 T13				1			1	15	1	1						1		1	1		2	3	0	180
			0400 T05			1	1				19	1	1						1		1			2	3	0	500
			0300 T05			1	1				30	1	1	1					1		1	1		2	3	0	500
			0900 T12			1	1				20	1					1		1		1	1		0	3	0	250
			A 12 moy.								16.3													2	3	0	224
	2	1	0500 T04			1					15	1							1		1			3	3	0	75
			0200 T10			1					16	1		1					1		1			2	3	0	90
			0400 T04			1					14	1		1					1		1			2	3	26	70
			0500 T12			1					9	1						1			1			2	3	28	30
			0400 T12			1					10	1						1			1			2	3	19	20
			0400 T27			1					5	1						1			1			3	3	18	21
			0100 T09			1					19	1		1			1			1	1			2	3	47	50
			0500 T25			1					1	1						1			1	1	1	3	1	28	40
			0600 T25			1					2	1								1		1	1	3	1	34	40
			A 21 moy.								10.1													2	3	22.2	48.4
B	1	1	0300 T02	1							15			1		1	1	1			1	1		1	3	45	60
			0200 T02	1							0			1			1	1				1		1	3	20	55
			B 11 moy.								7.5													1	3	32.5	57.5
		2	0300 T04		1						15			1					1		1			2	3	47	60
			0400 T13		1						15			1					1		1			2	3	24	30
			0300 T10		1					1	10			1	1				1				1	2	3	38	80
			0100 T10		1					1	10			1	1				1		1			2	3	0	100
			0200 T19		1					1	15	1	1						1		1	1		2	3	38	90
			0100 T19		1					1	19	1	1						1		1	1		2	3	37	110
			0100 T23		1					1	10	1		1					1		1	1		3	3	35	80
			0200 T04		1					1	19	1		1				1			1			3	3	45	50
			0400 T25		1					1	5	1		1				1			1			3	3	30	45
			0100 T21		1					1	10			1		1		1			1			3	3	35	35
			0300 T25		1					1	10			1	1					1	1			3	3	32	40
			0300 T27		1					1	5			1	1			1			1	1		3	3	27	31
			0600 T16		1						15	1		1						1	1	1		3	3	43	80
			0400 T16		1						25	1		1					1	1	1	1		3	3	34	50
			0200 T23		1						10	1		1						1	1			2	3	22	60
			B 12 moy								12.9													3	3	32.5	62.7
	2	1	0200 T05		1					1	24	1	1	1					1			1		3	3	58	500
			0100 T05		1					1	31	1	1	1					1			1		3	3	62	500
			0400 T30		1					1	10		1	1					1		1	1		3	3	55	500
			0600 T19		1					1	6	1		1			1		1		1	1		3	3	69	500
			0300 T19		1					1	15	1	1				1				1	1		2	3	58	500
			0700 T09		1					1	20	1		1					1		1	1		3	3	34	500
			0400 T19		1					1	20	1		1					1		1	1		2	3	0	500
			0800 T29		1					1	15			1					1	1	1	1		3	3	28	500
			0500 T19		1					1	19	1		1			1					1		3	3	0	500
			B 21 moy								17.8													3	3	40.4	500
	2		0800 T13			1				1	4	1	1				1					1		2	3	22	220
			0700 T19			1					10	1		1			1					1		2	3	18	500
			0700 T30			1	1				10	1		1						1		1		2	3	39	500
			0600 T30			1					10	1		1						1		1		2	3	36	500
			0500 T30			1				1	10	1		1						1	1	1		2	3	0	500
			B 22 moy								8.8													2	3	23	444

Tableau 4.5 Tableau des types de sols issu du groupement agglomératif

C	1	1	1000 T04		1		1				17					1		1			1			3	3	0	250
			0800 T05		1						3					1		1			1			3	3	0	500
			1600 T09		1						9			1		1			1		1			3	3	0	500
			1000 T12	1						1	4					1		1			1	1		1	2	0	500
			C 11 moy								8.25													3	3	0	438
		2	0600 T05				1				9	1							1	1	1			2	3	0	500
			0400 T21				1				5	1								1	1			3	3	0	500
			0200 T09				1			1	24	1					1			1	1			1	3	0	500
			1400 T19				1			1	10	1						1		1	1			3	3	0	500
			1500 T09				1				11	1					1		1		1			0	3	0	500
			0400 T09				1				19	1					1		1		1			0	3	0	500
			1000 T10				1				11	1							1		1			0	3	0	500
			0300 T09				1			1	6	1							1		1			2	3	0	500
			1100 T10				1				5	1							1		1			2	3	0	500
			1000 T29				1				10	1						1	1		1			2	3	0	500
			0700 T21				1				10	1						1			1			3	3	0	500
			0600 T21				1				10	1						1			1			2	3	0	500
			0500 T21				1				10	1						1			1			2	3	0	500
			1000 T27				1				20	1							1	1	1			3	3	0	500
			0500 T09			1					15	1						1			1			2	3	0	500
			0500 T23			1	1				10	1						1			1			2	3	48	500
			0900 T27			1	1				10	1							1		1			2	3	58	500
			0400 T29			1	1				10	1							1		1			2	3	22	500
			0900 T29			1	1				15	1							1	1	1			2	3	20	500
			0500 T29			1	1			1	15	1							1		1			1	3	21	500
			C 12 moy								11.8													2	3	8.45	500
		3	0600 T27			1	1				5						1				1			1	3	51	180
			0700 T27			1	1				5						1				1			1	3	63	500
			C 13 moy								5													1	3	57	340
	2	1	0900 T04				1	1			10	1					1			1	1			1	3	0	220
			0500 T10				1	1			29	1					1				1			1	3	0	250
			0800 T12				1	1			24	1					1				1			0	3	0	150
			0600 T12				1	1			25						1				1			0	3	0	80
			0800 T04				1	1			21	1					1			1	1			1	3	0	180
			0700 T04				1	1			24	1					1			1	1			1	3	0	170
			0600 T04				1				24	1					1			1	1			0	3	0	160
			0400 T10				1	1			15	1								1	1			0	3	0	80
			0700 T12				1	1			18						1				1	1		0	3	0	100
			0300 T23					1			28						1				1	1		0	3	0	35
			0400 T23					1			34						1				1	1	1	0	3	0	150
			0800 T05				1	1			12	1					1		1		1			2	3	0	500
			1300 T09				1	1			9	1					1		1		1			0	3	0	500
			1200 T09				1	1			24	1					1		1		1			0	3	0	500
			0900 T09				1	1			18	1					1				1			1	3	0	500
			1300 T19				1	1			18	1					1		1	1	1			1	3	0	500
			1100 T09				1	1			18	1					1		1		1			0	3	0	500
			0600 T29				1	1			20	1					1		1		1			0	3	0	500
			0900 T10				1	1			14	1					1		1		1			0	3	0	500
			0800 T10				1	1			28	1					1		1		1			1	3	0	500
			0700 T10				1	1			29	1					1		1		1			1	3	0	500
			0600 T10				1	1			26	1					1		1		1			1	3	0	500
			0800 T19				1	1			18	1					1		1		1	1		1	3	0	500
			1000 T19				1	1			25	1					1		1			1		0	3	0	500
			0900 T19				1	1			15	1					1		1			1		0	3	0	500
			0500 T05				1	1			24	1					1			1	1			1	3	0	500
			1200 T19				1	1			22	1					1			1	1			0	3	0	500
			0900 T30				1	1			20	1					1			1	1			0	3	0	500
			1000 T09				1	1			29	1					1				1			0	3	0	500
			1000 T30				1	1			20	1					1				1			0	3	0	500
			1100 T30				1	1		1	10	1					1				1			0	3	0	500
			0900 T21				1	1			18						1				1	1		0	3	0	500
			0800 T21					1			25						1				1			0	3	0	500
			0700 T29				1				15	1					1			1	1	1		0	3	14	500
			0800 T30				1	1		1	20	1					1			1		1		0	3	0	500
			C 21 moy								20.8													0	3	0.4	388
D	1	1	1400 T09			1					10	1		1					1		1			1	3	18	500
			0300 T29			1				1	15	1		1					1		1			3	3	30	500
			0800 T09		1						15	1		1					1		1			3	3	26	500
			1000 T21		1						10			1					1		1			3	3	40	500
			0600 T23		1						15	1		1					1		1			2	3	60	500
			0600 T09	1							19			1		1			1		1			1	3	32	500
			0300 T30	1					1		20	1		1					1				1	0	0	60	500
			D 11 moy								14.9													2	3	38	500
E	1	1	0200 T30	1				1			70	1		1			1	1						0	0	130	500
			0100 T30	1				1			70	1		1			1	1						0	0	130	500
			E 11 moy								70													0	0	130	500
F	1	1	0300 T21		1					1	9			1		1		1			1	1		3	3	75	220
			0200 T21		1					1	14			1		1				1	1	1		3	3	110	170
			0800 T27		1						10			1					1		1			2	3	100	500
			0100 T29		1					1	20			1				1			1	1		3	3	100	500
			0200 T29		1					1	20	1		1	1				1	1	1	1		3	3	100	500
			F 11 moy								14.6													3	3	97	378

Tableau 4.5 Tableau des types de sols issu du groupement agglomératif (suite)

CEJ - Pédologie			1 Gley réduit à anmoor(-hydromull)				
Ss-groupe	Stations	Humus		Test HCl		Gley oxydé	Molasse
		type	épais.	humus	h. min.	profond.	profond.
11	406		15	2	3	0	40
	1307		5	3	3	0	45
	1605		24	0	3	0	160
	1607		15	2	3	0	180
	2705		19	3	3	0	100
Val. moy.		Anmoor	16	2	3	0	105
12	204		16	2	3	0	55
	1209		20	0	3	0	250
	1306		9	2	3	0	45
Val. moy.		Anmoor-hydromull	15	1	3	0	117
13	506		9	2	3	0	500
	902		24	1	3	0	500
	903		6	2	3	0	500
	904		19	0	3	0	500
	915		11	0	3	0	500
	1010		11	0	3	0	500
	1011		5	2	3	0	500
	1914		10	3	3	0	500
	2104		5	3	3	0	500
	2105		10	2	3	0	500
	2106		10	2	3	0	500
	2107		10	3	3	0	500
	2910		10	2	3	0	500
Val. moy.		Anmoor	11	2	3	0	500
14	503		30	2	3	0	500
	504		19	2	3	0	500
Val. moy.		Anmoor-hydromull	25	2	3	0	500

CEJ - Pédologie			2 Gley réduit à anmoor tourbeux et tourbes				
Ss-groupe	Stations	Humus		Test HCl		Gley oxydé	Molasse
		type	épais.	humus	h. min.	profond.	profond.
21	205		25	1	3	0	80
	206		15	2	3	0	150
	407		24	1	3	0	170
	408		21	1	3	0	180
	409		10	1	3	0	220
	1004		15	0	3	0	80
	1005		29	1	3	0	250
	1206		25	0	3	0	80
	1207		18	0	3	0	100
	1208		24	0	3	0	150
Val. moy.		Anmoor-tourbeux	21	1	3	0	146
22	505		24	1	3	0	500
	507		12	2	3	0	500
	909		18	1	3	0	500
	910		29	0	3	0	500
	911		18	0	3	0	500
	912		24	0	3	0	500
	913		9	0	3	0	500
	1008		28	1	3	0	500
	1009		14	0	3	0	500
	1908		18	1	3	0	500
	1909		15	0	3	0	500
	1910		25	0	3	0	500
	1912		22	0	3	0	500
	1913		18	1	3	0	500
	2109		18	0	3	0	500
	2906		20	0	3	0	500
	3008		20	0	3	0	500
	3009		20	0	3	0	500
	3010		20	0	3	0	500
	3011		10	0	3	0	500
Val. moy.		Anmoor-tourbeux	19	0	3	0	500
23	2108		25	0	3	0	500
	2303		28	0	3	0	35
	2304		34	0	3	0	150
Val. moy.		Tourbe	29	0	3	0	228

Tableau 4.6 Tableau final présentant les 4 types de sols

CEJ - Pédologie			3 Gley à hydromull				
Ss-groupe	Stations	Humus		Test HCl		Gley oxydé	Molasse
		type	épais.	humus	h. min.	profond.	profond.
31	405		15	3	3	0	75
	1305		5	3	3	0	40
Val. moy.		Hydromull	10	3	3	0	58
32	905		15	2	3	0	500
	3005		10	2	3	0	500
Val. moy.		Hydromull	13	2	3	0	500
33	404		14	2	3	26	70
	901		19	2	3	47	50
	1204		10	2	3	19	20
	1205		9	2	3	28	30
	2505		1	3	1	28	40
	2506		2	3	1	34	40
	2704		5	3	3	18	21
	2706		5	0	3	51	180
Val. moy.		Hydromull	8	2	3	31	56
34	914		10	1	3	18	500
	1308		4	2	3	22	220
	1907		10	2	3	18	500
	2305		10	2	3	48	500
	2707		5	0	3	63	500
	2709		10	2	3	58	500
	2710		20	3	3	28	500
	2903		15	3	3	30	500
	2904		10	2	3	22	500
	2905		15	1	3	21	500
	2907		15	0	3	14	500
	2909		15	2	3	20	500
	3006		10	2	3	36	500
	3007		10	2	3	39	500
Val. moy.		Hydromull	11	2	3	31	480

CEJ - Pédologie			4 Gley à mull carbonaté et mull calcique				
Ss-groupe	Stations	Humus		Test HCl		Gley oxydé	Molasse
		type	épais.	humus	h. min.	profond.	profond.
41	410		17	3	3	0	250
	509		3	3	3	0	500
	916		9	3	3	0	500
	1210		4	1	2	0	500
Val. moy.		Mull carbonaté	8	3	3	0	438
42	402		19	3	3	45	50
	403		15	2	3	47	60
	1304		15	2	3	24	30
	1604		25	3	3	34	50
	1606		15	3	3	43	80
	1901		19	2	3	37	110
	1902		15	2	3	38	90
	2101		10	3	3	35	35
	2102		14	3	3	110	170
	2103		9	3	3	75	220
	2301		10	3	3	35	80
	2302		10	2	3	22	60
	2503		10	3	3	32	40
	2504		5	3	3	30	45
	2703		5	3	3	27	31
Val. moy.		Mull carbonaté	13	3	3	42	77
43	501		31	3	3	62	500
	502		24	3	3	58	500
	907		20	3	3	34	500
	908		15	3	3	26	500
	1903		15	2	3	58	500
	1904		20	2	3	0	500
	1905		19	3	3	0	500
	1906		6	3	3	69	500
	2110		10	3	3	40	500
	2306		15	2	3	60	500
	2708		10	2	3	100	500
	2901		20	3	3	100	500
	2902		20	3	3	100	500
	2908		15	3	3	28	500
	3004		10	3	3	55	500
Val. moy.		Mull carbonaté	17	3	3	53	500
44	906		19	1	3	32	500
	3002		70	0	0	130	500
	3003		20	0	0	60	500
Val. moy.		M. calcique, tourbe	36	0	1	74	500
45	202		0	1	3	20	55
	203		15	1	3	45	60
Val. moy.		Mull calcique	8	1	3	33	58

Tableau 4.6 Tableau final présentant les 4 types de sols (suite)

5 ETUDE HYDRODYNAMIQUE

5.1 Introduction

La présence et le comportement d'une nappe d'eau constituent naturellement le facteur écologique prépondérant pour l'établissement et le maintien des marais sur la rive sud du lac de Neuchâtel. Selon les situations, **l'alimentation en eau résulte d'une combinaison variable où interviennent la pluviosité, les ruissellements de falaise et le lac**. L'influence du lac sur la nappe phréatique se traduit, jusqu'à une certaine distance de la rive, soit par des **inondations directes des sols**, notamment en périodes de crues, soit par des **flux d'eau souterrains** agissant même lorsque le niveau du lac est bas. La **topographie (ou micro topographie)** revêt dès lors une importance toute particulière dans ce système hydrologique, de même que la **nature géologique du sous-sol** et la **perméabilité des sols**.
Pour déterminer, dans l'espace et dans le temps, l'influence potentielle du niveau du lac sur le marais, les composantes d'un phénomène a priori complexe ont été abordées séparément. L'étude des flux souterrains (chap. 5.2 et annexe 5) puis de la piézométrie (chap. 5.3) a permis d'évaluer quantitativement l'importance des inondations directes (chap. 5.3.2) en tant que principal facteur d'influence du lac.

5.2 Modélisation des flux souterrains

Dans la mesure où la modélisation des flux souterrains sortait clairement de notre domaine de compétences, nous avons confié ce travail à l'Institut d'aménagement des terres et des eaux (IATE) de l'EPFL (Prof. MUSY). Ce chapitre présente un extrait des principaux résultats de 3 rapports établis par ce mandataire (PERROCHET 1992, 1993a, b) et réunis dans l'annexe 5. Basées principalement sur l'exemple d'un site d'étude, les conclusions qui en découlent doivent être considérés comme représentatives des 3 transects qui ont fait l'objet, à cette occasion, d'une investigation approfondie (transects 19, 9 et 27).

5.2.1 Méthodes

La modélisation hydrodynamique des relations nappe-lac le long de transects représentatifs **doit permettre d'évaluer, par simulation numérique, l'impact d'une modification permanente du niveau moyen du lac de Neuchâtel sur le régime hydraulique du site marécageux environnant** (fluctuations de la nappe phréatique). Dans ce but, il est fait appel au modèle général de simulation des transferts de masse en milieux poreux variablement saturés HYDROCHEM (*PERROCHET et MUSY*, 1991). Élaboré à partir d'une technique multidimensionnelle aux éléments finis, ce simulateur déterministe intègre les équations de base (non linéaires) de l'hydrodynamique souterraine (équations d'état, équations dynamiques, équations de conservation de la matière). Le domaine d'écoulement est reconstitué par juxtaposition d'éléments finis, à chacun desquels sont attribués les divers paramètres hydrodynamiques, de façon à prendre en compte fidèlement les traits caractéristiques essentiels du système (morphologie, contrastes entre différentes couches, etc.). Pour des raisons pratiques et vu la relative homogénéité latérale du site, seule une analyse aux deux dimensions (x, z) est envisagée.

D'une façon générale, et malgré la mise en oeuvre d'outils d'analyse relativement sophistiqués, la mise en équation de phénomènes hydrodynamiques dans le contexte naturel reste un exercice assez délicat (imprécision et variabilité spatiale de paramètres déterminants, méconnaissance de processus secondaires susceptibles d'affecter le phénomène de base, etc.). Dès lors, plutôt que de vouloir reproduire dans les moindres

détails le comportement réel (observé) du système souterrain, on s'attache d'avantage à mettre en évidence les tendances essentielles de ce système face à la fluctuation d'un paramètre (le niveau du lac) qui semble à première vue déterminant. L'effort est donc concentré sur une analyse de type relative et non pas absolue puisque le milieu naturel est fortement idéalisé (simplifié) au travers du modèle mathématique. D'importants éléments de réponses concernant la sensibilité des relations nappe-lac peuvent néanmoins être dérivés directement par comparaison systématique entre les diverses variantes simulées.

5.2.2 Collecte et mise en forme des données pour la simulation numérique

Les données nécessaires sont de type géophysique (topographie des divers horizons, paramètres hydrodynamiques) et de type hydrométéorologique (pluviométrie, bioclimatologie). Les données géophysiques fournissent le support géométrique pour les calculs d'intégration ('rigidité' du système) et les données hydrométéorologiques, y compris le niveau du lac, déterminent le conditionnement extérieur du système (conditions aux limites). Enfin les mesures piézométriques réalisées durant 63 semaines sont utilisées pour établir une comparaison entre nappe simulée et observée.

Géophysique

La structure souterraine (géométrie) du système à l'étude est illustrée sur la figure 5.1 (profil en long de la zone marécageuse du transect 9). La position du toit de la molasse, considéré par le modèle comme limite hydraulique inférieure imperméable, s'abaisse en pente douce en direction du lac et détermine une puissance d'aquifère de 7 m sous le cordon littoral.
La conductivité hydraulique saturée K_S a fait l'objet de mesures in-situ par 'remontée de nappe' dans chaque piézomètre implanté sur le transect. La faible variance de ces mesures atteste une bonne homogénéité hydraulique des horizons investigués. Par ailleurs les paramètres hydrodynamiques liés à la zone non saturée (conductivité hydraulique et capacité capillaire) sont des fonctions non linéaires dont la détermination requiert des manipulations délicates et extrêmement compliquées à mettre en oeuvre sur un site marécageux (désaturation artificielle, implantation de batteries de tensiomètres, sondages neutroniques, etc.). On attribue alors à ces paramètres non saturés les valeurs standard relatives aux types de sols en question. Ce qui est justifié puisque cette étude traite d'un phénomène gouverné avant tout par les gradients de pression dans la zone saturée (mouvements de nappe).

Dans ces conditions, l'interprétation des mesures de K_S fournit une valeur moyenne de $7 \cdot 10^{-6}$ [m/s] pour la masse sablo-limoneuse, tandis que les teneurs en eau résiduelle et à saturation pour un sol de type sablo-limoneux sont respectivement d'environ 0.15 et 0.45 [-] (valeurs standard).

Hydrométéorologie

Les caractéristiques hydrométéorologiques du site sont établies à partir des données collectées par l'Institut Suisse de Météorologie (ISM) aux stations pluviométriques et climatiques les plus proches.

Considérant la sérieuse difficulté présentée par la détermination de l'évapotranspiration en conditions naturelles, c'est une simple estimation par excès qui est prise en compte pour ce paramètre. Nous retenons donc, dans un premier temps, l'*ETP* (évapotranspiration potentielle) pour la zone arborisée et l'*EP* (évaporation d'une surface d'eau libre) pour la zone marécageuse. En raison de l'affleurement de la nappe fréquemment observé dans la roselière, cette deuxième hypothèse semble assez appropriée. De plus, le fait de retenir les valeurs potentielles théoriques, basées sur la demande évaporative climatique, et non pas

les valeurs d'évapotranspiration réelles implique un conditionnement plus défavorable du système et donc, du point de vue de nos objectifs, une certaine sécurité.
Un facteur moyen d'interception des pluies de 20% est encore introduit sur la zone arborisée.

En outre les débits de falaise susceptibles d'alimenter le système par l'amont sont considérés comme nuls. Ceux-ci sont en effet très irrégulièrement répartis le long de la falaise, et leur ordre de grandeur n'est pas significatif en regard des autres variables hydrométéorologiques.

Le bilan hydrologique de surface fournit dans ces conditions des valeurs mensuelles moyennes généralement excédentaires (apports supérieurs à la consommation théorique), parfois légèrement déficitaires durant la période de végétation (d'avril à octobre), tant sur la zone arborisée que sur le marais. En revanche, les forts rabattements de nappe (jusqu'à 3 m) réellement observés sur la zone arborisée dès que la végétation se développe n'apparaissent pas dans ce bilan, ce qui donne à penser que le paramètre théorique *ETP* pourrait ne pas être adapté au type de végétation considérée. En conséquence, afin d'établir un scénario de remplacement – mais néanmoins approprié – qui reproduise cet important 'effet de pompe', les forts rabattements de nappe sous la ripisylve sont simulés directement par l'imposition, pendant la période de végétation (d'avril à octobre), d'une cote de nappe à 427.1 m (abaissement de 3 m) à l'interface marais-forêt.

Par rapport au phénomène naturel, cette façon de faire constitue sans aucun doute une contrainte excessive pour le marais ('appels' d'eau souterraine exagérés en direction de la zone arborisée), ce qui nous met à nouveau du côté de la sécurité. En effet, ces conditions favorisent la désorption du marais et, partant, une éventuelle recharge souterraine de celui-ci au travers du cordon littoral. Elles pourraient ainsi permettre, par amplification, de dégager plus nettement la sensibilité du système par rapport aux modifications du niveau du lac.

5.2.3 Résultats et discussion

Au total, l'analyse du phénomène fait l'objet de 13 variantes (cf. fig. 5.1) qui se distinguent les unes des autres par le conditionnement climatique, par les cotes H [m] imposées du niveau du lac, par le pas de temps avec lequel les données sont prises en compte, et par la durée des simulations. D'une façon générale pour toute les variantes, la tolérance de convergence des procédures itératives est fixée à ±0.01 m (la variable itérée étant la charge hydraulique). Ceci signifie que les valeurs des niveaux piézométriques simulés sont entachées d'une erreur inférieure ou égale à la tolérance de convergence. Les fluctuations et l'analyse comparée des valeurs numériques reportées dans les diverses figures ne deviennent donc théoriquement significatives que lorsque les écarts sont supérieurs à 2 cm. Seuls les résultats des régimes climatiques 4, 6 et 7a (variantes 1-3, 7-10, 12 et 13) sont discutés ici.

Variantes 1 à 3 (régime climatique 4, réaliste de référence)

Système saturé jusqu'à fin mars, échanges gravitaires par le lac, nappe rabattue en forêt à 427.1 m d'avril à octobre et bilan hydrologique ($P - EP$) imposé à la surface du marais.
Il s'agit pour commencer d'**évaluer le comportement du système en conditions climatiques naturelles représentatives pour trois niveaux de lac**. Les séries temporelles des variantes 1 à 3, visibles sur la figure 5.2a, ne sont données qu'à partir du mois d'avril (du 90ème au 360ème jour) puisque tout le système est supposé saturé pendant le premier trimestre. Les sondages S8 à S10, fortement soumis à l'effet du rabattement de nappe imposé en zone arborisée, ne sont pas représentés.

Sur la figure 5.2a, les sondages S11 à S101 font clairement apparaître les mois déficitaires (avril et juillet) avec des baisses de niveau de 0.4 à 0.5 m. Dans ces sondages, et entre ces deux périodes déficitaires, la nappe se reconstitue complètement. On y remarque aussi les premiers effets du lac, entre les variantes à niveaux 'bas' (variantes 1 et 2, H=428.5 et 429.0 m) et à niveau 'haut' (variante 3, H=429.5 m), qui se traduisent en avril par un rabattement supplémentaire (de 0.06 à 0.07 m au sondage S101), et en août par un retard dans la resaturation complète du sol (une vingtaine de jours au sondage S101).
A partir du sondage S13, ces mécanismes s'accentuent et deviennent même déterminants dès le premier mois déficitaire. Au sondage S14, en comparant les variantes 'basses' 1 et 2 à la variante 'haute' 3, on constate la présence de perturbations phréatiques saisonnières qui rendent impossible la resaturation complète du profil avant le début du mois d'octobre. A partir du sondage S102, ces perturbations deviennent permanentes en ce sens que même durant la période excédentaire de fin d'année, la nappe ne peut pas rejoindre la surface en raison des niveaux de lac imposés. Aux sondages S15 et S16 l'effet des conditions hydrométéorologiques s'atténue fortement du fait de l'influence directe du lac.

La différence significative de comportement entre les sondages S101 et S13 à partir du mois d'avril, et pour les variantes à niveaux 'bas' uniquement, donne à penser que la distance d'influence effective du lac se situe entre ces deux sondages (soit à environ 100 m du rivage). Toutefois, à la fin de la période de végétation, et jusqu'à la fin de l'année, ces sondages sont saturés et **une influence du lac plus marquée, et à plus long terme, n'est probable qu'à partir du sondage S14, soit à environ 60 m du rivage**.
La figure 5.2b donne l'allure de la nappe dans le marais à la fin du mois le plus déficitaire (juillet) et à la fin de la période de végétation (octobre). Ces illustrations confirment les remarques faites ci-dessus concernant l'influence temporaire et permanente des niveaux de lac testés, soit respectivement entre les sondages S101 et S13 à fin juillet, et à partir du sondage S14 à fin octobre. Ces différentes simulations témoignent du **rôle déterminant des conditions hydrométéorologiques de surface.**

Variantes 7 à 10 (régime climatique 6, 'sec' pendant 5 ans)

Simulation, pour quatre niveaux de lac, d'une succession de cinq années sèches par répétitions de l'année 1989, avec échanges gravitaires par le lac, nappe rabattue en forêt à 427.1 m d'avril à octobre et bilan hydrologique ($P - EP$) imposé à la surface du marais.

L'objectif est ici de mettre en évidence l'**influence des niveaux du lac sur la régulation phréatique dans le cas d'une éventuelle dégradation climatique à long terme**, et évaluer dans ces conditions les risques de tarissement progressif du système.

Les conditions climatiques de 1989 retenues pour ces variantes montrent que les mois de mai à septembre sont fortement déficitaires – de même que l'année hydrologique globale (bilan annuel -13 cm) – comparativement au régime climatique de référence No 4 (bilan annuel + 366 cm). Sous ces conditions extrêmes, et en partant avec un système complètement saturé, on constate sur l'ensemble des sondages (figure 5.3) l'apparition du cycle annuel recharge – décharge après une période de trois à six mois selon les sondages. Dans la plupart des sondages, des rabattements importants et durables sont mis en évidence.
Dans les sondages S8 à S10 la nappe ne remonte jamais à la surface au cours de ces cinq années, et des différences significatives apparaissent entre les quatre niveaux de lac imposés dès la fin du premier cycle. Décelable déjà au sondage S8 et S9 (non illustré), et mieux marquée au sondage S10, une tendance à la baisse se manifeste, tant pour les niveaux de nappe minimums (à fin septembre) que pour les niveaux maximums (à fin

avril). Ce qui signifie en d'autres termes que la nappe, par cycle d'une année, descend plus bas et remonte moins haut.
Cette tendance à la baisse n'est toutefois due qu'au régime climatique défavorable, et n'est pas imputable aux différents niveaux de lac testés puisqu'elle affecte aussi bien les variantes à niveaux 'hauts' que les variantes à niveaux 'bas'. Par contre l'amplitude de cette baisse au cours des cinq années est certainement liée aux niveaux du lac. Prenons par exemple les variantes 7 (H=428.5 m) et 10 (H=429.8 m) au sondage S10, et comparons, dans le tableau ci-dessous, les hauteurs de nappe à fin avril et à fin septembre pour chaque année:

Fin avril

Temps [10 j] :	12	48	84	120	156
Variante 7 :	429.62^{99}	428.63^{14}	428.49^{8}	428.41^{4}	428.37
Variante 10 :	429.62^{23}	429.39^{9}	429.30^{2}	429.28^{0}	429.28

Fin septembre

Temps [10 j] :	27	63	99	135	171
Variante 7 :	427.62^{12}	427.50^{6}	427.44^{3}	427.41^{3}	427.38
Variante 10 :	427.62^{4}	427.58^{0}	427.58^{0}	427.58^{0}	427.58

Ces tendances à la baisse sont donc plus marquées pour la variante 7 que pour la variante 10 et décroissent assez rapidement dans les deux cas. On peut ainsi théoriquement conclure qu'un phénomène de tarissement progressif est bien présent dans le système et affecte même la variante 7 au-delà de la durée de cinq ans. Cependant, au vu de l'extrême petitesse de ces diminutions de niveaux (quelques centimètres) par rapport aux rabattements durables de 1 à 2 m prévalant pendant les périodes de végétation et dans la plupart des sondages, on ne peut pas, à notre sens, parler d'une situation phréatique qui se dégrade réellement avec le temps, celle-ci étant déjà – dès le premier cycle – catastrophique du point de vue du maintien des conditions marécageuses.

Comme précédemment, les différences entre variantes 'hautes' et 'basses' s'accentuent avec la proximité du rivage. Par exemple aux sondages S11 (non illustré) et S12, et pour les deux variantes 'hautes' (Variantes 9 et 10), la nappe rejoint brièvement la surface au mois d'avril pour replonger à nouveau rapidement à –2 m. Aux sondages S14 et S102 (non illustré), et pour ces deux variantes 'hautes', la nappe resature plus longuement le profil à trois reprises sur une période de cinq mois (de décembre à avril), mais des rabattements importants (de l'ordre du mètre) continuent d'affecter le système gravement et sans interruption durant toute la période de végétation.
Ce n'est finalement que dans une zone très réduite, soit entre les sondages S15 et S16, que le maintien d'un niveau de lac 'haut', par exemple H=429.80 (Variante 10) pourrait préserver les conditions marécageuses. Sur la figure 5.3 on constate en effet que les rabattements liés aux périodes sèches sont bien atténués par la présence d'un lac 'haut' et passent d'environ 0.3 m (S15) à 0 m (S16).

En définitive, la simulation d'une succession de cinq années sèches du type de 1989 indique qu'**une légère tendance à la baisse affecterait le système en raison d'un bilan hydrologique déficitaire**. Cette tendance, qui semble diminuer asymptotiquement, disparaît toutefois après quelques cycles pour les variantes à niveaux 'hauts' et disparaîtrait probablement aussi pour la variante à niveau 'bas' si la simulation avait été prolongée sur une dizaine de cycles. En premier lieu, il convient de souligner ici que ces légères baisses sont négligeables par rapport aux forts rabattements dictés par les

conditions climatiques, et qu'à moyen, voire à long terme, **la pérénnité des conditions marécageuses du transect est bien davantage menacée par une succession d'années du type de 1989 que par les différents niveaux de lac testés**.

Variantes 12 et 13 (régime climatique 7a, réel 'calé')

Simulations journalières sur la période avril – septembre 1991 'avec' et 'sans' lac, en imposant le bilan hydrologique 'calé' ($0.75P - 0.25EP$) à la surface du marais.
On évalue **l'effet 'net' de la régulation du lac sur le marais, dans le contexte hydrométéorologique journalier le plus réaliste possible, par insertion d'une barrière souterraine imperméable** (rideau de palplanches) sur le cordon littoral.

Cette modification du bilan hydrologique 'brut' ($P - EP$) a été déterminée en testant une vingtaine de variantes basées sur diverses modulations des quantités P et EP, et c'est finalement un bilan hydrologique hypothétique préconisant une réduction globale de ces deux quantités sur toute la période considérée qui a fourni les meilleures comparaisons entre les observations piézométriques de terrain et la simulation. Cette réduction des variables climatiques peut se justifier par le fait que le site est relativement éloigné de la station de mesures climatiques et qu'il est de toute évidence soumis à un microclimat spécifique. De plus, la pluie efficace (atteignant la nappe) est toujours inférieure à la pluie brute, et l'évapotranspiration peut être fortement réduite étant donnée l'humidité relative de l'air en site marécageux. Enfin, une modification sommaire des paramètres hydrodynamiques, dans la gamme des valeurs couramment rencontrées pour ce type de sol, a également été testée mais n'a entraîné que des modifications mineures des niveaux de nappe simulés.

Ces deux variantes peuvent certainement être considérées comme les plus 'précieuses' du point de vue des informations qu'elles fournissent concernant l'influence du lac en conditions naturelles. En effet, les variantes 12 et 13 sont calculées avec un conditionnement climatique journalier réaliste pour le Transect 9, et se différencient uniquement par la présence ou l'absence des relations hydrauliques entre le marais et le lac.

Sur la partie gauche de la figure 5.4 (variante 12), nous pouvons constater l'effet de ces modifications climatiques aux sondages S13 à S16. Mise à part la période mi-août – mi-septembre pour laquelle le phénomène évaporatif est quelque peu sous-estimé, les courbes observées et simulées évoluent au sein de la même enveloppe. Le sondage S16, sur la dune, reste bien entendu étroitement lié au niveau du lac.

La partie droite de la figure 5.4 permet d'évaluer l'effet 'net' de la régulation du lac sur le marais, dans le contexte hydrométéorologique journalier le plus réaliste possible, par insertion d'une barrière souterraine imperméable (rideau de palplanches) sur le cordon littoral (variante 13). La variante 12 reproduit raisonnablement bien les observations piézométriques de terrain et permet ainsi de lever, dans une confortable mesure, l'incertitude régnant sur le bilan hydrologique effectif du site. Dès lors, en simulant l'introduction d'une barrière imperméable au droit du cordon littoral, telle qu'illustrée schématiquement sur la figure 5.1, on redétermine – sous ces conditions climatiques réalistes – l'évolution probable que connaîtrait le système si celui-ci était purement et simplement 'déconnecté' du lac. La comparaison des niveaux de nappe simulés aux différents sondages, et pour ces deux variantes, permet alors de **quantifier avec une certaine confiance la distance d'influence des échanges lac–marais sur la régulation phréatique**.

On remarque, pour les sondages S13 et S14, que les courbes simulées sont très comparables pour les deux variantes et que des premiers écarts significatifs et durables

(3 à 4 cm) apparaissent durant le mois de septembre alors que la nappe est à son rabattement maximum (environ 50 cm). Ces écarts sont toutefois assez réduits et leur apparition en septembre est une conséquence des niveaux bas prévalant déjà pendant le mois d'août. On notera aussi aux sondages S13 et S14 que la resaturation totale du profil, lors des épisodes pluvieux, est identique pour les deux variantes. Cette recharge totale s'effectue en effet selon la fréquence et l'amplitude dictées par les conditions climatiques et n'est pas affectée par l'interruption artificielle des échanges lac – marais.
Ces deux observations importantes – recharge pluviométrique totale identique pour les deux variantes et écarts maximums faibles apparaissant uniquement en période de rabattements maximums – donnent à penser qu'un schéma de régulation du niveau du lac, tel celui de 1991, n'entraîne pas de perturbations de l'environnement phréatique aux sondages S13 et S14. La période avril-septembre 1991 étant fortement déficitaire par rapport à l'année hydrologique 'normale' (–147 mm par rapport à +85 mm), on peut conclure que, sous ces conditions relativement contraignantes pour le marais, la position du sondage S14 marque la limite d'influence du lac avec une certaine sécurité.

Finalement, la comparaison des nappes simulées 'avec' et 'sans' lac indique que **les échanges lac-marais affectent sensiblement le système entre la rive et le sondage S15, soit sur une distance d'environ 20 m**. Au-delà du sondage S15, les différences s'atténuent encore d'avantage pour disparaître au sondage S14, à environ 60 m du rivage, où les phases de remontée et de rabattement de la nappe ne sont plus du tout perturbées par la présence ou l'absence des échanges lac – marais.

5.2.4 Conclusions

L'approche globale des écoulements souterrains par modélisation mathématique, présentée ici de manière très partielle, a permis une confrontation tout à fait pertinente des résultats de simulation journaliers avec les observations piézométriques de terrain, ainsi qu'une simulation réaliste de l'évolution du système si celui-ci devait être isolé du lac. Il en résulte notamment que **la préservation des conditions marécageuses à long terme ne peut être assurée que par une répartition homogène des phases excédentaires et déficitaires du bilan hydrologique, en particulier durant les périodes de végétation**. Dans les conditions climatiques 'normales', **seule une frange riveraine d'une cinquantaine de mètres est susceptible d'être affectée durablement par l'adoption d'un niveau moyen de lac résolument 'bas'**.

Répondre à la question fondamentale de l'influence du lac sur un écosystème riverain aussi vaste que celui de la rive sud du lac de Neuchâtel s'avère extrêmement complexe. Les résultats issus de la modélisation hydrodynamique permettent néanmoins de simplifier notablement le problème. En effet, à l'exception d'une frange côtière d'environ 50 m, la recharge ou le drainage du marais par les flux souterrains liés au lac peuvent être négligés. **L'influence du lac s'en trouve donc réduite aux situations d'inondation directe dont l'effet est plus aisément mesurable puisque directement dépendant de la topographie**.

5.3 Piézométrie

5.3.1 Collecte et mise en forme des données

Les 287 piézomètres et les 4 règles posés dans 131 sites (chap. 2.2) ont été mesurés à un rythme hebdomadaire durant 63 semaines, du 17 avril 1991 au 24 juin 1992. En raison des très faibles modifications de niveau durant une partie de la période hivernale, plus précisément du 11 décembre au 25 mars, les mesures ont été effectuées tous les 15 jours.

Les valeurs des semaines manquantes ont été interpolées, de même que les valeurs manquantes occasionnelles isolées. Nous avons dérogé à cette règle en reportant simplement les valeurs de la semaine précédente pour la date du 18 décembre, première semaine non mesurée, à cause des pluies exceptionnelles du 21 décembre 1991. Toujours lors de cette période hivernale, l'eau des piézomètres a parfois gelé en surface (piézomètres gris de petit diamètre surtout). C'est donc la mesure du niveau gelé qui a été prise en considération, après vérification de la présence de la nappe sous la glace si nécessaire.
En fonction de la perméabilité du substrat atteint par le crépinage, certains piézomètres ont présenté, selon les circonstances, un retard plus ou moins marqué dans leur réponse. En cas de décalage évident entre les niveaux intérieur et extérieur (situation d'inondation), les deux ont été mesurés. Tout logiquement, seule la mesure extérieure a été retenue lors de l'exploitation des données.

Toutes les analyses ont été effectuées à partir des valeurs des piézomètres de petit diamètre (2,5 cm, crépinage localisé). Les mesures réalisées dans les piézomètres de diamètre 5 cm (crépinage intégral) ont néanmoins été portées à titre indicatif sur les graphes illustrant les variations temporelles (annexe 6).
Dans le cas d'un traitement multivariable et global des données, la présence de valeurs sèches très différentes selon les substrats dans lesquels sont implantés les groupements, par exemple molasse superficielle ou sédiments profonds, biaise l'analyse dans la mesure où les plages de variations potentielles de la nappe ne sont plus comparables. Pour remédier en partie à cet inconvénient, nous avons remplacé les valeurs sèches par des valeurs calculées simulant une descente et à une remontée du plan d'eau pendant la même période. Le principe de calcul consiste à incrémenter chaque semaine le niveau de nappe d'une valeur constante entre les 2 bornes d'une période de sécheresse, pour moitié en descente et pour moitié en remontée. La valeur de l'incrément, déterminée sur la base du comportement réel de la nappe au site étudié, correspond à la moitié de la variation hebdomadaire maximale observée en descente, hors des conditions d'inondation.
Enfin les données utilisées pour l'analyse multivariable (groupement) ont été codées (intervalles de classes de 5 cm entre +1 et -1 m, de 20 cm entre -1 et -5 m) afin d'éviter une différenciation trop fine liée par exemple aux régimes pluviométriques localisés.

5.3.2 Variations temporelles des niveaux piézométriques

L'évolution des niveaux piézométriques durant les 63 semaines de mesures est illustrée dans l'annexe 6 (graphes et tableaux). Il s'agit là davantage d'un outil visuel d'aide à l'interprétation générale des données que d'une contribution vraiment indispensable à l'élaboration de la courbe optimale, objectif prioritaire de notre étude.
Ces graphes permettent néanmoins de relever quelques traits intéressants relatifs au **fonctionnement des systèmes hydrologiques** étudiés:

- lors d'épisodes pluviométriques importants, l'effet sur les niveaux piézométriques et du lac est particulièrement bien marqué;

- le parallélisme de l'évolution des niveaux entre les piézomètres gris (Ø 2,5 cm) et noirs (Ø 5 cm) est gage d'une bonne précision dans les mesures. D'une manière générale, en cas de décalage, la dynamique des petits diamètres marque une certaine inertie (ex. 4gl, 4hl, 4il, 9fl, 23al, 29dl, 29il, 30dl, 30el, 30jl) peut être liée au diamètre ou au type de crépinage. Certains écarts peuvent être mis sur le compte de dysfonctionnements momentanés affectant le temps de réponse, d'oublis d'une ou l'autre mesure extérieure (cas d'inondation) ou plus rarement d'une erreur de mesure. Ces remarques valent également pour certains écarts avec le niveau du lac en cas d'inondation directe (par exemple sites 4f, 4g);

- les petits diamètres de niveau 2 (implantation profonde) présentent souvent une inertie encore plus marquée révélatrice de la diminution de perméabilité du substrat à la profondeur testée, résultat conforme à ce que nous voulions mettre en évidence par la pose de ces piézomètres (cf. par exemple 2f2, 9g2, 13h2, 16e2, 19b2, 29c2, 30b2). Ce constat renforce encore un peu les conclusions de la modélisation des flux souterrains (chap. 5.2.4);

- bien que jamais inondés, les piézomètres installés sur la dune présentent naturellement, par effet de proximité, une bonne connexion avec les fluctuations du lac (4j, 12j, 16g, 19n, 21j);

- dans l'ensemble, les forêts situées à l'arrière des transects ne sont pas véritablement concernées par les fluctuations actuelles du lac (en moyenne entre les altitudes 429,00 et 429,40 m/mer), observation déjà formulée à l'examen de la figure 2.3 (chap. 2.2);

- en période hivernale au sens large (au sens strict, elle peut être définie entre les mois de novembre 1991 et février 1992, cf. chap. 5.3.5) il y a déconnexion généralisée des mesures piézométriques avec les niveaux du lac;

- quelques cas particuliers doivent être mentionnés:

  * **transect 5:** zone arrière passablement perturbée par l'exploitation forestière. L'ensemble, y compris le marais, n'est pas directement connecté au lac. Le piézomètre 5i a bougé lors de la 2ème période de mesure (effet du gel, curiosité d'un promeneur ?);
  * **transect 9:** en dépit d'une situation fréquemment inondée en marais, il y a indépendance par rapport au lac en raison d'une altitude qui ne descend pas au-dessous de 429,55 m/mer, alors que celle du lac haut avoisine en moyenne 429,40;
  * **transect 10:** globalement comparable au N° 9, son altitude encore beaucoup plus élevée le rend totalement dépendant d'une alimentation pluviale et par les ruissellements de falaise (ces derniers ont été évalués lors de l'étude géophysique, cf. chap. 2.3), excluant par là toute inondation par le lac;
  * **transect 16:** le décalage entre les niveaux des 2 types de piézomètres du site 16e est probablement dû à une erreur de nivellement ou de mesure de la garde au sol;
  * **transect 21:** le piézomètre de dune 21j1 donne une idée du décalage possible avec le lac malgré la proximité des deux sites (environ 4 m);
  * **transect 25:** les sites e et f (sols superficiels malheureusement souvent perturbés) caractérisés par des mesures qui évoluent de manière erratique, ainsi que les difficultés techniques qui ont entravé les mesures faites à l'aide de la règle dans l'étang (arrachage hivernal) nous ont conduit à l'abandon de ce transect (globalement mal choisi) pour l'élaboration de la typologie globale (cf. chap. 6.1);
  * **transect 27:** en dépit des apparences trompeuses de certains niveaux mesurés, ce transect n'est pas lié au lac à l'exception bien sûr de la roselière lacustre. Ceci découle non seulement de l'observation d'une dynamique à réponse rapide de la part des piézomètres de grand diamètre (crépinage intégral), mais également des données fournies par une étude très détaillée de la zone englobant le transect, effectuée dans le cadre d'un travail de diplôme universitaire (ENGGIST 1994, annexe 9).
  * **transect 29:** contrairement au N° 30, dont le fonctionnement était postulé comparable (situation de delta), le transect 29 n'est pas vraiment lié au lac.

En conclusion, s'agissant de l'influence potentielle du lac, l'examen des courbes suggère trois catégories de transects en fonction des corrélations globales qu'ils présentent, sur une partie tout au moins, avec les fluctuations des niveaux du lac (cf. également tab. 5.1):

- **très bonnes corrélations**: transects N° **2** (dès 2f), **4** (dès 4h), **19** (dès 19h), **21** (dès 21e) et **30** (dès 30h).
- **corrélations occasionnelles possibles en marais**, mais jamais observées durant notre période de mesures, selon l'importance des crues et la proximité du lac (flux souterrains sur courtes distances, cf. chap. 5.2.4): transects N° **5**, **9**, **12**, **13**, **16**, **25**, **27** et **29**.
- **jamais de corrélation**: transects N° **10** et **23**.

Cette évaluation est complétée par l'examen des corrélations calculées et exprimées graphiquement pour les cas de liaison les plus manifestes (cf. chap. 5.3.3).

5.3.3 Détermination des conditions et des fréquences d'inondations

Au vu des conclusions de la modélisation hydrodynamique (cf. chap. 5.2), **la caractérisation des conditions et des fréquences d'inondations des différents milieux devient prioritaire pour évaluer l'impact du niveau du lac sur la nappe phréatique en marais**. En effet le principe de la détermination de la courbe optimale (cf. chap. 6.3) consiste, pour chaque groupement, à **garantir mensuellement le niveau d'eau moyen du type global auquel l'unité appartient**. Pour ce faire, et compte tenu du fait que les flux souterrains n'agissent que très lentement et pas au-delà de quelques dizaines de mètres, seule l'inondation directe par le lac peut être envisagée, les autres sources d'alimentation n'étant naturellement pas influençables.
La **détermination pratique des possibilités réelles d'inonder chaque site directement par l'eau du lac** repose sur l'hypothèse simple suivante: dans un graphe en nuage de points (couples de valeurs X Y), la dépendance directe entre les deux variables niveau du lac et niveau piézométrique doit se traduire par un alignement des points (à un intervalle de confiance près) selon une direction théorique à 45°. Le schéma de principe est illustré sur la figure 5.5 et les cas réels, dont l'interprétation s'appuie en outre sur le calcul des corrélations simples présentées dans le tableau 5.1, en annexe 7.

L'examen du schéma de principe (figures 1.5 et 5.5) montre qu'il faut envisager plusieurs situations en fonction de la position des points de mesure dans les différents secteurs. Si la plupart des cas n'appelle pas d'autres commentaires que ceux mentionnés, il faut remarquer tout de même la position a priori aberrante de certains points, écartés de l'emplacement qu'ils devraient occuper après équilibrage gravitaire plus ou moins instantané des niveaux d'eau. En dehors d'un dysfonctionnement du piézomètre, toujours possible, cette situation non stabilisée peut aussi être due à l'étroitesse des chenaux de communication entre les différents "vases communicants" (lac marais à travers la dune, dépressions variées à l'intérieur du marais) qui empêche un écoulement suffisamment rapide dans un sens ou dans l'autre. Dans la zone d'inondation avec relation directe nappe-lac (altitude supérieure au cordon littoral), seul le dysfonctionnement du piézomètre entre en considération pour expliquer de tels écarts.

Comme l'indique la figure 5.5, certains sites inondables peuvent être isolés du lac par un cordon littoral (seuil), ce qui détermine une zone au sein de laquelle les variations concomitantes des niveaux du lac et du marais sont purement fortuites. Cette situation ne peut être mise en évidence que sur la base d'un examen visuel, parfois délicat, des graphes réels. Dans l'idéal, ceux-ci doivent alors présenter, principalement durant la période hivernale où le lac est bas, une série de points alignés indiquant l'altitude à partir de laquelle il y a déconnexion entre le lac et le piézomètre. De même le phénomène peut

(mais ne doit pas nécessairement) être marqué par une rupture de l'alignement théorique à environ 45° entre deux dates successives. Pratiquement, il est nécessaire de considérer cette limite avec une certaine tolérance, que nous avons fixée à 2 cm.

Avec ou sans cordon littoral, la direction théorique (45°) ou réelle (calculable par régression) marquée par l'alignement des points en zone d'inondation directe liée au lac peut être matérialisée à l'aide d'une droite qui doit passer par l'intersection des deux lignes de sol (cf. fig. 5.5). Dans plusieurs cas, un décalage par rapport à cette intersection nous a permis de mettre en évidence un décalage, au niveau du sol, entre l'altitude mesurée (qui dépend du choix souvent arbitraire de l'emplacement de la mire en conditions marécageuses) et l'altitude fonctionnelle. Dans la mesure où l'écart excédait 1 cm, nous avons effectué la correction permettant de prendre en considération l'altitude fonctionnelle du sol. La valeur de cette correction a également été confirmée en vérifiant que, pour les dates concernées, la somme des écarts nappe-lac soit minimale. Pour faciliter l'interprétation, nous avons également tenu compte de l'intervalle de confiance à P = 0.05 lié au calcul de la droite de régression (non représentée).
Les roselières de dune (sites 4j, 16g, 21j, 27j, 29j) constituent un cas particulier: même non inondées, elles restent, par effet de proximité, directement influencées par le niveau du lac jusqu'à une certaine profondeur dans le sédiment. Dans l'annexe 7, cette situation est indiquée par une valeur de seuil négative. La roselière intérieure de l'étang de Champ-Pittet (site 2f) présente le même phénomène déterminé toutefois par la présence d'un sol organique totalement perméable dont l'altitude de surface ne peut guère être mesurée avec précision.
A partir de l'analyse des données piézométriques selon le principe illustré dans la figure 5.5, nous avons également déterminé les critères nécessaires au calcul automatique du nombre de jours des différentes catégories d'inondations:

- **jours liés**: $\sum$ lac $\geq$ seuil (valeur inférieure)
- **jours non liés**: $\sum$ [(pz $\geq$ sol) ET (lac < seuil)] OU [(pz < sol) ET (lac $\geq$ sol ET lac < seuil)]
- **jours non inondés**: $\sum$ (pz < sol) ET (lac < sol)

Le nombre de jours d'inondation résultant de l'interprétation des graphes et du calcul automatique (sur données journalières interpolées à partir des valeurs hebdomadaires) figure dans les tableaux statistiques de l'annexe 8 (voir la discussion au chapitre 5.3.5).

5.3.4 Détermination des groupes fonctionnels de nappes

Dans le but de fournir une **typologie fonctionnelle globale combinant la végétation, les nappes et les sols**, nous avons d'abord établi les **typologies partielles** de chacun de ces descripteurs. Pour ce qui est des nappes, il s'agissait par là de déterminer similitudes et différences de comportement des différents sites, voire de mettre en évidence certaines proximités indicatrices d'éventuelles **zones à décalage**.

a) Détermination de la période hivernale

Un premier examen des graphes de variations temporelles des niveaux piézométriques révèle, faisant suite à une évolution estivale très diversifiée, une tendance généralisée à la remontée puis au maintien de nappes hautes durant la période hivernale, principalement sous l'influence de la pluviosité (cf. chap. 5.3.2). Pour neutraliser dans la mesure du possible cet effet d'uniformisation, effet susceptible de masquer partiellement la distinction fine des groupes de nappes, nous avons d'abord déterminé, par analyse multivariée, les limites de cette période hivernale afin de pouvoir l'extraire des données destinées à l'analyse de groupement.

Pour ce faire, les données globales ont été traitées par la méthode du groupement chronologique non-hiérarchique agglomératif à liaison proportionnelle proposée par le programme "CHRONO" du Progiciel R (LEGENDRE et VAUDOR, 1985). Il s'agit d'un groupement sous contrainte de contiguïté temporelle, ce qui signifie que seuls les objets ou groupes d'objets adjacents le long de la série peuvent se grouper. La matrice initiale, qui contient les sites (objets) en lignes et les dates de mesures (descripteurs) en colonnes, est transposée de telle sorte que ce sont les semaines qui deviennent les objets contigus. Le calcul de la mesure de ressemblance est basé sur la distance euclidienne.

Les résultats sont représentés sur la figure 5.6. Les 4 niveaux de probabilité testés (contrainte déterminant de manière directe le nombre de groupes formés) montrent la persistance de 2 seuils permettant de délimiter clairement une période hivernale entre les semaines 30 (6 novembre 1991) et 47 (4 mars 1992). Avec une probabilité ≥ à 0,05, ces limites peuvent être étendues respectivement de 5 et 4 semaines de part et d'autre. Nous ne retenons pas cette période hivernale élargie pour deux raisons: d'une part la période restreinte (principale) correspond davantage à nos observations de terrain (selon les milieux, les variations d'octobre peuvent être importantes, cf. 5.3.2), d'autre part le lac amorce une remontée spectaculaire au mois de mars. Ce choix nous permet également de conserver un maximum de données pour l'analyse de groupement.

b) Le groupement

Après extraction des valeurs hivernales (semaines 30 à 47, cf. ci-dessus), la matrice des données non transposées est traitée par la méthode du groupement hiérarchique agglomératif à liaison proportionnelle proposée par le programme "GROUPEMENTS" du même Progiciel R (LEGENDRE et VAUDOR, 1985). Contrairement à la procédure précédente, il s'agit cette fois d'un groupement sans contrainte. Le calcul de la mesure de ressemblance est à nouveau basé sur la distance euclidienne. En revanche le choix de la connexité, ici 0,4, est déterminé grâce à une série de statistiques annexes offertes en option par le programme (corrélations cophénétiques), lesquelles permettent d'évaluer dans quelle mesure le groupement obtenu correspond à la matrice de similarités d'origine. Les groupes issus du clustering figurent dans les tableaux statistiques de l'annexe 8, en particulier le tableau c. Le choix du nombre de groupes à retenir a été effectué à l'aide du coefficient d'efficacité qui représente la valeur de réduction de l'information en fonction des étapes du groupement agglomératif. L'examen comparé du contenu des groupes suggère les brefs commentaires suivants:

- dans l'ensemble, les groupes présentent une assez bonne homogénéité du point de vue de leur composition végétale, avec en particulier une séparation marais - forêts bien marquée;

- les sols superficiels sur molasse ne sont pas réellement rassemblés, même s'ils sont plus abondants dans les groupes 1,3 et 6;

- le groupe 5 représente une situation particulière sise à l'arrière du transect 9, et non représentative aussi bien quantitativement que qualitativement;

- les relevés 506 et 1911, correspondant à 2 roselières "intérieures" (étangs), sont également regroupés en tant que cas particuliers liés cette fois à la technique de mesure sur règle qui fournit des valeurs brutes systématiquement plus élevées (inondation permanente);

- l'examen des groupes de nappes ne permet pas à lui seul de distinguer des zones à décalage fonctionnel, à savoir des groupements dont la composition actuelle ne correspond plus au niveau de nappe nécessaire à leur maintien. Toutefois, dans le groupe 6 des bas-marais modérément inondés, la présence de roselières, de

groupements à massette ainsi que de marais à grandes laiches, unités en moyenne davantage inondées (voir groupe 7), constitue un premier indice.
A l'inverse, on trouve plusieurs représentants de marais à choin et prairies à molinie hors de leur centre de gravité (groupe 2). Il s'agit souvent de situations caractérisées par un sol superficiel sur molasse (relevé 1305: groupe 3; relevés 901 (9a1), 2302, 2704: groupe 6) conditionnant une nappe en moyenne plus élevée (± nombreuses valeurs sèches) que la moyenne pour ce type de groupement.

En résumé, l'analyse de groupement sur la base des données codées de la saison de végétation révèle une **structure fonctionnellement cohérente des groupes de nappes**, et présente quelques pistes pour préciser d'éventuels sites à décalage.

5.3.5 Principales caractéristiques des mesures piézométriques et conclusions

Pour faciliter l'interprétation générale des données piézométriques, tant en ce qui concerne la représentation visuelle (chap. 5.3.2) que les corrélations avec le lac (chap. 5.3.3) ou encore les groupements, nous avons réuni dans l'annexe 8 les **principales caractéristiques numériques habituellement utilisées** (cf. par exemple KLÖTZLI 1969). Il s'agit de la **moyenne**, de la **médiane** (niveau atteint avec la moitié de l'effectif des valeurs ordonnées), des **niveaux maximum et minimum**, des **écarts hebdomadaires maximum et minimum**, des **fluctuations totales maximales**, des **durées d'inondation et de sécheresse** (nombre de semaines et %), des **durées d'inondations directement liées au lac** (nombre de jours et %). Par soucis d'être complet, cinq versions sont présentées qui regroupent les données selon les unités synsystématiques d'une part (valeurs annuelles et de la saison de végétation, calculées respectivement sur 53 et 35 semaines), selon les groupes issus du clustering (des nappes et des sols) et de la typologie globale d'autre part (calculés sur 35 semaines). A l'intérieur des tableaux correspondant aux unités synsystématiques, les valeurs sont ordonnées d'abord par altitudes moyennes croissantes puis, à l'intérieur des groupements, par ordre croissant des moyennes (du plus humide au plus sec). La totalité de cette information, certes partiellement redondante, permet d'utiles comparaisons quant aux effets liés à la saison de végétation ou encore au type de groupement.
Sans analyser cet ensemble dans le détail, quelques observations méritent une brève mention:

- dans le domaine des altitudes de fluctuation générale du lac (429 - 429,40, voire 429,60), il y a un rapport direct entre l'altitude et les principales caractéristiques telles que niveau moyen, inondations respectivement sécheresse ou % de liaison au lac. De ce point de vue, les aulnaies constituent une exception;

- l'indication fournie par les coefficients de variations montre tout naturellement un net resserrement de la variation dans le cas des groupes fonctionnels issus du clustering;

- les moyennes annuelles des nappes sont logiquement plus hautes (plus humides) que les moyennes calculées sur la base de la saison de végétation seulement, excepté pour les roselières;

- les fluctuations maximales s'observent chez les groupements forestiers mais aussi à l'intérieur des roselières si l'on tient compte, tous sites confondus, de l'écart entre minimum et maximum;

- en matière d'inondation et de sécheresse, les tendances respectent parfaitement les conditions répertoriées dans la littérature: pôle le plus inondé du côté des roselières, marais à grands Carex et aulnaies, pôle le plus xérophile avec les

pinèdes et les chênaies, situation intermédiaire pour les autres groupements, avec une situation fort contrastée pour le groupement à marisque;
- en termes d'influence potentielle du lac, nous avons émis au chapitre 2.2 quelques considérations préliminaires sur la base de la zonation altitudinale par rapport aux plages de battement du lac. En examinant les valeurs de la colonne liaison au lac, ces prévisions doivent être révisées à la baisse, notamment pour le groupement à massette, occasionnellement influençable par le lac seulement, et pour le marais à petites laiches et la prairie à molinie, rarement sinon jamais influençables. En fait, comme le montre le tableau 6.1, la problématique de l'influence du lac doit être envisagée sous l'angle de la typologie fonctionnelle globale et non par l'appartenance à une unité synsystématique donnée.

En conclusion, l'annexe 8 résume les principales caractéristiques dégagées par l'ensemble des analyses effectuées sur les données piézométriques. Hormis la somme d'information déjà utilisable en l'état, en particulier dans une perspective de gestion, ces résultats doivent maintenant être intégrés dans l'élaboration d'une typologie globale, étape indispensable aussi bien à la détermination de l'influence potentielle du lac sur le niveau d'eau en marais qu'à la poursuite de l'analyse fine des situations susceptibles de présenter un décalage fonctionnel.

Figure 5.1 Modélisation bidimensionnelle du transect 9

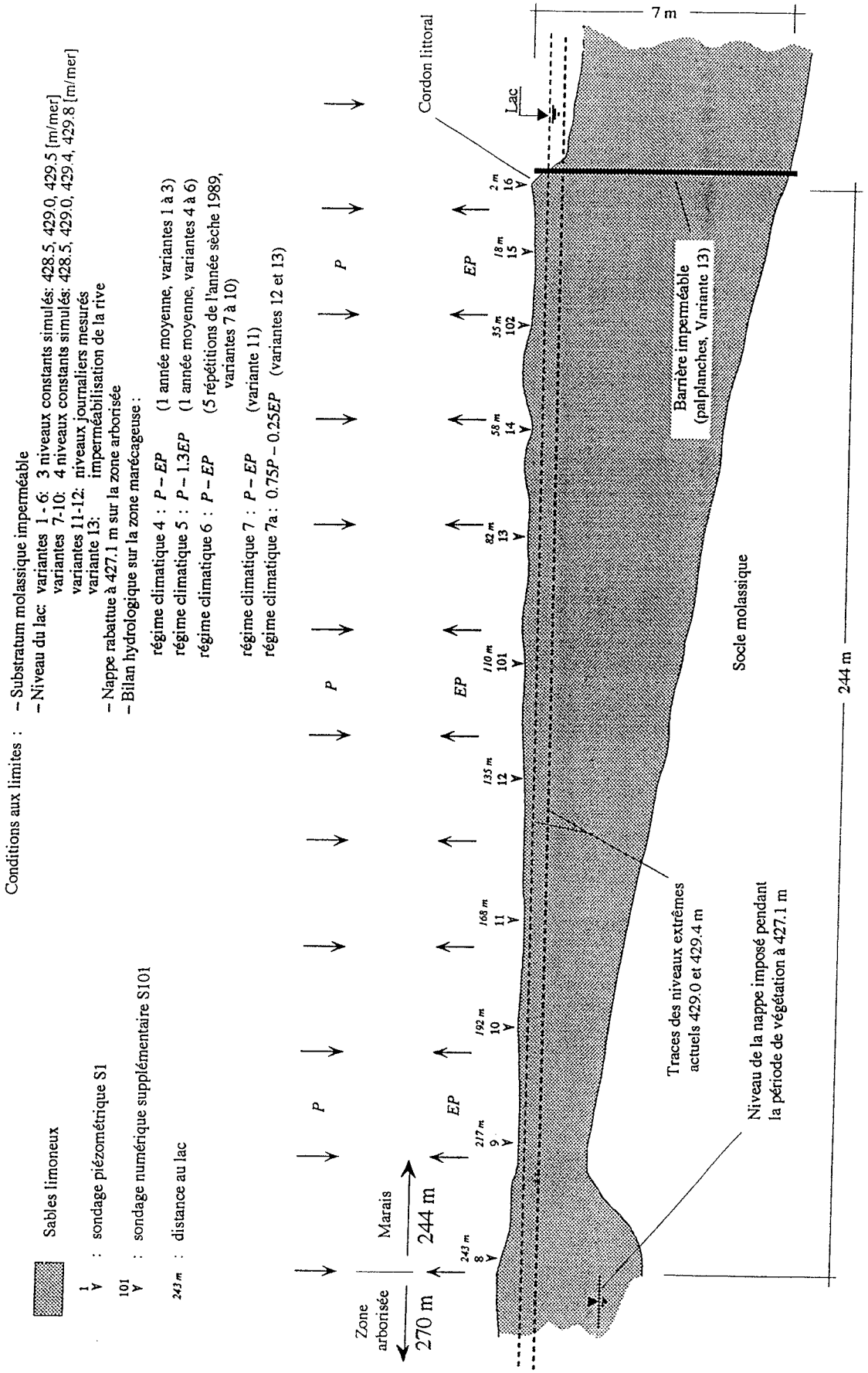


Figure 5.2a Simulation numérique des mouvements de nappe, séries temporelles des variantes 1 à 3 (régime climatique 4)

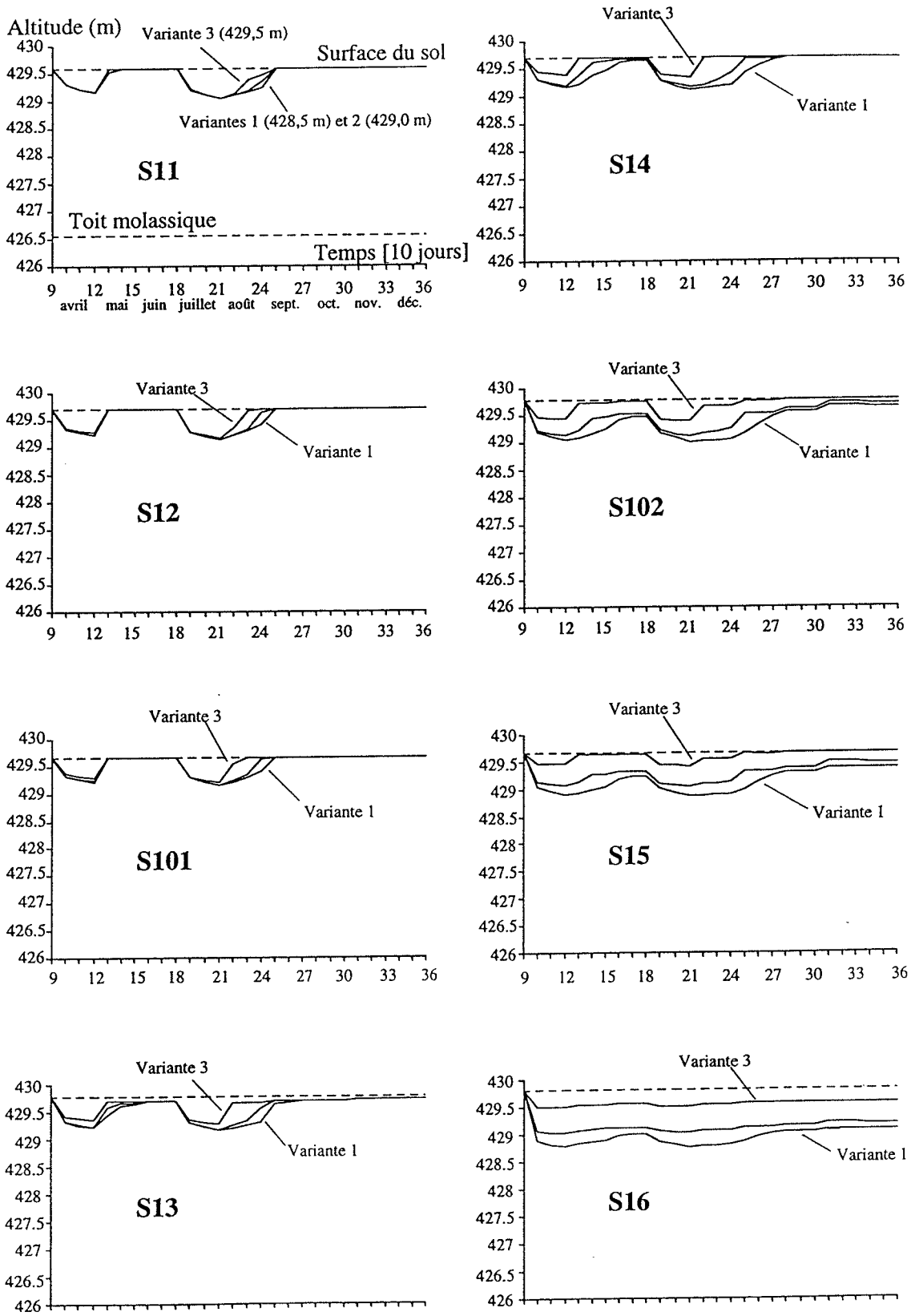


Figure 5.2 b Simulation numérique des mouvements de nappe, modifications spatiales pour les variantes 1 à 3 (régime climatique 4)

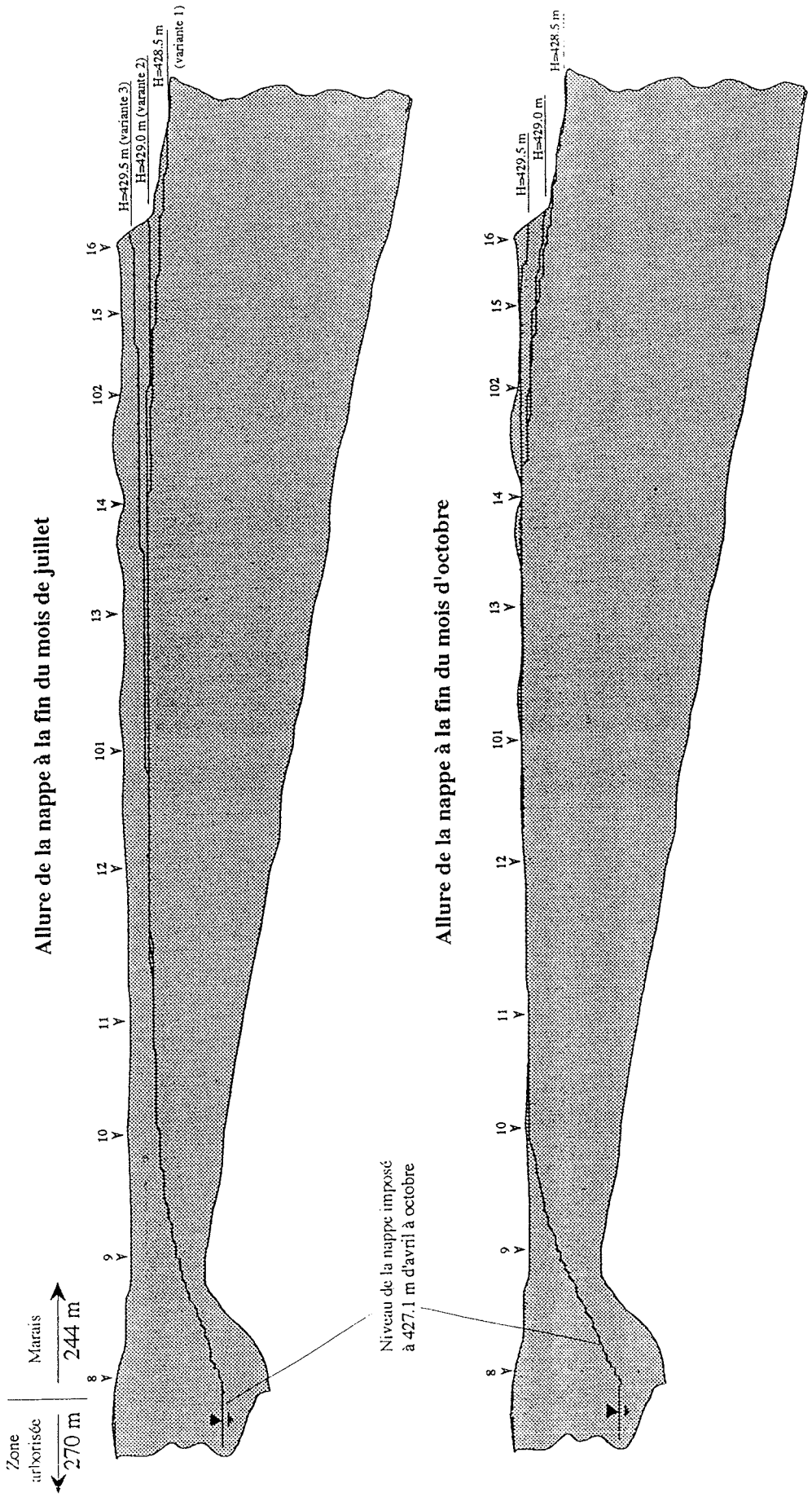


Figure 5.3 Simulation numérique des mouvements de nappe, séries temporelles des variantes 7 à 10 (régime climatique 6)

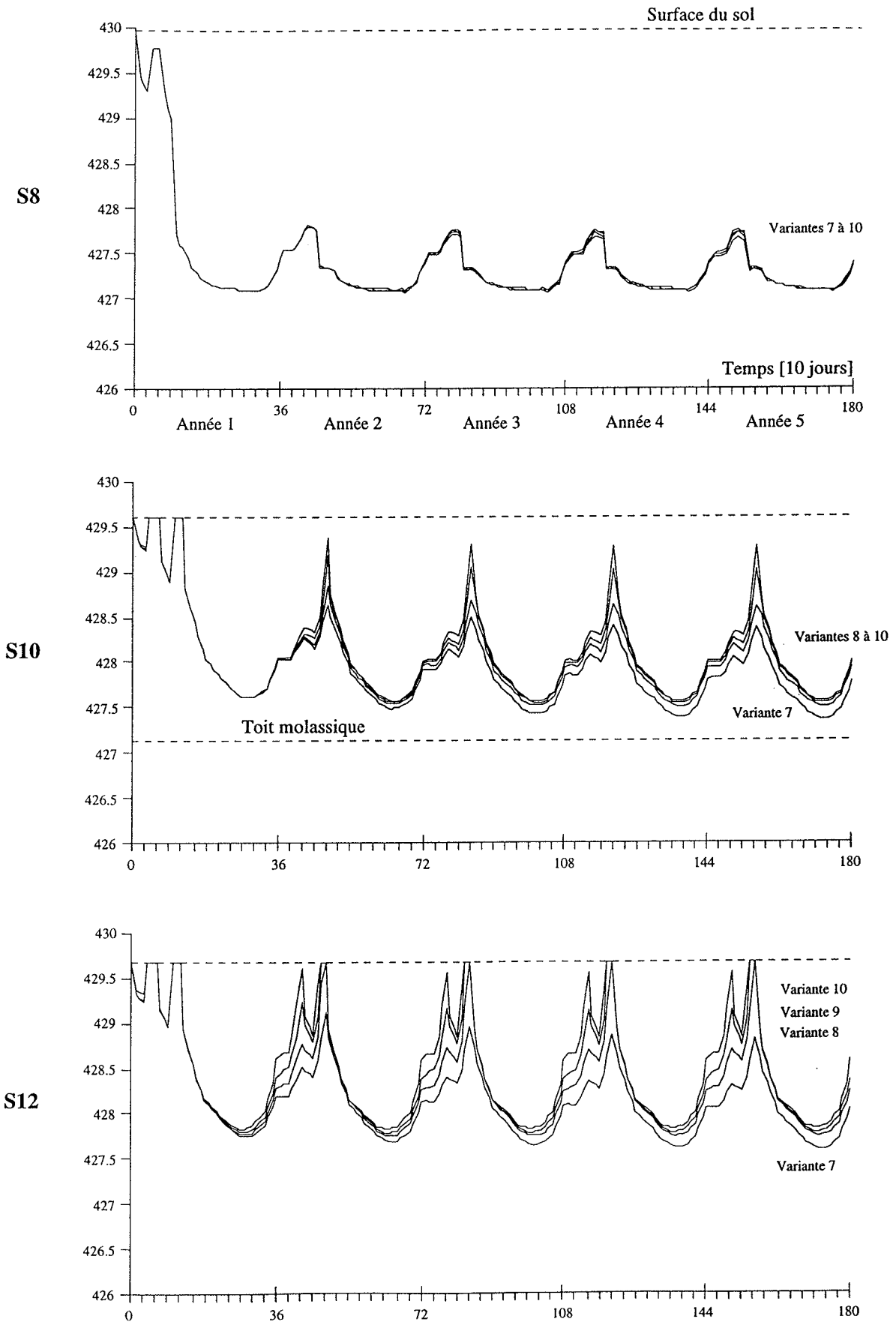


Figure 5.3 Simulation numérique des mouvements de nappe, séries temporelles des variantes 7 à 10 (régime climatique 6) (suite)

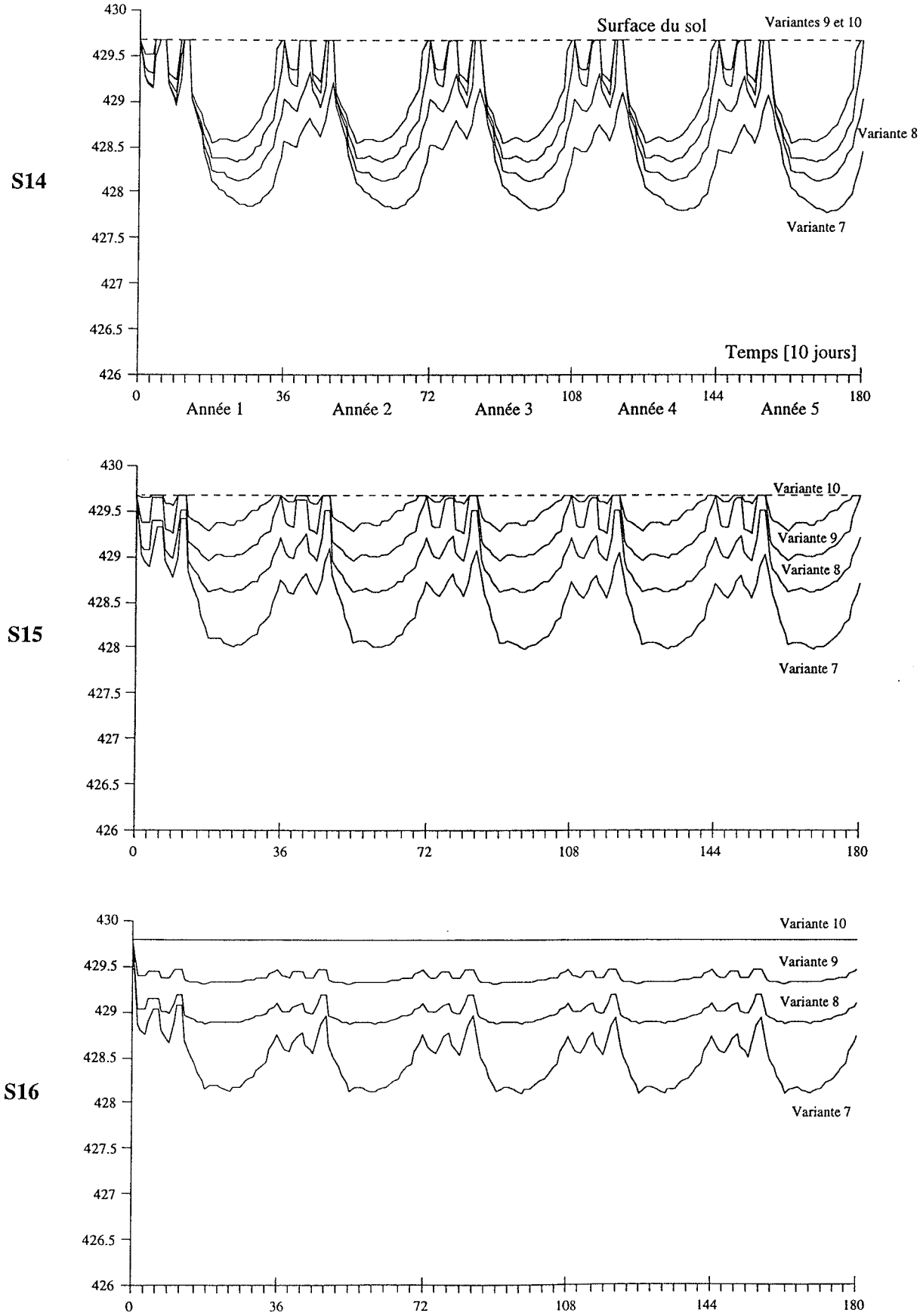


Figure 5.4 Simulation numérique des mouvements de nappe, variantes 12 et 13

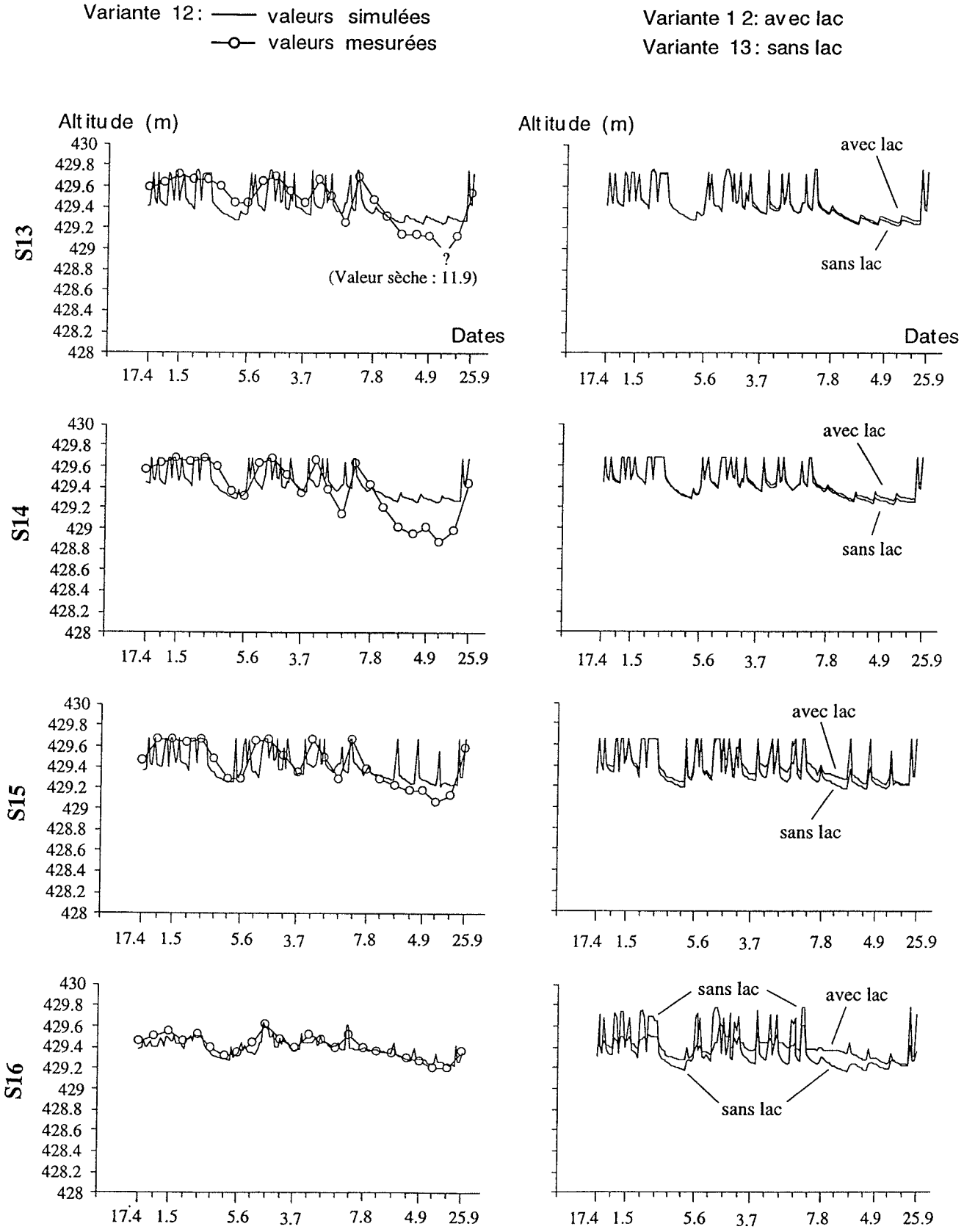


Figure 5.5 Graphe X Y des altitudes de la nappe et du lac
(données hebdomadaires ou journalières)

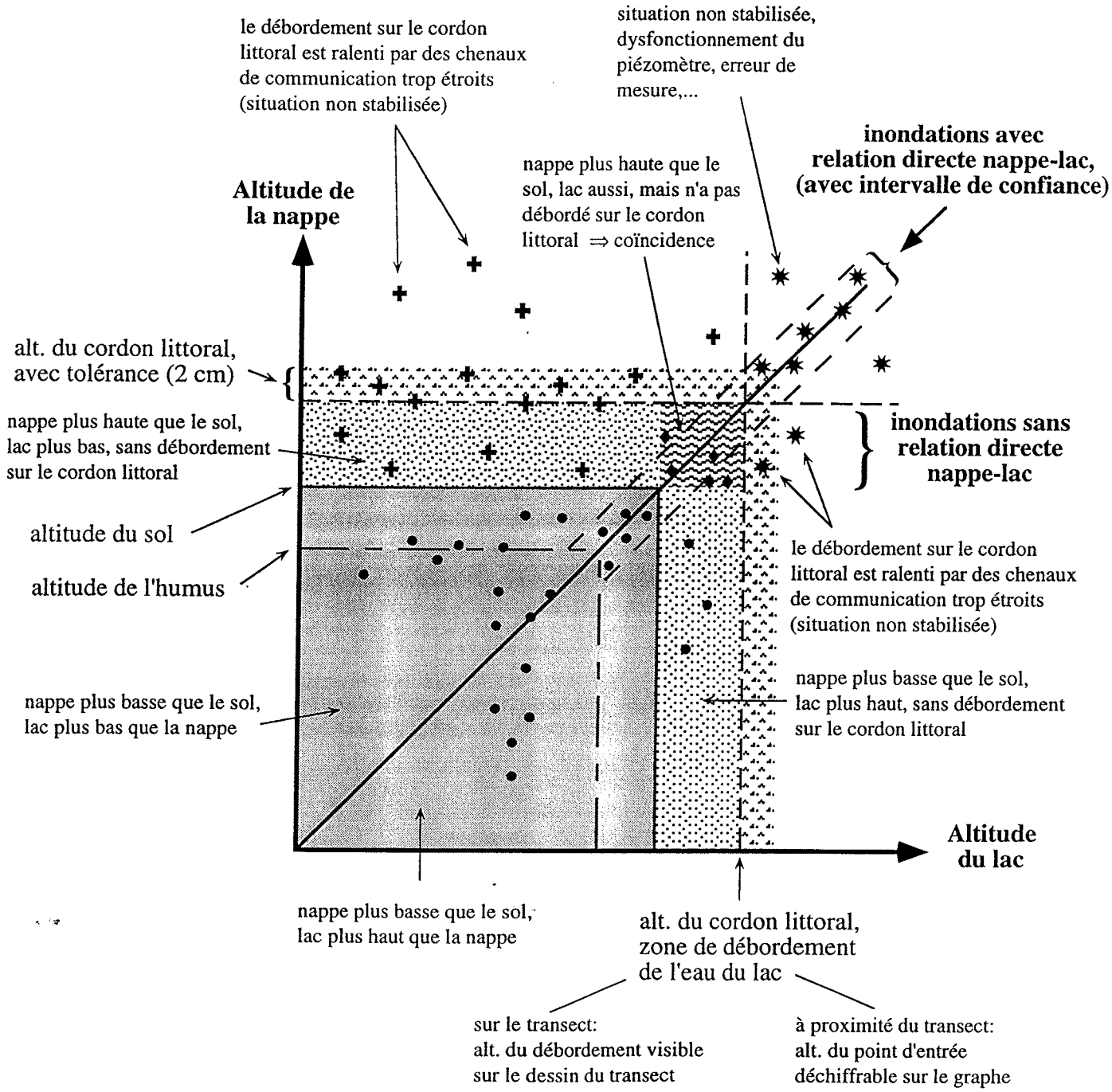
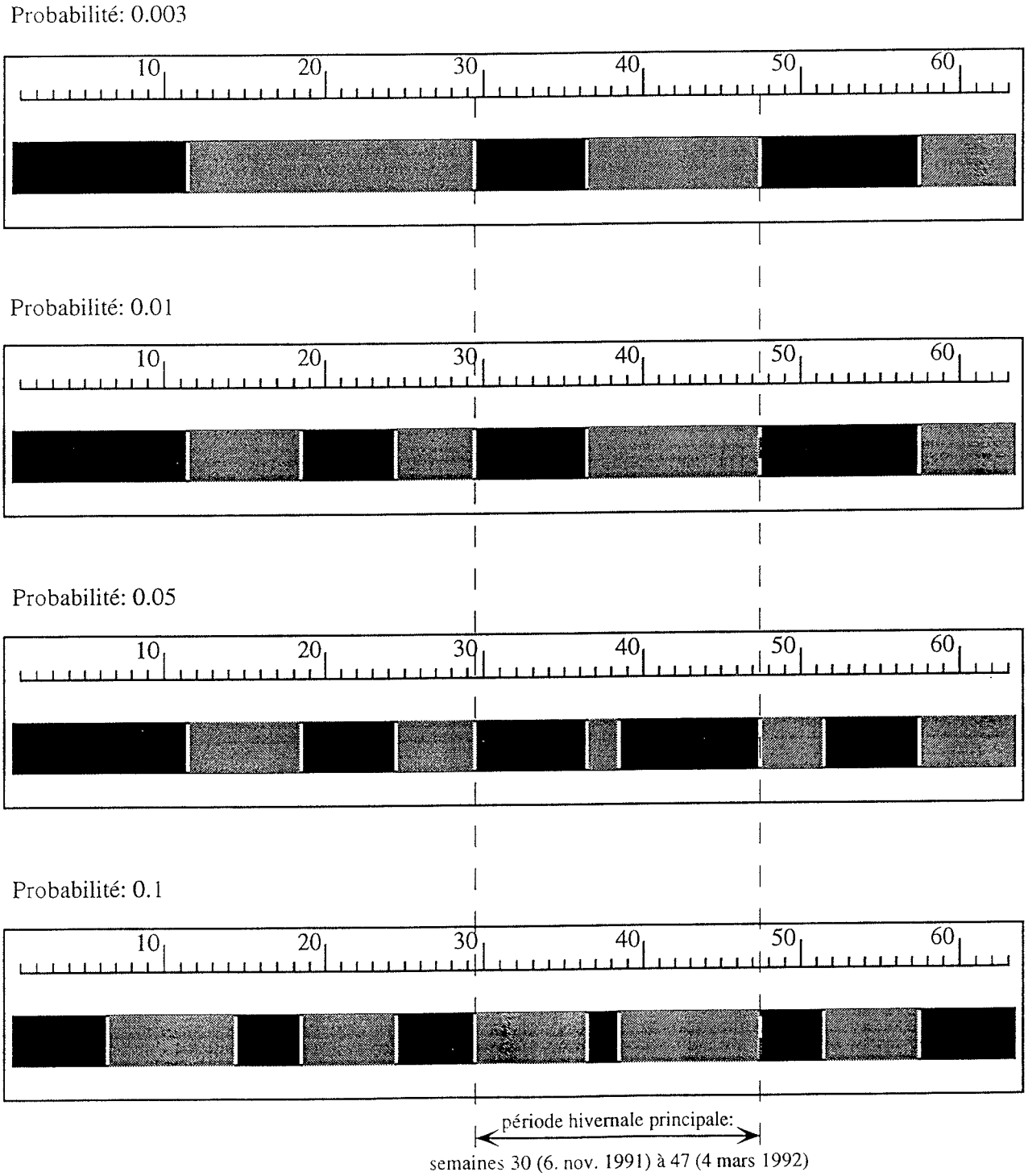


Figure 5.6 Groupement CHRONO, avec contrainte de contiguïté temporelle (connexité: 0,5)



Remarques:
- connexité: proportion de liens nécessaire pour permettre l'admission d'un nouvel objet à un groupe
- probabilité: la fusion entre 2 groupes est réalisée si sa probabilité (calculée à l'aide d'un test par permutation) est supérieure au seuil limite choisi par l'usager

Tableau 5.1 Coefficients de corrélation lac - piézomètres

Pz	2b1	2b5	2c1	2c5	2d1	2d5	2e1	2e5	2f1	2f5	2g1	2g5
Dist. lac-pz	236		193		168		136		105		92	
Total	0.19	0.00	0.09	0.01	0.08	0.05	0.12	0.14	0.97	0.97	####	
1ère saison	0.20	0.52	0.52	0.53	0.24	0.24	0.47	0.49	0.99	0.99	0.98	
Hiver	0.39	0.05	0.40	0.53	0.26	0.36	0.08	0.08	0.79	0.73	0.95	
2ème saison	0.23	0.38	0.22	0.11	0.07	0.05	0.55	0.55	0.96	0.96	0.96	

Pz	4b1	4b5	4c1	4c5	4d1	4d5	4e1	4e5	4f1	4f5	4g1	4g5	4h1	4h5	4i1	4i5	4j1	4j5
Dist. lac-pz	227		203		192		182		155		109		66		20		2	
Total	0.05	0.24	0.12	0.12	0.07	0.07	0.04	0.03	0.42	0.35	0.51	0.44	0.60	0.53	0.74	0.62	0.85	0.84
1ère saison	0.39	0.31	0.34	0.37	0.36	0.37	0.44	0.44	0.74	0.67	0.77	0.74	0.84	0.83	0.94	0.89	0.98	0.98
Hiver	0.15	0.43	0.44	0.42	0.38	0.49	0.43	0.47	0.21	0.21	0.74	0.74	0.72	0.70	0.70	0.67	0.35	0.42
2ème saison	0.39	0.01	0.07	0.06	0.07	0.02	0.25	0.21	0.54	0.54	0.73	0.73	0.77	0.77	0.84	0.84	0.92	0.86

Pz	5a1	5a5	5b1	5b5	5c1	5c5	5d1	5d5	5e1	5e5	5f1		5g1		5h1		5i1	
Dist. lac-pz	230		189		161		142		119		103		33		17		7	
Total	0.12	0.10	0.15	0.15	####	####	0.13	0.16	0.14	0.12	0.09		0.19		0.14		0.53	
1ère saison	0.37	0.40	0.28	0.21	####	####	0.27	0.28	0.24	0.24	0.42		####		####		####	
Hiver	0.56	0.49	0.32	0.49	0.09	0.78	0.29	0.24	0.67	0.67	0.23		0.37		0.53		0.43	
2ème saison	0.27	0.18	0.17	0.15	0.15	0.18	0.09	0.01	0.12	0.12	0.14		0.34		0.33		0.83	

Pz	9a1	9a5	9b1	9b5	9c1	9c5	9d1	9d5	9e1	9e5	9f1	9f5	9g1	9g5	9h1	9h5	9i1	9i5	9j1	9j5	9k1	9k5	9l1	9l5	9m1	9m5	9n1	9n5	9o1	9o5	9p1	9p5
Dist. lac-pz	475		419		391		371		346		310		257		243		217		192		168		135		82		58		18		2	
Total	####	####	0.07	0.08	0.09	0.14	0.14	0.12	0.16	0.11	####	0.10	0.12	0.12	0.10	0.10	0.05	0.09	0.07	0.09	0.08	0.08	0.05	0.00	0.11	0.17	0.13	0.08	0.10	0.08	0.67	0.64
1ère saison	####	####	0.22	0.19	0.31	0.29	0.32	0.30	0.45	0.45	0.68	0.71	0.40	0.38	0.32	0.36	0.37	0.33	0.38	0.38	0.35	0.34	0.34	0.40	0.23	0.15	0.23	0.25	0.34	0.34	0.83	0.76
Hiver	####	####	0.05	0.05	0.47	0.18	0.43	0.43	0.31	0.01	####	0.63	0.50	0.53	0.61	0.55	0.85	0.85	0.43	0.43	0.34	0.34	0.71	0.53	0.51	0.55	0.69	0.68	0.48	0.49	0.81	0.78
2ème saison	####	####	0.18	0.22	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.03	0.05	0.06	0.00	0.11	0.09	0.01	0.01	0.05	0.05	0.13	0.06	0.03	0.04	0.02	0.00	0.01	0.03	0.60	0.57

Tableau 5.1 Coefficients de corrélation lac - piézomètres (suite)

Pz	10a1	10a5	10b1	10b5	10c1	10c5	10d1	10d5	10e1	10e5	10f1	10f5	10g1	10g5	10h1	10h5	10i1	10i5	10j1	10j5	10k1	10k5
Dist. lac-pz	517		502		473		427		360		299		191		126		109		49		16	
Total	0.02	0.15	0.29	0.21	0.24	0.17	0.28	0.17	0.31	0.20	0.55	0.53	0.27	0.29	0.28	0.21	0.19	0.16	0.19	0.10	0.15	0.12
1ère saison	0.37	0.15	0.11	0.12	0.14	0.23	0.15	0.07	0.34	0.24	0.38	0.07	0.42	0.09	0.19	0.13	0.22	0.22	0.11	0.15	0.18	0.18
Hiver	0.20	0.01	0.61	0.49	0.33	0.37	0.43	0.28	0.55	0.55	0.19	0.19	0.07	0.07	0.55	0.55	0.01	0.01	0.06	0.06	0.05	0.05
2ème saison	0.13	0.20	0.09	0.21	0.03	0.03	0.14	0.10	0.06	0.06	0.23	0.23	0.20	0.20	0.03	0.03	0.00	0.01	0.08	0.08	0.04	0.02

Pz	12d1	12d5	12e1	12e5	12f1	12f5	12g1	12g5	12h1	12h5	12i1	12i5	12j1	12j5
Dist. lac-pz	287		262		222		194		140		78		3	
Total	0.26	0.22	0.14	0.19	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.92	0.93
1ère saison	0.16	0.20	0.26	0.26	0.45	0.45	0.47	0.47	0.51	0.49	0.44	0.43	0.94	0.96
Hiver	0.28	0.19	0.76	0.30	0.81	0.81	0.71	0.71	0.51	0.51	0.65	0.58	0.93	0.92
2ème saison	0.02	0.02	0.01	0.09	0.34	0.28	0.37	0.35	0.38	0.23	0.48	0.41	0.94	0.95

Pz	13a5	13b5	13c5	13d1	13d5	13e1	13e5	13f1	13f5	13g1	13g5	13h1	13h5
Dist. lac-pz	307	286	246	199		152		130		76		13	
Total	####	####	####	0.04	0.05	0.18	0.19	0.15	0.15	0.01	0.01	0.18	0.07
1ère saison	####	####	####	0.52	0.46	0.39	0.41	0.30	0.31	0.41	0.38	0.56	0.44
Hiver	0.03	####	####	0.26	0.27	0.50	0.42	0.42	0.16	0.57	0.57	0.51	0.54
2ème saison	0.08	0.00	0.10	0.09	0.01	0.00	0.02	0.05	0.02	0.46	0.48	0.25	0.19

Pz	16a5	16b5	16c5	16d1	16d5	16e1	16e5	16f1	16f5	16g1	16g5
Dist. lac-pz	273	232	178	105		70		39		3	
Total	####	####	0.15	0.12	0.14	0.11	0.06	0.05	0.10	0.92	0.95
1ère saison	####	####	0.53	0.46	0.53	0.59	0.55	0.50	0.57	0.98	0.99
Hiver	####	0.05	0.06	0.23	0.09	0.18	0.35	0.31	0.08	0.72	0.76
2ème saison	####	0.05	0.06	0.03	0.01	0.07	0.07	0.07	0.00	####	0.96

Tableau 5.1 Coefficients de corrélation lac - piézomètres (suite)

Pz	19a1	19a5	19b1	19b5	19c1	19c5	19d1	19d5	19e1	19e5	19f1	19f5	19g1	19g5	19h1	19i1	19j1	19k1	19l1	19m1	19n1
Dist. lac-pz	685		664		599		546		473		407		379		336	305	282	183	46	16	1
Total	0.15	0.03	0.16	0.11	0.12	0.10	0.14	0.10	0.12	0.02	0.05	0.12	0.00	0.01	0.63	0.71	0.72	0.42	####	####	####
1ère saison	0.49	0.38	0.26	0.25	0.52	0.52	0.53	0.48	0.51	0.58	0.52	0.27	0.37	0.35	0.78	0.83	0.84	0.85	0.84	0.80	0.91
Hiver	0.09	0.14	0.04	0.06	0.21	0.12	0.01	0.02	0.00	0.28	0.22	0.21	0.26	0.07	0.75	0.77	0.85	0.08	####	####	####
2ème saison	0.19	0.25	0.03	0.03	0.01	0.05	0.01	0.01	0.03	0.05	0.01	0.03	0.45	0.35	0.82	0.84	0.82	0.81	0.85	0.87	0.92

Pz	21a1	21b1	21c2	21c5	21d1	21e1	21f1	21g1	21h1	21i1	21j1
Dist. lac-pz	590	510	449		393	341	274	201	134	59	4
Total	0.08	0.04	0.30	0.18	0.33	0.75	0.79	0.75	0.77	0.77	0.67
1ère saison	0.50	0.50	0.66	0.55	0.66	0.91	0.92	0.90	0.90	0.90	0.84
Hiver	0.21	0.35	0.18	0.27	0.41	0.78	0.73	0.81	0.75	0.77	0.40
2ème saison	0.08	0.04	0.14	0.02	0.83	0.86	0.85	0.81	0.86	0.85	0.92

Pz	23a1	23a5	23b1	23b5	23c1	23c5	23d1	23d5	23e1	23e5	23f1	23f5
Dist. lac-pz	331		287		269		145		58		29	
Total	0.29	0.17	0.16	0.16	0.09	0.11	0.09	0.13	0.12	0.14	0.25	0.08
1ère saison	0.30	0.11	0.10	0.07	0.30	0.25	0.33	0.36	0.38	0.21	0.58	0.19
Hiver	0.15	0.43	0.68	0.67	0.81	0.81	0.76	0.76	0.59	0.59	0.66	0.67
2ème saison	0.18	0.01	0.03	0.14	0.11	0.11	0.05	0.05	0.13	0.11	0.31	0.23

Pz	25a5	25b5	25c1	25c5	25d2	25d5	25e1	25e5	25f1	25f5	25g1
Dist. lac-pz	249	211	152		100		82		63		38
Total	####	####	0.02	0.04	0.03	0.20	0.31	0.42	0.64	0.72	0.89
1ère saison	####	####	0.50	0.51	0.52	0.50	0.64	0.52	0.49	0.53	0.76
Hiver	####	####	0.24	0.30	0.22	0.26	0.36	0.75	0.63	0.79	0.77
2ème saison	0.00	0.00	0.06	0.10	0.05	0.01	0.41	0.29	0.84	0.84	0.97

Tableau 5.1 Coefficients de corrélation lac - piézomètres (suite)

Pz	27a5	27b5	27c1	27c5	27d1	27d5	27e1	27e5	27f1	27f5	27g1	27g5	27h1	27h5	27i1	27i5	27j1	27j5
Dist. lac-pz	493	423	406		387		355		212		107		81		65		17	
Total	####	####	0.19	0.02	0.11	0.14	0.07	0.06	0.05	0.13	0.45	0.38	0.59	0.54	0.70	0.67	0.98	0.95
1ère saison	####	####	0.52	0.53	0.23	0.17	0.23	0.25	0.05	0.00	0.40	0.27	0.51	0.39	0.60	0.50	0.97	0.93
Hiver	####	####	0.19	0.03	0.70	0.70	0.88	0.88	0.71	0.50	0.79	0.64	0.85	0.80	0.87	0.79	0.90	0.84
2ème saison	0.03	0.36	0.17	0.12	0.15	0.11	0.24	0.24	0.13	0.06	0.48	0.67	0.61	0.40	0.67	0.81	0.97	0.97

Pz	29a1	29a5	29b1	29b5	29c1	29c5	29d1	29d5	29e1	29e5	29f1	29f5	29g1	29g5	29h1	29h5	29i1	29i5	29j1	29j5
Dist. lac-pz	272		206		159		144		105		65		44		23		9		0	
Total	0.23	0.09	0.02	0.08	0.05	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.06	0.03	0.18	0.29	0.37	0.33	0.64	0.56	0.88	0.74
1ère saison	0.48	0.36	0.40	0.40	0.42	0.37	0.46	0.37	0.50	0.46	0.41	0.36	0.44	0.44	0.61	0.55	0.70	0.77	0.94	0.89
Hiver	0.80	0.72	0.70	0.64	0.84	0.49	0.23	0.50	0.68	0.64	0.68	0.68	0.84	0.84	0.69	0.63	0.61	0.64	0.80	0.60
2ème saison	0.16	0.08	0.12	0.05	0.08	0.08	0.19	0.08	0.20	0.25	0.14	0.14	0.38	0.43	0.50	0.56	0.81	0.72	0.96	0.97

Pz	30a1	30a5	30b1	30b5	30c1	30c5	30d1	30d5	30e1	30e5	30f1	30f5	30g1	30g5	30h1	30h5	30i1	30i5	30j1	30j5	30k1	30k5
Dist. lac-pz	853		809		650		513		470		401		308		235		165		103		-14	
Total	0.10	0.10	0.07	0.07	0.04	0.06	0.08	0.03	0.01	0.06	0.06	0.07	0.13	0.04	0.35	0.32	0.40	0.35	0.72	0.45	0.98	0.96
1ère saison	0.53	0.44	0.53	0.58	0.55	0.45	0.37	0.31	0.42	0.31	0.51	0.22	0.27	0.29	0.56	0.54	0.59	0.58	0.89	0.61	0.98	0.98
Hiver	0.48	0.58	0.59	0.60	0.60	0.58	0.08	0.77	0.05	0.01	0.45	0.39	0.88	0.45	0.90	0.92	0.74	0.74	0.71	0.71	0.91	0.77
2ème saison	0.23	0.19	0.34	0.22	0.27	0.26	0.23	0.14	0.59	0.14	0.28	0.25	0.26	0.19	0.63	0.63	0.75	0.75	0.77	0.77	0.94	0.94

Légende

Dist. lac-pz:	distance séparant le piézomètre du lac (niveau 429,40) [m]
Total:	coefficient de corrélation calculé sur toute la période de mesure (63 semaines)
1ère saison:	coefficient de corrélation calculé sur la période du 17.4. 1991 au 30.10. 1991
Hiver:	coefficient de corrélation calculé sur la période du 6.11. 1991 au 4. 3. 1992
2ème saison:	coefficient de corrélation calculé sur la période du 11.3. 1992 au 24. 6. 1992
Pz 27g1:	piézomètre transect 27, site g (7), type 1 (Ø 2,5 cm, crépinage limité)
Pz 27g5:	piézomètre transect 27, site g (7), type 5 (Ø 5 cm, crépinage intégral)
	valeur pour laquelle r n'est pas significativement distinct de 0 au seuil P=0.05
####	trop de valeurs manquantes pour calculer le coefficient de corrélation

6 SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS ET CONCLUSIONS

6.1 Typologie globale végétation - nappe - sol

Les typologies partielles à l'aide de procédures de groupement ont déjà fait l'objet d'une description détaillée, tant en ce qui concerne la méthode que les résultats obtenus, respectivement pour la végétation, les nappes et les sols (cf. chap. 3.3, 4.3, 5.3). Il s'agit maintenant d'aborder la phase de synthèse de l'opération typologique, à savoir l'intégration des groupements partiels en une **typologie fonctionnelle globale**. Cette dernière constitue en effet l'**outil déterminant pour la construction de la courbe optimale de régulation des niveaux du lac** (choix des sites, évaluation des centres de gravité et des unités marginales à comportement écologique critique, calculs des moyennes à appliquer).
Le fait que seuls trois facteurs entrent en considération permet de traiter le problème dans un espace tridimensionnel (exprimé dans le tableau 6.1) sans avoir nécessairement recours à l'analyse multivariée. Cette méthode implique une hiérarchisation des critères d'entrée dans le tableau, où les types obtenus résultent d'une combinaison appropriée, par ordre d'importance décroissante, de la végétation d'abord, des nappes et des sols ensuite.
Au niveau des unités individuelles, nous avons éliminé du tableau final un certain nombre de sites ± aberrants (4d, 9b, 30a), le transect 10 (topographie surélevée), le transect 25 (données peu fiables). Les caractéristiques des groupes sont mentionnées sur le tableau 6.1 et sur les tableaux plus détaillés des typologies partielles (annexe 8), ainsi que sur les figures 6.1a+b qui illustrent l'évolution des niveaux moyens bimensuels des types fonctionnels. Ces groupes appellent les brefs commentaires suivants:

- **groupe 1: grands roseaux**
  Le centre de gravité correspond à une nappe de type 7, la plus humide des marais (inondation moyenne de 7 cm), et à un sol de type 2, gley réduit à anmoor tourbeux. Les nappes de type 6 sont plus sèches, et celle de type 1, sur gley réduit à mull carbonaté, trahit surtout la forte amplitude du roseau;

- **groupe 2: roseaux et laiches élevées en tourradons, eau libre permanente**
  L'ensemble est homogène sur le plan des nappes (type 7) et sur celui des sols qui sont tous des gleys réduits à anmoor, tourbeux pour une moitié d'entre eux (type 2.2);

- **groupe 3: roseaux, laiches élevées en tourradons et semis d'arbustes, eau libre temporaire**
  Comme pour le groupe 1, les nappes se partagent entre le type 6 modérément inondé et le type 7 inondé pratiquement en permanence. Au niveau des sols, la diminution d'humidité est marquée par le groupe des gleys oxydés à hydromull (type 3.4);

- **groupe 4: groupements à marisque**
  L'ensemble, plus hétérogène aussi bien pour les nappes (niveau moyen à 12 cm) que pour les sols, représente une situation intermédiaire entre l'humidité prononcée des 3 premiers groupes (nappe moyenne à moins de 4 cm) et l'aile sèche des marais représentée par le groupe 5 (nappe moyenne à 15 cm);

- **groupe 5: groupements à choin et à molinie**
  Même hétérogénéité que l'ensemble précédent, mais un cran plus sec (nappe moyenne à 15 cm et inondations ne dépassant pas 9 %, excepté pour les unités à marisque).

Le tableau 6.1 contient encore à titre indicatif les groupements forestiers, bien que ces derniers n'entrent plus en considération pour notre propos (milieux très rarement inondés, et en tous les cas jamais par l'intermédiaire d'une liaison au lac). Leur typologie résulte d'une interprétation de 41 relevés traités statistiquement (cf. chap. 3.4.3) et des informations apportées par les cartes typologiques (GALLANDAT et al. 1993) pour les sites n'ayant pas fait l'objet d'un relevé.

En résumé, pour ce qui est des marais, l'ensemble présente une **image cohérente principalement déterminée par la bonne correspondance entre type de sol et niveau de nappe**, particulièrement en conditions très humides où dominent quelques **centres de gravité** bien représentés. L'assèchement en revanche augmente la diversité des combinaisons typologiques.

6.2 Mise en évidence de zones à décalages fonctionnels

La bonne cohérence générale entre nappe et sol n'exclut pas la présence de **zones à décalage fonctionnel**, c'est-à-dire principalement de **milieux dont le régime hydrique actuel s'écarte sensiblement de la moyenne du type de référence, voire n'est plus en concordance avec la nature du sol**. Pour les marais du tableau 6.1, ces situations écologiques critiques sont donc à rechercher parmi les sites qui n'ont pas été retenus pour la détermination des valeurs moyennes de chaque type fonctionnel (indiquées par les valeurs en caractères gras sur le tab. 6.1, cf. chap. 6.3).

Une première possibilité se présente avec les roselières de dune (410, 1607, 2710, 2910), cas particuliers pour lesquels un décalage est ici peu probable. En effet la proximité du lac assure à travers les sédiments une alimentation en eau permanente et facilement accessible aux longs rhizomes du roseau, si bien que l'absence ou le peu d'inondations en surface ne devrait pas signifier pour autant une situation critique.
Un deuxième groupe concerné est celui des nappes de type 6 au sein du groupe global 3 des roseaux, laiches élevées en tourradons et semis d'arbustes, à eau libre temporaire. Comme nous l'avons déjà évoqué (cf. chap. 5.3.4), nous retrouvons ici des bas-marais modérément inondés, alors qu'à leur statut phytosociologique (roselière 504 et groupement à marisque 2903 exceptés) devrait normalement correspondre une nappe de type 7. La situation pourrait être particulièrement critique pour tous les sites à faible taux d'inondation (1308, 2907, 2909, 2904), mais également pour les sols de type 2 (gleys réduits à anmoor tourbeux: 1206, 1207, 1208, 3008) situés à 429,43-44 m, limite supérieure de l'altitude de battement du lac. Nous voyons en effet que pour maintenir un humus tourbeux, voire la formation de tourbe, les exigences moyennes en inondations atteignent plus de 70 % (cf. annexe 8). Compte tenu de la liaison potentielle que ces sites entretiennent avec le lac, le niveau de ce dernier ne devrait par conséquent pas descendre au-dessous de la moyenne 1980 - 1992, moyenne au demeurant garantie dans le cadre des propositions de régulation optimale exprimées sur la figure 6.3.
Signalons pour terminer, dans le groupe 5 des marais à choin et prairies à molinie, l'existence d'un gley réduit à anmoor tourbeux sous la prairie à molinie 913. La nappe moyenne, à environ 23 cm, implique ici un assèchement par rapport aux conditions qui ont permis la formation de tourbe.

Cette détection de zones à décalages fonctionnels reste délicate, en raison notamment de choix méthodologiques inhérents aux limites du projet (investigation pédologique de terrain seulement, donc sommaire, pas d'analyse phytosociologique synusiale intégrée, mieux à même de modéliser la dynamique des groupements végétaux, hydrodynamique basée sur une année seulement). Elle fournit pourtant quelques pistes et surtout, au-delà des cas particuliers considérés, l'**indication que le problème existe bel et bien**. De ce fait, et bien que la poursuite de cette analyse nécessiterait à l'évidence un autre projet, une partie de la réponse à apporter passe d'ores et déjà par la prise en

compte d'exigences maximales au niveau des contraintes qui vont déterminer la régulation (cf. chap. 6.3).

6.3 Courbe optimale de régulation des eaux du lac

En élaborant une typologie synthétique intégrant les groupements de végétation, de nappes et de sols (cf. chap. 6.1), nous avons déterminé des **types fonctionnels de référence**. La comparaison des caractéristiques hydrodynamiques de ces derniers avec les valeurs effectivement observées sur les transects permet dès lors de **fixer pour chaque site, par période, le nombre moyen de jours d'inondation souhaité**, et en conséquence **le niveau du lac à atteindre pour satisfaire ces exigences**. En principe donc, chaque site réellement concerné est ramené aux conditions moyennes (nombre de jours inondés) du type auquel il appartient en agissant sur le niveau du lac.
La sélection et le calcul des valeurs moyennes des types fonctionnels s'opère selon les critères et principes généraux suivants:

1) En raison des relations observées entre l'importance des inondations, les altitudes et les fluctuations du niveau du lac, **seuls les groupements de marais proprement dits interviennent réellement dans la problématique de la régulation** (cf. notamment chap. 2.2);

2) Le long de gradients lac-falaise, la zonation diversifiée atteste du fait que **les caractéristiques des nappes actuelles, qui reflètent un gradient hydrique important** et qui correspondent pour l'essentiel à celles mentionnées dans la littérature (p. ex. NIEMANN 1963, KLOETZLI 1969, YERLY 1970, BUTTLER 1987), **conviennent de manière générale aux besoins des groupements rencontrés**, et que par conséquent elles doivent être maintenues. Ceci n'exclut pas la présence de zones à décalages fonctionnels, c'est-à-dire principalement de milieux dont le régime hydrique actuel s'écarte sensiblement de la moyenne du type de référence, ou encore n'est plus en concordance avec le type de sol (cf. chap. 6.2). Dans la mesure où les effets des décalages liés à l'assèchement doivent être enrayés, il y a lieu de **maintenir une inondation maximale conforme au type de référence**;

3) L'impérieuse nécessité de conserver de manière durable les bas-marais au moins en l'état (biodiversité), voire d'en favoriser localement l'expansion, la nécessité qui en découle de maîtriser l'embroussaillement, exigent également une **inondation maximale mais différenciée selon les groupements** (cf. également chap. 1.4.2):

   - **roselières, bas-marais à grandes laîches, groupement à marisque**: milieux à cycles biogéochimiques ouverts, à tendance eutrophe, dont **la fraction des inondations liées au lac doit être maximale**. Le groupement à marisque, indifférent par rapport à la qualité de l'eau, constitue un cas particulier en raison de la large amplitude écologique et du fort pouvoir compétitif de *Cladium mariscus*. Le problème est ici de maîtriser le comportement invasif de cette espèce en maintenant au maximum les conditions eutrophes favorisées par les eaux lacustres, car dans ce cas le roseau et la laiche élevée exploitent mieux les ressources du milieu. Ainsi, en dépit d'une altitude moyenne relativement élevée, qui ne pourra pas être atteinte dans tous les cas par le niveau du lac, le groupement à marisque est à inclure dans cette catégorie de bas-marais à inonder autant que possible par le lac;

- **bas-marais à petites laiches, à choin, prairies à molinie**: milieux à cycles nutritifs conservateurs, oligo-mésotrophes, dont **la fraction des inondations liées au lac doit être minimale**. A l'inverse de ceux de la catégorie précédente, les groupements considérés ici interviennent de manière négative pour le calcul de la courbe optimale, dans le sens où ils **représentent une limite à l'élévation du niveau du lac**. De fait, en raison de leur altitude moyenne élevée, ils n'entrent pratiquement plus en considération si ce n'est pour l'évaluation du degré de satisfaction en cas d'écart positif important découlant d'une autre régulation (cf. 6.4.1).

Il est à noter que la prise en compte des contraintes qui viennent d'être évoquées conduit nécessairement à ne retenir qu'une **version maximaliste de la courbe de régulation optimale**, version dont le calcul est **basé sur les 4 premiers types fonctionnels** du tableau 6.1 seulement;

4) Le choix des sites à considérer pour calculer les **valeurs moyennes de chaque type fonctionnel** (centres de gravité), obéit quant à lui à 2 critères:

- la première sélection s'effectue sur la base des inondations totales: les valeurs extrêmes, du moins les plus faibles, doivent être ramenées au type moyen; elles ne peuvent donc pas être intégrées dans le calcul du type;

- la deuxième sélection s'opère en fonction des liens effectifs au lac: les sites peu ou pas soumis aux inondations directes (malgré une inondation totale importante) ne sont pas retenus (selon les cas, l'altitude, inconnue, de la dune à franchir peut devenir irréaliste...).

Si le choix des limites entraîné par l'application de ces 2 critères peut parfois apparaître quelque peu subjectif, les conséquences qui en découlent doivent être relativisées. En effet l'influence sur la courbe finale de quelques sites utilisés ou non pour le calcul des inondations moyennes des types fonctionnels reste modeste, notamment en raison des nombreuses pondérations effectuées (voir ci-après). Les sites finalement conservés pour la détermination des types figurent en caractères gras dans le tableau 6.1.

Les modalités et résultats de l'ensemble des calculs sont présentés sur la figure 6.2 et les tableaux 6.2a+b. Pour chaque site, le nombre total de jours d'inondations tributaires du lac est calculé par différence à la moyenne du type auquel le groupement appartient. Il en résulte un nombre de jours pendant lesquels le lac doit atteindre au minimum l'altitude de la station afin de satisfaire cette exigence moyenne. Ce nombre de jours est calculé en sommant les colonnes « diff » et « liés » pour le site considéré (fig. 6.2). Lorsque le résultat est égal à zéro, et a fortiori lorsqu'il est négatif, la contrainte sur le lac est nulle. La lecture du nombre de jours d'inondation directe pour une altitude donnée s'effectue donc successivement sur toutes les stations du transect ordonnées par altitude décroissante, et par distances au lac décroissantes en cas de même altitude (cf. l'exemple de la fig. 6.2). Lorsque le nombre de jours devient ≤ 0, et tant qu'il reste ≤ 0, c'est la station immédiatement inférieure qui entre en ligne de compte, et ainsi de suite jusqu'au lac.
Par période de 15 jours, la valeur finale de la courbe optimale est obtenue en effectuant la moyenne des altitudes ainsi établies sur chaque transect, **moyenne pondérée** par 2 facteurs (voir tab. 6.2):

- le nombre de jours (colonne « totliés ») pendant lesquels le niveau du lac doit atteindre la valeur exigée sur le transect considéré;
- la longueur de marais effectivement inondée à chaque niveau. Cette longueur est déterminée graphiquement sur les plans au 1:50/1:250.

La courbe optimale de régulation des eaux du lac obtenue au terme de cette procédure est illustrée sur la figure 6.3. En l'absence de références bibliographiques récentes relatives à l'influence des inondations durant la période hivernale, nous avons **limité la contrainte à la période de végétation**, les valeurs de la courbe optimale pour le solde de l'année correspondant simplement au lac moyen tel qu'il a été observé depuis l'entrée en vigueur du règlement de régulation de 1982. Pour fixer les bornes de la période de végétation, nous avons tenu compte de nos propres observations ainsi que des indications fournies par quelques auteurs (KLÖTZLI 1969, qui cite également NIEMANN 1963, BUTTLER 1987), et également des cartes phénologiques de l'Atlas de la Suisse du Service topographique fédéral (IMHOF 1965/68) La période retenue va ainsi du 1er avril au 15 octobre.
Sur la figure 6.3, nous avons également reporté les courbes de variation du niveau du lac pour l'année de mesure, celles du lac moyen 1980 - 1992 ainsi que, pour information, celles préconisées par le rapport pour l'agriculture (JATON 1989) et par le Groupe d'étude et de gestion (GEG 1987). Comparativement, la courbe optimale de régulation des eaux du lac en fonction des besoins de la végétation (sur la figure 6.3: courbes RSLN et RSLN opt) montre une allure relativement régulière dont les fluctuations, durant la période de végétation, demeurent de faible amplitude (429,45 m à 429,53 m). Si l'on tient compte du fait que ces fluctuations résultent d'observations qui portent sur une saison, saison au demeurant peu différente de la norme en ce qui concerne la pluviosité (-23 mm par rapport à la moyenne 1967-1991) et le niveau du lac (-6 cm par rapport à la moyenne 1980-1992), il faut davantage considérer l'ordre de grandeur du résultat global que les valeurs précises calculées par périodes de 15 jours. Autrement dit, **il importe de maintenir durant toute la période de végétation un niveau du lac au moins égal à 429,50 m, niveau permettant de garantir, lors d'une année "standard", les inondations moyennes requises pour les groupements du *Phragmition* et du *Magnocaricion*.**

Nous avons également testé les conditions les plus défavorables, manifestement irréalistes, susceptibles d'être engendrées par une absence de pluie prolongée couvrant toute la période de végétation. Ce scénario revient à introduire dans le tableau 6.2, pour l'ensemble des intervalles de temps, une contrainte maximale de 15 jours d'inondation directe dépendant du lac, et ce pour les sites les plus élevés sur chaque transect. La valeur ainsi calculée, naturellement uniforme pour toute la période de végétation, est de **429,56 m, valeur représentant la contrainte maximale susceptible de peser sur le niveau du lac en cas d'année extrêmement sèche** (sur la figure 6.3: courbe MAX abs). Au contraire, en réduisant à 1 seul jour et aux sites les plus bas de chaque transect l'influence nécessaire du lac, et en annulant de surcroît totalement l'influence des stations les plus élevées restantes (transects 5, 23 et 29), on obtient une **contrainte minimale de 429,40 m** (sur la figure 6.3: courbe MIN abs). Déterminée à partir de conditions fictives là aussi fonctionnellement irréalistes, cette limite donne toutefois une indication quant au niveau minimal en deçà duquel il n'est plus possible, de manière générale, de parler d'influence directe du lac sur le marais.
En définitive, cette simulation de valeurs extrêmes, pour irréaliste qu'elle soit, permet d'évaluer l'amplitude de l'influence potentielle du lac sur le marais, du moins en termes d'inondations directes, et à l'intérieur de cette plage, de constater l'importance relativement limitée du paramètre pluviométrie.

6.4 Evolution potentielle des milieux naturels

6.4.1 Conséquences possibles d'une autre régulation

Par rapport aux objectifs fixés par la protection de la nature, les aspects négatifs de l'évolution des milieux naturels de la rive sud du lac de Neuchâtel sont bien connus, du

moins sur le plan qualitatif (cf. chap. 1.3.7). Toute autre est la difficulté d'anticiper ce changement au plan quantitatif, autrement dit d'évaluer la vitesse des diverses transformations qui, comme l'atterrissement et l'embroussaillement consécutifs à l'eutrophisation des eaux et à une stabilisation excessive des niveaux du lac, mettent en danger l'équilibre actuel des milieux palustres. Une telle évaluation nécessite en effet une stratégie d'observation à long terme, tâche partiellement entreprise par le Groupe d'étude et de gestion des rives du lac de Neuchâtel (GEG). En ce sens, la problématique des conséquences possibles d'une régulation non optimale des niveaux du lac sur la végétation et le milieu (cf. chap. 1.4.1) est certes pertinente, mais elle ne peut pas être résolue en des termes aussi ambitieux dans le cadre d'une étude à durée très limitée. En revanche, les techniques d'investigation mises en place nous permettent d'esquisser une réponse qui concerne la **satisfaction des besoins en inondation du marais en fonction des niveaux du lac**. Si cette réponse est de nature plus modeste, elle représente cependant une indication indispensable pour aborder la problématique générale évoquée, en raison bien sûr de l'importance déterminante du facteur eau en marais.
Ainsi, et pour répondre également à la demande du coordinateur de l'ensemble des études liées au règlement de régulation de la 2ème CEJ (Dr. A. Kühne, EPFZ), nous avons procédé à une **évaluation chiffrée de l'impact du niveau du lac par rapport aux besoins hydriques présumés de l'ensemble des groupements végétaux non boisés**. A cet effet, les données piézométriques utilisées pour déterminer l'allure de la courbe optimale de régulation (cf. chap. 6.3), en particulier le nombre total de jours d'inondation à lier au lac (cf. fig. 6.2) ont servi de base au calcul d'un indice de satisfaction de ces besoins compris entre 0 et 1. A défaut de détailler toutes les étapes de ce calcul, il importe de mentionner les lignes directrices qui le sous-tendent:

- pour chaque piézomètre, il s'agit de satisfaire un nombre de jours total à lier au lac correspondant à celui du type global auquel le site appartient. Lorsque le lac n'atteint pas l'altitude du site, le % de satisfaction correspond à l'apport de la seule pluviosité, d'où une valeur moyenne toujours supérieure à zéro;

- les tronçons dépourvus de piézomètre sont également pris en considération, mais sans la contrainte du nombre de jours liés dépendant d'un type global;

- le % de satisfaction est pondéré par la longueur du groupement effectivement atteinte pour une altitude de lac donnée;

- la moyenne finale, pondérée par la longueur des unités, est positive pour les groupements qui doivent être inondés par le lac (*Phragmition*, *Magnocaricion*), mais comptée comme négative pour les groupements qui ne doivent pas être atteints par le lac (Caricion davallianae et Molinion).

- le total final est obtenu par sommation des valeurs positives et négatives, sans ou avec pondération par les longueurs (respectivement indications "moyenne nette" et "moyenne pondérée" sur la figure 6.4, colonnes "net" et "pond" dans le tableau 6.3). Compte tenu de la nécessité de préserver l'ensemble des groupements, et en particulier les moins bien représentés, la version sans pondération est considérée comme prioritaire.

Les résultats détaillés sont présentés, par période, sur le tableau 6.3. Les valeurs moyennes calculée sur la base de la seule période de végétation sont résumées dans la figure 6.4, où les indices de satisfaction 0.1, 0.2, 0.35, 0.5, 0.65, 0.78 (valeur maximale) illustrent quelques paliers importants pour l'altitude du lac. L'examen de cette figure suggère les quelques remarques suivantes:

- **l'indice de satisfaction maximal est obtenu pour une altitude du lac de 429,50**, qui confirme parfaitement la recommandation contenue dans la

courbe optimale (fig. 6.3). Les deux modes de calcul diffèrent pourtant par la prise en compte, pour le calcul de l'indice, de la longueur précisément inondée et des tronçons dépourvus de piézomètres;

- indépendamment de tout lien au lac, **le seul effet des pluies** (année légèrement inférieure à la moyenne) **se traduit par une satisfaction d'au moins 0,3 (30%) si l'on tient compte uniquement de la période de végétation**, de 0,42 (42%) si l'on considère l'année entière. Cette différence ne traduit rien d'autre qu'une baisse de la pluviosité en période de végétation;

- **au-delà de 429,50 m, la chute de l'indice est sévère jusqu'à 429,90 m** (20 % de satisfaction). Elle signifie que la majorité des groupements à ne pas inonder par le lac (*Caricion davallianae* et *Molinion*) se situent précisément entre ces deux bornes altitudinales.

En définitive, quantifier la satisfaction des besoins en inondation représente une première étape, nécessaire mais non suffisante, destinée à évaluer les effets de la régulation du niveau du lac sur l'évolution des bas-marais. **L'allure très resserrée de la courbe en partie centrale montre que l'on dispose de peu de marge de régulation pour satisfaire une fraction élevée de besoins: à titre d'exemple, maintenir cette part au-dessus de 50 %, limite plutôt modeste, exige le maintien d'un niveau du lac à 429,50 m ± 20 cm.** Par ailleurs l'interprétation d'un tel indice oblige à considérer la réalité écologique qu'il peut recouvrir. Ainsi par exemple, de part et d'autre de la valeur maximale, la chute du % de satisfaction ne revêt certainement pas la même importance. En effet l'inondation du *Caricion davallianae* et du *Molinion* par les eaux du lac, du moins si elle est occasionnelle, représente un inconvénient a priori mineur. On pourrait même souhaiter qu'elle soit effective de temps à autre, par exemple une année sur cinq lors des crues printanières, pour engendrer une « perturbation » temporaire. En revanche, du côté de l'assèchement, les risques de favoriser l'embroussaillement sont davantage à craindre. Dans ce sens, **les effets d'une dérogation à un seuil d'indice de satisfaction fixé restent naturellement dépendants de la durée, voire du rythme de telles adaptations.**

6.4.2 Cycles biogéochimiques, embroussaillement

Les propositions de régulation des eaux du lac présentées dans cette étude constituent une base nécessaire pour assurer le maintien des principaux milieux se développant actuellement sur la rive sud du lac de Neuchâtel. Elles ont pour but de maîtriser les processus écologiques déterminants et d'assurer ainsi, à terme, les exigences hydrodynamiques et hydrochimiques des différents groupements végétaux.

WHEELER & SHAW (1995) ont montré que le déterminisme de la végétation palustre relève principalement de trois gradients écologiques, pour l'essentiel indépendants, mais qui peuvent se combiner: la **richesse en bases**, la **fertilité** et le **niveau d'eau**.
De façon générale, à l'échelle européenne, la conservation et la restauration des marais riches en bases, comme ceux représentés sur la rive sud du lac de Neuchâtel, sont jugées prioritaires en raison de la grande richesse floristique de ces milieux. En revanche, le degré de fertilité, principalement exprimé par les teneurs du sol ou de la nappe (disponibilité potentielle!) en azote, en phosphore et en potassium, devrait être maintenu bas afin d'éviter la perte de cette biodiversité, suite à l'eutrophisation. Le facteur niveau d'eau est de la plus grande importance également puisqu'il agit à la fois sur l'environnement physique (aération et structure des sols, transports de litière et de matière organique), sur l'environnement chimique (minéralisation de la matière organique, mobilisation ou insolubilisation d'éléments, transports des éléments nutritifs) et sur l'environnement biologique (activité microbienne, sensibilité physiologique, compétition).

Il ressort de nos travaux que, parmi les aspects à considérer pour la conservation des milieux riverains, les relations entre le gradient de végétation et le régime d'inondation sont prioritaires. Ces inondations peuvent résulter soit d'un **excès de pluviosité** par rapport à la capacité naturelle de drainage des sols, soit d'une **submersion** de ces derniers par l'eau du lac, voire par les ruissellements de pied de falaise, soit **d'un effet combiné.**
Le régime hydrique constitue ainsi un facteur physique important et déterminant pour la qualité chimique de l'eau des nappes (KADLEC & KADLEC 1978, BUTTLER 1992), et par conséquent pour la végétation et les sols (BUTTLER & GALLANDAT 1989, BUTTLER & GOBAT 1991).

Cependant, les données bibliographiques sur les exigences et les tolérances écologiques des espèces ou des groupements végétaux sont encore très lacunaires et il est souvent difficile de prévoir l'évolution des milieux en fonction d'une modification du régime hydrique. WALKER (1970) in: GROOTJANS & VAN DIGGELEN (1995) a montré que des prédictions précises quant à la succession d'un marais particulier ne sont que difficilement faisables en raison des nombreuses voies évolutives selon le régime hydrologique local. A cet égard, une piste intéressante est offerte par les modèles de simulations probabilistes basés sur la combinaison de groupements écologiques selon différents critères (p. ex. le modèle de Bayes du programme MULVA-5, essais effectués par O. Wildi, Birmensdorf).
Selon WHEELER & SHAW (1995), les aspects suivants devraient être mieux connus pour comprendre l'adéquation végétation-régime hydrique:

- nature de la tolérance des espèces aux conditions hydriques;
- amplitude de cette tolérance;
- importance des interactions entre espèces pour la tolérance à un régime hydrique spécifique;
- importance des périodes hydrologiques pour la survie des espèces;
- importance des fluctuations du niveau d'eau par rapport au niveau moyen de la nappe;
- rôle des événements hydriques anciens (passé hydrologique);
- prépondérance d'autres facteurs écologiques, ou interférence de ceux-ci avec l'effet du régime hydrique.

Il n'en demeure pas moins que, dans le cas des marais de la rive sud du lac de Neuchâtel, le gradient écologique le long de l'hydrosère sépare deux milieux bien distincts, avec des **cycles biogéochimiques très contrastés** (BUTTLER 1987): 1) les groupements végétaux des roselières et des prairies à grandes laiches (*Phragmition* et *Magnocaricion*) et 2) les groupements végétaux des prairies à petites laiches (*Caricion davallianae* et *Molinion*). Séparant respectivement les **séries évolutives infra-aquatique et supra-aquatique** de la succession autogène de la végétation, cette limite fonctionnelle est à la base du calcul de la courbe optimale de régulation des eaux du lac, ainsi que du calcul de l'indice de satisfaction.
Globalement, dans le premier cas, les inondations par le lac sont fréquentes, les **flux d'éléments nutritifs importants**, de même que la demande nutritive de la végétation, particulièrement en azote, en phosphore et en potassium (accumulation de matière organique, cycle ouvert avec beaucoup de pertes, turn over important). Dans le second cas, les milieux sont plus secs, en principe pas inondés par le lac, et présentent des **flux réduits d'éléments biogènes**, ainsi qu'une plus grande autonomie par rapport à l'offre de ces éléments nutritifs dans le sol ou les nappes (cycle interne plus efficace et conservateur).

Ces considérations sont de première importance pour la gestion de ces milieux, comme l'ont montré d'autres travaux (WASSEN et al. 1990, PINAY, ROQUES & FABRE

1993). Le problème posé est celui **des exigences nutritives** des différents groupements végétaux, ainsi que celui de l'eutrophisation. A cet égard, KOERSELMAN & VERHOEVEN (1995) distinguent deux mécanismes d'eutrophisation:

1) l'**eutrophisation exogène**, sous l'effet d'apports extérieurs d'éléments nutritifs, par exemple par le lac ou par la pollution atmosphérique;
2) l' **eutrophisation endogène**, sous l'effet d'apports intérieurs de nutriments, par augmentation de la minéralisation ou la mobilisation d'éléments, suite par exemple à l'atterrissement et au changement d'hydromorphie.

Comme l'ont montré ces auteurs, la source nutritive interne, particulièrement en ce qui concerne l'azote et le phosphore, est quantitativement plus importante. Taux de minéralisation microbienne et mobilisation chimique de ces éléments dépendent du pool de matière organique dans le sol, ainsi que des conditions environnementales (température, teneur en eau ou niveau de nappe, pH, teneur en Ca et en sulfates).

Les groupements végétaux du *Caricion davallianae* et du *Molinion*, qui sont aussi les plus riches en espèces en raison de leur statut **oligo-mésotrophe** (milieu riche en bases, mais pauvre en azote et particulièrement en phosphore), doivent être **préservés de l'eutrophisation exogène par les eaux du lac**, trop riches en éléments nutritifs. En revanche, une nappe élevée d'origine phréatique (riche en calcium) leur convient parfaitement. Elle permet en outre de **prévenir l'eutrophisation endogène** du milieu, qui pourrait faire suite au développement des buissons et à la maturation des sols.
En ce qui concerne le fauchage, il contribue à renforcer le caractère mésotrophe de ces sols (exportation de litière) et permet encore davantage de limiter les teneurs en phosphore (EGLOFF 1986, KOERSELMAN & VERHOEVEN 1995). En revanche, son action reste très limitée par rapport à l'azote étant donné l'importance des retombées atmosphériques.
Les groupements végétaux du *Phragmition* et du *Magnocaricion*, **mieux adaptés à un apport important d'éléments nutritifs par les eaux du lac**, doivent être **préservés de l'eutrophisation endogène** qui pourrait intervenir en cas d'assèchement trop fréquent du sol (minéralisation de la matière organique accumulée en milieu hydromorphe et forte libération de nitrates). Un niveau de nappe élevé durant la période de végétation permet au contraire de **favoriser la dénitrification**, empêchant ainsi le développement d'une végétation nitrophile (p. ex. la pseudoroselière). Cependant, selon les conditions hydrodynamiques on risque aussi de libérer davantage de phosphore. Ceci montre l'importance qu'il faut accorder à la question, certes délicate, du **facteur limitant** (azote ou phosphore?) lors de la gestion des marais (KOERSELMAN & VERHOEVEN 1995).
Le rajeunissement des sols par décapage semble être une mesure mieux appropriée que le fauchage pour réduire le pool d'azote et le risque d'eutrophisation endogène, mais comporte l'inconvénient de la destruction de la végétation et de ses diaspores.

Les propositions formulées dans ce rapport peuvent ainsi être considérées comme des directives générales valables pour les principaux systèmes géomorphologiques et écologiques de la rive sud du lac de Neuchâtel. Cela n'exclut bien évidemment pas des situations où, pour diverses raisons (écoulement de pied de falaise, ruisseau, hétérogénéité de la perméabilité du substrat, micro-topographie, perméabilité variable des cordons littoraux, etc.), les milieux ne se comportent pas de façon conforme aux règles générales évoquées. Ceci justifie une fois de plus une stratégie d'observation à long terme (monitoring), particulièrement en cas de modifications dirigées des conditions environnementales.

6.5 Principaux résultats et conclusions générales

Introduction

A l'occasion de la mise en application du règlement 1980/82 de régulation des lacs de Neuchâtel, Bienne et Morat, le Conseil fédéral a invité les cinq cantons riverains à en étudier les effets dans tous les domaines potentiellement sensibles. La Division principale Protection de la nature et du paysage de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) a été chargée d'examiner le point de vue de la protection de la nature sur la rive sud du lac de Neuchâtel, en collaboration avec les Services cantonaux concernés. Cette procédure a abouti à la mise sur pied du projet: **Etude des effets de la régulation des lacs subjurassiens sur la végétation et le milieu.**
Avant d'aborder de manière globale les résultats obtenus, un rappel de la **problématique et des principaux objectifs de l'étude** s'avère nécessaire. Les relations exactes entre le régime des eaux des lacs subjurassiens et les milieux naturels riverains sont encore mal connues, et avec elles l'impact global d'une régulation des niveaux qui doit satisfaire à des exigences multiples. Mais conformément au plan de protection et d'aménagement de la rive sud du lac de Neuchâtel, élaboré par Pro Natura Helvetica en collaboration avec les cantons intéressés (LSPN/WWF 1980), l'objectif est de conserver les marais dans leur état et leurs dimensions actuels, avec en priorité le maintien des marais non boisés et des étangs. Aujourd'hui, prévenir les effets d'une rupture d'équilibre entre le lac et les milieux soumis à son influence, mais également assurer la conservation de milieux souvent très sensibles, implique en particulier de pouvoir répondre aux questions fondamentales suivantes:

1) Quelles sont, au cours de l'année, les limites de la nappe lacustre par rapport à la situation topographique et géologique (nature du substrat), et quels effets cela entraîne-t-il sur les sols et sur les groupements végétaux au cours des saisons biologiques?

2) Existe-t-il des zones à altitude critique où la nappe ne correspond plus au milieu végétal et pédologique (décalage fonctionnel) en raison des modifications hydrologiques liées à la deuxième Correction des eaux du Jura?

D'un point de vue opérationnel, l'étude du fonctionnement des principaux systèmes hydrologiques doit permettre une évaluation plus précise de l'impact de la régulation en vigueur aujourd'hui, c'est-à-dire de répondre aux questions:

1) Quelle est la courbe de régulation annuelle du niveau du lac qui convient le mieux aux besoins de la végétation actuelle et qui permette de conserver l'équilibre de l'écosystème vu sous l'angle de la végétation et des sols?

2) Quelles seraient les conséquences sur la végétation et le milieu de toute autre régulation?

En laissant délibérément de côté les aspects relatifs à la présentation du milieu (cf. chap. 1.3), nous pouvons examiner brièvement les principaux résultats de l'étude dans l'ordre logique où ils ont été développés.

Conception générale du projet

La conception et l'organisation scientifique générales du projet sont illustrées schématiquement dans la figure 1.6. L'approche est basée essentiellement sur l'observation des phénomènes actuels dans la concordance des niveaux de nappe avec les tolérances hydrologiques de la végétation et des sols (références bibliographiques et situations types

sur la rive). Elle doit également permettre de faire ressortir les sites avec décalages fonctionnels sur le plan écologique, qu'ils résultent ou non de la deuxième Correction des eaux du Jura, et auxquels une amélioration de l'inondation par le lac pourrait être imposée. L'interprétation et la généralisation des résultats obtenus doivent aboutir à une courbe de régulation optimale du niveau du lac, ainsi qu'à une évaluation de la satisfaction des besoins en inondation du marais en cas de régulation non optimale.

Choix des transects, altimétrie et géophysique

Un échantillonnage hybride systématique-préférentiel a été utilisé pour la sélection de 15 transects représentatifs de l'écosystème riverain. La procédure mise en oeuvre comprend une analyse statistique d'informations déjà connues concernant la géomorphologie, la géologie et la végétation, complétée par la prise en considération d'autres critères objectifs non quantifiables (connaissances d'experts des milieux considérés).

Le levé altimétrique, assuré par un géomètre professionnel, a permis de mesurer de manière précise les altitudes moyennes des groupements (tab. 2.2 et fig. 2.3). En termes d'influence potentielle du lac, cette zonation altitudinale montre clairement que seuls les marais non boisés, à l'exclusion des prairies à choin et des prairies à molinie, sont susceptibles d'être influencés par le battement du lac tel qu'il est déterminé aujourd'hui (règlement 1980/82).

Dans le domaine géophysique, les investigations ont montré que le plancher de la molasse est à moins de 7 m, sauf pour les transects 29 et 30 (cf. fig. 2.7). Cette molasse est marneuse, imperméable, sillonnée parfois de chenaux gréseux. La couverture sédimentaire limono-sableuse présente des conductivités hydrauliques faibles, de 10^{-6} à 10^{-7} m/sec.
Un chapitre particulier consacré à la réserve de Châbles montre qu'en absence de pluie, l'apport d'eau de la falaise est non négligeable, puisqu'il peut se chiffrer à près de 1 l/mn/m linéaire de falaise.

Végétation

La description de la végétation a pour but d'évaluer sa sensibilité par rapport aux conditions écologiques, principalement celles liées à la dynamique de la nappe. Pour ce faire, 2 axes sont privilégiés: 1) une **approche fonctionnelle** (chap. 3.4.1) pour tenter de répondre à la question centrale: quelle végétation pour quel lac? 2) une **approche phytosociologique** (les résultats de cette partie, de même que ceux concernant les forêts, ne sont pas rappelés ici, cf. chap. 3.4.2, 3.4.3 et annexe 4) pour faire le lien avec les travaux existants.
Sur le plan méthodologique, il s'est avéré nécessaire d'accentuer l'information écologique apportée par les espèces dominantes, puisque l'inondation plus ou moins marquée du sol peut se traduire par une plus ou moins grande vitalité et exubérance. Afin de faire ressortir ce caractère de bioindication dans les analyses, mais aussi pour limiter la durée de travail sur le terrain, nous avons choisi une voie médiane entre la méthode classique (indispensable pour pouvoir nous rattacher aux données existantes) et la méthode synusiale intégrée (plus performante en matière d'interprétation dynamique, mais plus exigeante). Par conséquent, nous avons effectué les relevés en tenant compte de la morphologie des espèces les plus dominantes (ou en intégrant la composante structurale en forêt).
La **typologie fonctionnelle des marais** comporte 5 groupes de relevés qui se distinguent par leur fonctionnement relativement à la nappe (cf. également le tableau résumé de la végétation 3.2 et le tableau des valeurs indicatrices 3.3). Leurs principales caractéristiques sont les suivantes:

- ***groupe Gr1*: groupement à grands roseaux**, situé de part et d'autre de la dune sur substrat fin et asphyxiant, inondé en permanence. L'exubérance de *Phragmites australis* ne laisse que peu de place aux espèces des groupements voisins, exception faite de quelques grands tourradons de *Carex elata 3* (>30 cm, feuilles >1 m);
- ***groupe Gr2:* groupement à roseaux et laiches élevées en tourradons**, en équilibre grâce **à l'eau libre permanente.** Il constitue la limite inférieure pour ce qui est de l'inondation, et la nappe devrait y rester élevée. Dans le cas contraire, on pourrait assister à un envahissement du milieu par la marisque, ainsi qu'à une diminution de la biodiversité;
- ***groupe Gr3:* groupement à roseaux, à laiches élevées en tourradons et à semis d'arbustes, à eau libre temporaire.** Par ces caractéristiques floristiques et écologiques, ce groupement occupe une position charnière avec toutes les potentialités d'évolution vers un milieu palustre, de type roselière s.l. ou vers un milieu prairial, plus ou moins humide, livré à l'embroussaillement;
- ***groupe Gr4:* groupement relique à marisque.** Du point de vue fonctionnel, ce groupe s'apparente à l'aile sèche du *Cladietum type* et représente une limite supérieure à l'inondation (altitude moyenne supérieure à 429,50 m). Un apport hydrique plus fréquent et prolongé pourrait être envisagé, mais avec un risque de revitaliser la marisque, ce qui pourrait affecter, vers l'amont, la stratégie de colonisation des petits carex;
- ***groupe Gr5:* groupements à choin et à molinie.** Du point de vue fonctionnel, ce groupe comprend les stations les moins humides des marais, dont certaines sont inondées faiblement, surtout en hiver. Souvent situées en bordure de forêt ou sur d'anciens cordons littoraux, ces stations doivent être préservées d'une inondation importante, particulièrement celle occasionnée par le lac.

Sols

Une typologie des sols a été établie pour mieux comprendre les relations qu'ils entretiennent avec les niveaux du lac, les nappes et la végétation. Dans cette optique, il s'est avéré important de détecter les traces d'hydromorphie dans les sols et de les interpréter par rapport au contexte hydrodynamique et phytosociologique.
La description pédologique de chaque site sur les 15 transects (140 stations) et le délai imparti ont imposé une méthode de description simple et rapide, basée sur un petit nombre de paramètres à mesurer sur le terrain (cf. tab. 4.2), permettant de trouver rapidement les principales limites pédologiques et de révéler des situations critiques.
Tous les sols étudiés sont influencés par la nappe et peuvent être qualifiés d'hydromorphes. Le tableau réduit 4.6 résume les quatre types de sols que l'on rencontre sur les transects, présentés par ordre d'hydromorphie décroissante.
Si l'on compare les types fonctionnels de végétation avec les types de sols (tab. 6.1), on constate que:

- pour le groupement à grands roseaux (Gr 1), les sols sont des **anmoors** ou **anmoors tourbeux**, types clairement déterminés par la nappe permanente;
- le groupement à roseaux et laiches élevées en tourradons et à eau libre permanente (Gr 2), en **équilibre instable du point de vue fonctionnel** (chap. 3.4.1 et tab. 3.2), comprend sans exception les sols les plus hydromorphes, avec des humus du type **tourbe**, **anmoor tourbeux** et **anmoor**;
- dans le groupement à roseaux, à laiches élevées en tourradons et à semis d'arbustes, à eau libre temporaire (Gr 3), l'hydromorphie est encore marquée. Toutefois, par suite d'**assèchements périodiques**, certains sols présentent un **début de maturation de l'humus**. Les anmoors y montrent une **évolution vers les hydromulls**. Conjointement, le niveau d'oxydation se marque peu à peu, et le phénomène tend à s'accentuer dans le groupement à marisque (Gr4), puisque l'on note la présence d'une station (908) sur **mull carbonaté**.

Ces deux groupements fonctionnels (Gr2 et Gr3) correspondent aux milieux avec **décalages possibles entre le sol et la végétation**. Ces décalages sont réels dans quelques stations du Gr3 (2903, 2904, 2905, 2907, 2909 et 1308), les mêmes que celles annonçant les aulnaies noires (cf. chap. 3.4.1);
- en ce qui concerne le groupement à marisque (Gr4), ces considérations pourraient être valables également, mais la large amplitude écologique de *Cladium* masque cet aspect;
- les sols du groupement à choin et à molinie (Gr5) sont des **gleys oxydés à hydromull**. Ils caractérisent des milieux à humidité très variable dont les nappes pluviales inondantes alternant avec des **périodes plus ou moins longues de sécheresse**. Les sites 909, 912, 913 et 204, stations à anmoor au milieu de stations à hydromull, signalent la présence d'une micro topographie en creux et bosses, avec une mosaïque de sols hydromorphes. L'humus y oscille entre anmoor et hydromull.

La majorité des sols à gleys oxydés et mulls carbonatés accompagnent les manteaux forestiers et les forêts.
A l'évidence, l'étude des sols aide à la description et à la compréhension des groupements fonctionnels. Elle confirme la **situation d'équilibre hydromorphique incertain des groupements fonctionnels Gr2, Gr3 et Gr4**. Mieux, elle met en lumière l'effet de bascule pouvant influencer leur évolution, le facteur moteur étant le degré d'hydromorphie (cf. fig. 4.3).

Hydrodynamique

La figure 1.5 montre que, du point de vue hydrodynamique, la relation entre le lac et les milieux riverains relève de deux modèles:

- le modèle des **flux souterrains** qui fait intervenir les propriétés hydrologiques des sédiments (conductivité hydraulique, socle imperméable, épaisseur de l'aquifère, porosité de drainage) ainsi que les paramètres climatiques (ETP, EP, précipitations) en plus des situations topographiques mentionnées avec le modèle suivant;

- le modèle **topographique** qui intègre la relation d'inondation directe par le lac, en fonction des situations topographiques de la rive (altitude par rapport au lac, relief micro topographique, distance au lac, présence d'une dune imperméable ou d'une lagune, etc.).

Cependant l'étude des flux souterrains (chap. 5.2 et annexe 5), puis de la piézométrie (chap. 5.3), a permis d'estimer quantitativement les relations avec le lac (chap. 5.3.2) et de conclure que les inondations directes représentent le principal facteur d'influence du lac (modèle topographique).
La modélisation hydrodynamique des relations nappe-lac (flux souterrains) le long de transects représentatifs a permis d'évaluer, par simulation numérique, l'impact d'une modification permanente du niveau moyen du lac de Neuchâtel sur les fluctuations de la nappe phréatique en marais. Dans ce but, il a été fait appel au modèle général de simulation des transferts de masse en milieux poreux variablement saturés HYDROCHEM (*PERROCHET et MUSY*, 1991). Dans la mesure où la mise en équation de phénomènes hydrodynamiques dans le contexte naturel reste un exercice assez délicat (imprécision et variabilité spatiale de paramètres déterminants, méconnaissance de processus secondaires susceptibles d'affecter le phénomène de base, etc.), l'effort est concentré sur une analyse de type relative et non pas absolue puisque le milieu naturel est fortement idéalisé (simplifié) au travers du modèle mathématique. D'importants éléments de réponses concernant la sensibilité des relations nappe-lac peuvent néanmoins être dérivés directement par comparaison systématique entre les diverses variantes simulées.
Au total, l'analyse du phénomène fait l'objet de 13 variantes (cf. fig. 5.1) qui se

distinguent les unes des autres par le conditionnement climatique, par les cotes *H* [m] imposées du niveau du lac, par le pas de temps avec lequel les données sont prises en compte, et par la durée des simulations. Parmi les nombreux résultats obtenus, les plus importants sont les suivants:

- **en conditions climatiques naturelles représentatives** pour trois niveaux de lac, une influence du lac marquée à long terme n'est probable qu'à moins d'environ 60 m du rivage. Les différentes simulations témoignent du rôle déterminant des conditions hydrométéorologiques de surface;
- lors de la simulation, pour quatre niveaux de lac, d'une **succession de cinq années sèches** par répétitions de l'année 1989 (évaluation de l'influence d'une éventuelle dégradation climatique à long terme), les résultats montrent que la pérennité des conditions marécageuses du transect est bien davantage menacée par une succession d'années du type de 1989 que par les différents niveaux de lac testés;
- **l'effet 'net' de la régulation du lac sur le marais, dans le contexte hydrométéorologique journalier le plus réaliste possible**, est évalué par insertion d'une barrière souterraine imperméable (rideau virtuel de palplanches) sur le cordon littoral. La comparaison des nappes simulées 'avec' et 'sans' lac indique que les échanges lac-marais affectent sensiblement le système sur une distance d'environ 20 m. Au-delà les différences s'atténuent pour disparaître à environ 60 m du rivage, où les phases de remontée et de rabattement de la nappe ne sont plus du tout perturbées par la présence ou l'absence des échanges lac – marais.

En conclusions, à l'exception d'une frange côtière d'environ 50 m, la recharge ou le drainage du marais par les flux souterrains liés au lac peuvent être négligés. L'influence du lac s'en trouve donc réduite aux situations d'inondation directe dont l'effet est plus aisément mesurable puisque directement dépendant de la topographie.

L'évolution des niveaux piézométriques durant les 63 semaines de mesures est illustrée dans l'annexe 6 (graphes et tableaux). S'agissant de l'influence potentielle du lac, l'examen des courbes suggère trois catégories de transects en fonction des corrélations globales qu'ils présentent, sur une partie tout au moins, avec les fluctuations des niveaux du lac (cf. également tab. 5.1):

- **très bonnes corrélations**: transects N° **2** (dès 2f), **4** (dès 4h), **19** (dès 19h), **21** (dès 21e) et **30** (dès 30h);
- **corrélations occasionnelles possibles en marais**, mais jamais observées durant notre période de mesures, selon l'importance des crues et la proximité du lac (flux souterrains sur courtes distances, cf. chap. 5.2.4): transects N° **5**, **9**, **12**, **13**, **16**, **25**, **27** et **29**;
- **jamais de corrélation**: transects N° **10** et **23**.

La détermination des **conditions et des fréquences d'inondations** a été effectuée graphiquement et analytiquement à partir de l'analyse des données piézométriques selon le principe illustré dans la figure 5.5. Les cas réels sont illustrés en annexe 7. Le nombre de jours d'inondation résultant de l'interprétation des graphes et du calcul automatique (sur données journalières interpolées à partir des valeurs hebdomadaires) figure dans les tableaux statistiques de l'annexe 8.

Nécessaire à l'établissement d'une typologie globale, la détermination des **groupes fonctionnels de nappes** a été effectuée sur la base des données codées de la saison de végétation, après élimination des valeurs hivernales. La délimitation de la période hivernale, de même que l'analyse de groupement, résultent d'une analyse multivariable. Les groupes issus du clustering figurent dans les tableaux statistiques de l'annexe 8, en particulier le tableau c. L'examen comparé du contenu des groupes montre que dans l'ensemble, ceux-ci présentent une assez bonne homogénéité du point de vue de leur composition végétale, avec en particulier une séparation marais - forêts bien marquée.

Les **principales caractéristiques numériques** habituellement utilisées pour mettre en valeur les **mesures piézométriques** sont réunies dans l'annexe 8. Par soucis d'être complet, cinq versions sont présentées qui regroupent les données selon les unités synsystématiques d'une part (valeurs annuelles et de la saison de végétation, calculées respectivement sur 53 et 35 semaines), selon les groupes issus du clustering (des nappes et des sols) et de la typologie globale d'autre part (calculés sur 35 semaines). A l'intérieur des tableaux correspondant aux unités synsystématiques, les valeurs sont ordonnées d'abord par altitudes moyennes croissantes puis, à l'intérieur des groupements, par ordre croissant des moyennes (du plus humide au plus sec). Quelques observations méritent une brève mention:

- dans le domaine des altitudes de fluctuation générale du lac (429 - 429,40, voire 429,60), il y a un rapport direct entre l'altitude et les principales caractéristiques telles que niveau moyen, inondations respectivement sécheresse ou % de liaison au lac. De ce point de vue, les aulnaies constituent une exception;
- l'indication fournie par les coefficients de variations montre tout naturellement un net resserrement de la variation dans le cas des groupes fonctionnels issus du clustering;
- les moyennes annuelles des nappes sont logiquement plus hautes (plus humides) que les moyennes calculées sur la base de la saison de végétation seulement, excepté pour les roselières;
- les fluctuations maximales s'observent chez les groupements forestiers mais aussi à l'intérieur des roselières si l'on tient compte, tous sites confondus, de l'écart entre minimum et maximum;
- en matière d'inondation et de sécheresse, les tendances respectent parfaitement les conditions répertoriées dans la littérature: pôle le plus inondé du côté des roselières, marais à grands Carex et aulnaies, pôle le plus xérophile avec les pinèdes et les chênaies, situation intermédiaire pour les autres groupements, avec une situation fort contrastée pour le groupement à marisque;

Un mot encore à propos de l'approche interdisciplinaire. L'intervention de l'hydraulicien dans des domaines appliqués tels que la gestion des ressources en eaux est encore souvent limitée aux secteurs touchant directement l'activité humaine (eaux de consommation, irrigation de terres agricoles,...). En raison notamment des coûts liés aux exigences élevées en matière de précision significative, c'est-à-dire interprétable en termes écologiques, les écosystèmes "naturels" ne sont guère étudiés par simulation physico-mathématique à l'image de ce qui est présenté dans ce rapport. Et pourtant, les résultats obtenus montrent à l'évidence que la méthode, qui allie judicieusement l'approche classique du naturaliste à celle de la modélisation par l'ingénieur, constitue un outil précieux dans le domaine toujours plus exigeant de la gestion des milieux naturels.

Typologie globale végétation - nappe - sol

La typologie fonctionnelle globale constitue l'outil déterminant pour la construction de la courbe optimale de régulation des niveaux du lac (choix des sites, évaluation des centres de gravité écologiques et des unités marginales à comportement critique, calculs des moyennes à appliquer). Les types obtenus (tableau 6.1) résultent d'une combinaison appropriée, par ordre d'importance décroissante, des groupements partiels de la végétation d'abord, des nappes et des sols ensuite.

Les **caractéristiques de ces groupes fonctionnels** peuvent être brièvement résumées:

- ***groupe 1:*** **grands roseaux**
  Le centre de gravité correspond à une nappe de type 7, la plus humide des marais (inondation moyenne de 7 cm), et à un sol de type 2, gley réduit à anmoor tourbeux.

Les nappes de type 6 sont plus sèches, et celle de type 1, sur gley réduit à mull carbonaté, trahit surtout la forte amplitude du roseau;

- ***groupe 2:*** **roseaux et laiches élevées en tourradons, eau libre permanente**
  L'ensemble est homogène sur le plan des nappes (type 7) et sur celui des sols qui sont tous des gleys réduits à anmoor, tourbeux pour une moitié d'entre eux (type 2.2);
- ***groupe 3:*** **roseaux, laiches élevées en tourradons et semis d'arbustes, eau libre temporaire**
  Comme pour le groupe 1, les nappes se partagent entre le type 6 modérément inondé et le type 7 inondé pratiquement en permanence. Au niveau des sols, la diminution d'humidité est marquée par le groupe des gleys oxydés à hydromull (type 3.4);
- ***groupe 4:*** **groupements à marisque**
  L'ensemble, plus hétérogène aussi bien pour les nappes (niveau moyen à 12 cm) que pour les sols, représente une situation intermédiaire entre l'humidité prononcée des 3 premiers groupes (nappe moyenne à moins de 4 cm) et l'aile sèche des marais représentée par le groupe 5 (nappe moyenne à 15 cm);
- ***groupe 5:*** **groupements à choin et à molinie**
  Même hétérogénéité que l'ensemble précédent, mais un cran plus sec (nappe moyenne à 15 cm et inondations ne dépassant pas 9 %, excepté pour les unités à marisque).

En résumé, pour ce qui est des marais, l'ensemble présente une image cohérente principalement déterminée par la **bonne correspondance entre type de sol et niveau de nappe,** particulièrement en conditions très humides où dominent quelques centres de gravité bien représentés. L'assèchement en revanche augmente la diversité des combinaisons typologiques.

Mise en évidence de zones à décalages fonctionnels

La bonne cohérence générale entre nappe et sol n'exclut pas la présence de **zones à décalage fonctionnel**, c'est-à-dire principalement de **milieux dont le régime hydrique actuel s'écarte sensiblement de la moyenne du type de référence, voire n'est plus en concordance avec la nature du sol.** Certains décalages déjà mis en évidence par l'étude pédologique (cf. ci-dessus) peuvent être confirmés à l'examen de la typologie globale. Ce sont en particulier des nappes de type 6 (bas-marais modérément inondés) au sein du groupe global 3 (roseaux, laiches élevées en tourradons et semis d'arbustes, à eau libre temporaire), comme par exemple les sites à faible taux d'inondation 1308, 2907, 2909, 2904.
Si la détection de telles zones reste délicate, en raison notamment de choix méthodologiques inhérents aux limites du projet, elle fournit pourtant quelques pistes et surtout, au-delà des cas particuliers considérés, l'indication que le problème existe bel et bien.

Courbe optimale de régulation des eaux du lac

La typologie synthétique intégrant les groupements de végétation, de nappes et de sols (cf. chap. 6.1) définit des **types fonctionnels de référence**. La comparaison des caractéristiques hydrodynamiques de ces derniers avec les valeurs effectivement observées sur les transects permet dès lors de **fixer pour chaque site, par période, le nombre moyen de jours d'inondation souhaité**, et en conséquence **le niveau du lac à atteindre pour satisfaire ces exigences**. En principe donc, chaque site réellement concerné est ramené aux conditions moyennes (nombre de jours inondés) du type auquel il appartient en agissant sur le niveau du lac.

La sélection et le calcul des valeurs moyennes des types fonctionnels s'opère selon quelques critères et principes prioritaires:

- en raison des relations observées entre l'importance des inondations, les altitudes et les fluctuations du niveau du lac, **seuls les groupements de marais proprement dits interviennent réellement dans la problématique de la régulation** (cf. notamment chap. 2.2);
- le long de gradients lac-falaise, la zonation diversifiée atteste du fait que **les caractéristiques des nappes actuelles, qui reflètent un gradient hydrique important, conviennent de manière générale aux besoins des groupements rencontrés**, et que par conséquent elles doivent être maintenues. Dans la mesure où les effets des décalages fonctionnels liés à l'assèchement doivent être enrayés, il y a lieu de **maintenir une inondation maximale conforme au type de référence**;
- l'impérieuse nécessité de conserver de manière durable les bas-marais au moins en l'état (biodiversité), voire d'en favoriser localement l'expansion, la nécessité qui en découle de maîtriser l'embroussaillement, exigent également une **inondation maximale mais différenciée selon les groupements** (cf. également chap. 1.4.2):
  - **roselières, bas-marais à grandes laiches, groupement à marisque**: milieux à cycles biogéochimiques ouverts, et tendance eutrophe, dont la fraction des inondations liées au lac doit être maximale.
  - **bas-marais à petites laiches, à choin, prairies à molinie**: milieux à cycles nutritifs conservateurs, oligo-mésotrophes, dont la fraction des inondations liées au lac doit être minimale. A l'inverse de ceux de la catégorie précédente, les groupements considérés ici interviennent de manière négative pour le calcul de la courbe optimale, dans le sens où **ils représentent une limite à l'élévation du niveau du lac**. De fait, en raison de leur altitude moyenne élevée, ils n'entrent pratiquement plus en considération si ce n'est pour l'évaluation du degré de satisfaction en cas d'écart positif important découlant d'une autre régulation (cf. 6.4.1).

La prise en compte de ces diverses contraintes conduit nécessairement à ne retenir qu'une **version maximaliste de la courbe de régulation optimale**, version dont le calcul est **basé sur les 4 premiers types fonctionnels** du tableau 6.1 seulement.
La courbe optimale de régulation des eaux du lac ainsi obtenue est illustrée sur la figure 6.3. L'exigence imposée sur le niveau du lac est **limitée à la période de végétation**. La faible amplitude des fluctuations observées montre qu'**il importe de maintenir durant toute la période de végétation un niveau du lac au moins égal à 429,50 m, niveau permettant de garantir, lors d'une année "standard", les inondations moyennes requises pour les groupements du *Phragmition* et du *Magnocaricion*.**
Une simulation de valeurs extrêmes permet en outre de fixer **entre 429,40 m et 429,56 m l'amplitude de l'influence potentielle moyenne du lac sur le marais**, du moins en termes d'inondations directes. Ces limites ne tiennent pas compte des cas particuliers situés en dessous de 429,40 m, ni des effets négatifs liés à l'inondation par le lac, au-dessus de 429,56 m, de groupements qui ne devraient pas l'être (*Caricion davallianae*).

Evolution potentielle des milieux naturels

Comme premier élément de réponse à la problématique des conséquences possibles d'une régulation non optimale des niveaux du lac sur la végétation et le milieu (cf. chap. 1.4.1), une **évaluation chiffrée de l'impact des différents niveaux du lac par rapport aux besoins hydriques présumés de l'ensemble des groupements**

végétaux non boisés a été effectuée. A cet effet, les données piézométriques utilisées pour déterminer l'allure de la courbe optimale de régulation (cf. chap. 6.3), en particulier le nombre total de jours d'inondation à lier au lac (cf. fig. 6.2), ont servi de base au calcul d'un indice de satisfaction de ces besoins compris entre 0 et 1. Les résultats détaillés sont présentés, par période, sur le tableau 6.3, et les valeurs moyennes calculée sur la base de la seule période de végétation sont résumées dans la figure 6.4. Il ressort de l'examen de cette figure que:

- **l'indice de satisfaction maximal est obtenu pour une altitude du lac de 429,50**, qui confirme parfaitement la recommandation contenue dans la courbe optimale (fig. 6.3). Les deux modes de calcul diffèrent pourtant par la prise en compte, pour le calcul de l'indice, de la longueur précisément inondée et des tronçons dépourvus de piézomètres;
- indépendamment de tout lien au lac, **le seul effet des pluies** (année légèrement inférieure à la moyenne) **se traduit par une satisfaction d'au moins 0,3 (30%) si l'on tient compte uniquement de la période de végétation**, de 0,42 (42%) si l'on considère l'année entière. Cette différence ne traduit rien d'autre qu'une baisse de la pluviosité en période de végétation;
- **au-delà de 429,50 m, la chute de l'indice est sévère jusqu'à 429,90 m** (20 % de satisfaction). Elle signifie que la majorité des groupements à ne pas inonder par le lac (*Caricion davallianae* et *Molinion*) se situent précisément entre ces deux bornes altitudinales.

En définitive, l'allure très resserrée de la courbe en partie centrale montre que l'on dispose de peu de marge de régulation pour satisfaire une fraction élevée de besoins: à titre d'exemple, maintenir cette part au-dessus de 50 %, limite plutôt modeste, exige le maintien d'un niveau du lac à 429,50 m ± 20 cm.

6.6 Prolongements souhaitables de l'étude

Résoudre un problème particulier comme celui qui nous était posé soulève inévitablement des questions auxquelles une telle étude, malgré son envergure, ne peut apporter que des réponses partielles.
Directement liée à notre problématique, la question de l'évaluation quantitative spatiale de l'effet du niveau du lac sur les marais subsiste puisque nous n'avons travaillé que sur des transects. La variabilité spatiale d'un site a toutefois été abordée dans le cadre d'un travail de diplôme (annexe 9).

Plus généralement reste la question centrale du rôle et du fonctionnement de cet écotone palustre entre milieu lacustre et terrestre, notamment par rapport à la problématique de la biodiversité et des flux de matière, d'énergie et d'organismes aux différentes échelles spatiales et temporelles (connectivité). Le rôle des facteurs de perturbation et de contrainte (inondations par le lac, niveau des nappes, effet des ruissellements de pied de falaise) dans le déterminisme des structures biologiques et de la biodiversité mérite une attention toute particulière.
De plus, étant donné sa jeunesse, les processus dynamiques à l'oeuvre sur la rive sud du lac de Neuchâtel sont d'un très grand intérêt, notamment par rapport aux problèmes de gestion de ces milieux.

Dans ce contexte, un projet intitulé "Etude du déterminisme de la biodiversité végétale aux niveaux synusial et phytocénotique dans les forêts et marais de l'écotone Rive sud du lac de Neuchâtel" est en préparation. Celui-ci sera soumis au Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique (FNRS).
Par le sujet et la méthodologie, ce projet est fortement lié à celui des zones alluviales

intitulé "Modélisation spatio-temporelle phyto-écologique et hydro-géomorphologique intégrée de trois hydrosystèmes alluviaux (projet RIVAL). Une esquisse pour un projet pilote a été présentée conjointement à l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) et à l'Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE).

Figure 6.1a Niveaux piézométriques moyens des types fonctionnels en marais (1991-1992)

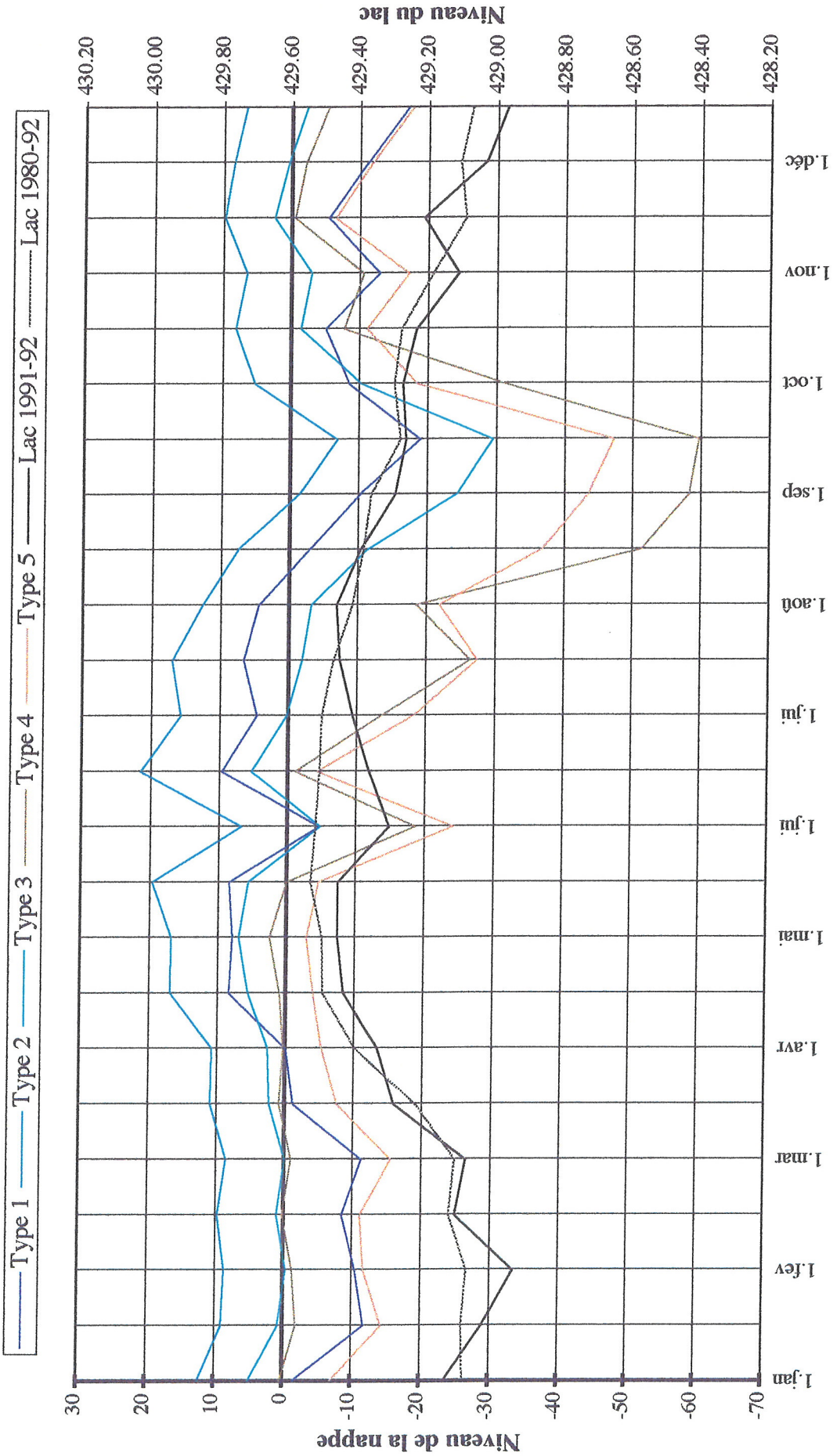


Figure 6.1b Niveaux piézométriques moyens des types fonctionnels en forêts (1991-1992)

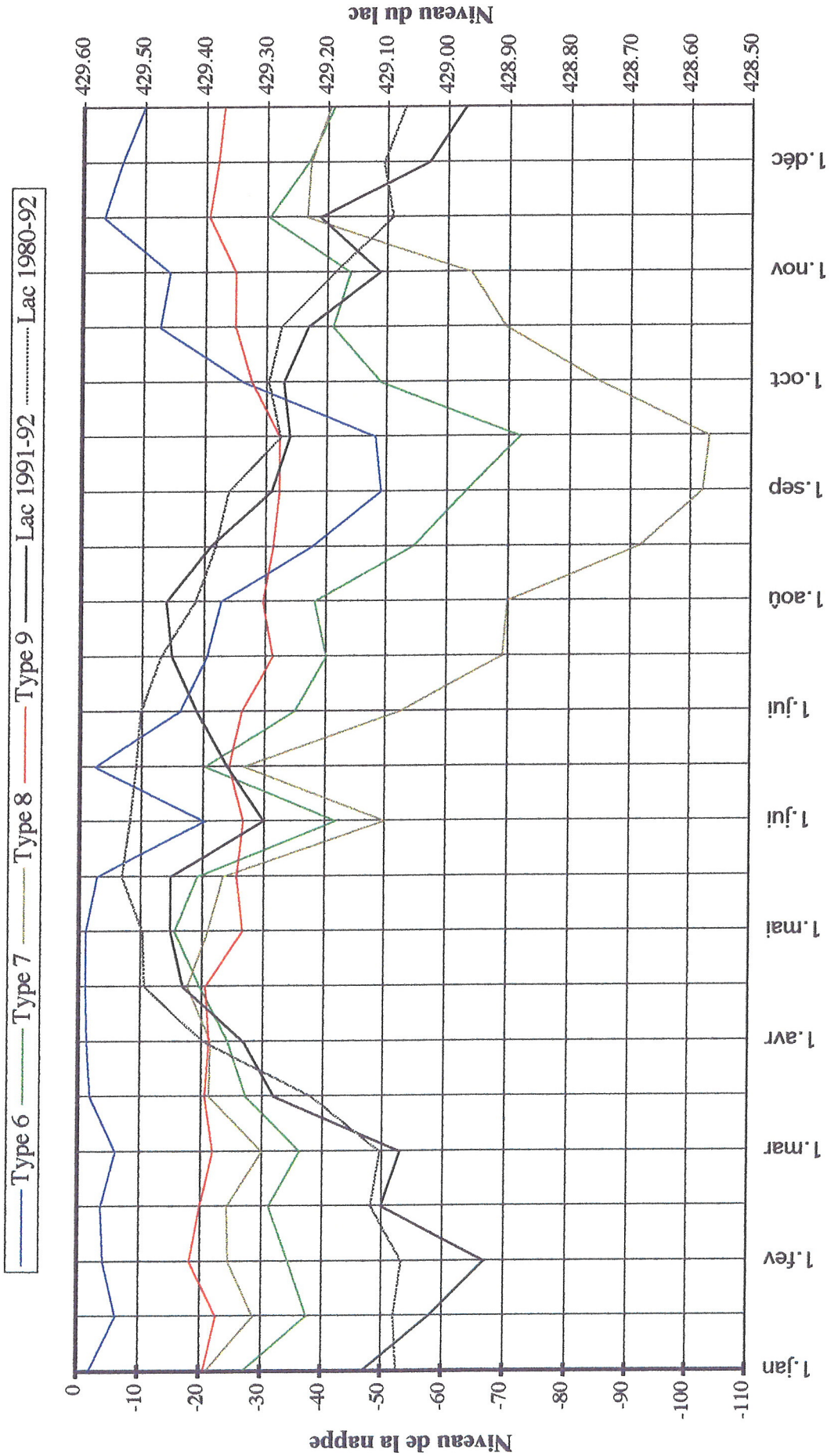


Figure 6.2 Principe de la détermination du nombre de jours d'inondation directe par le lac

Tr No 2	Gpmt / Site	Typologie globale (moyennes) Type1			Type 2			Groupement à marisque 2e1 Type 2					Roselière 2f1 Type 1				
Sol fonctionnel								429.38					429.13				
Seuil								429.41									
		liés	≠ liés	Total	liés	≠ liés	Total	diff	liés	≠ liés	Total	Totlié	diff	liés	≠ liés	Total	Totlié
01.May	15.May	15	0	15	15	0	15	0	15	0	15	15	0	15	0	15	15
16.May	31.May	10	6	16	13	3	16	0	4	12	16	4	0	16	0	16	16
01.Jun	15.Jun	9	5	14	14	1	15	0	2	13	15	2	-1	15	0	15	14
16.Jun	30.Jun	15	0	15	15	0	15	0	15	0	15	15	0	15	0	15	15
01.Jul	15.Jul	15	0	15	15	0	15	0	12	3	15	12	0	15	0	15	15
16.Jul	31.Jul	16	0	16	16	0	16	0	15	1	16	15	0	16	0	16	16
01.Aug	15.Aug	12	3	15	15	0	15	0	4	11	15	4	0	15	0	15	15
16.Aug	31.Aug	9	6	15	14	2	16	14	0	2	2	14	-1	16	0	16	15
01.Sep	15.Sep	6	1	7	1	12	12	12	0	0	0	12	-8	15	0	15	7
16.Sep	30.Sep	6	1	7	0	14	14	8	0	6	6	8	-8	15	0	15	7
01.Oct	15.Oct	6	7	14	0	15	15	0	0	15	15	0	1	15	0	15	14
16.Oct	31.Oct	2	8	10	0	14	14	-2	0	16	16	-2	1	9	0	9	10
01.Nov	15.Nov	3	12	15	0	15	15	0	0	15	15	0	0	15	0	15	15
16.Nov	30.Nov	1	12	13	0	15	15	0	0	15	15	0	4	7	2	9	11
01.Dec	15.Dec	0	7	7	0	15	15	0	0	15	15	0	7	0	0	0	7
16.Dec	31.Dec	3	10	13	1	15	16	0	0	16	16	0	1	10	2	12	11
01.Jan	15.Jan	0	10	11	0	15	15	0	0	15	15	0	7	1	3	4	8
16.Jan	31.Jan	0	11	11	0	16	16	0	0	16	16	0	11	0	0	0	11
01.Feb	15.Feb	0	11	11	0	15	15	0	0	15	15	0	-2	0	13	13	-2 → 0
16.Feb	29.Feb	1	9	10	0	14	14	0	0	14	14	0	2	6	2	8	8
01.Mar	15.Mar	1	11	12	0	15	15	0	0	15	15	0	3	4	5	9	7
16.Mar	31.Mar	10	6	16	15	1	16	0	0	16	16	0	0	16	0	16	16
01.Apr	15.Apr	14	1	15	15	0	15	0	11	4	15	11	0	15	0	15	15
16.Apr	30.Apr	15	0	15	15	0	15	0	15	0	15	15	0	15	0	15	15

Légende:

liés: nombre de jours d'inondation liés au lac
≠ liés: nombre de jours d'inondation non liés au lac
diff: nombre de jours d'inondation liés au lac supplémentaires (valeur du type moins valeur du site)
Totlié: nombre total de jours d'inondation à lier au lac (diff + liés)
→ cheminement pour la lecture du nombre de jours d'inondation directe (voir texte)

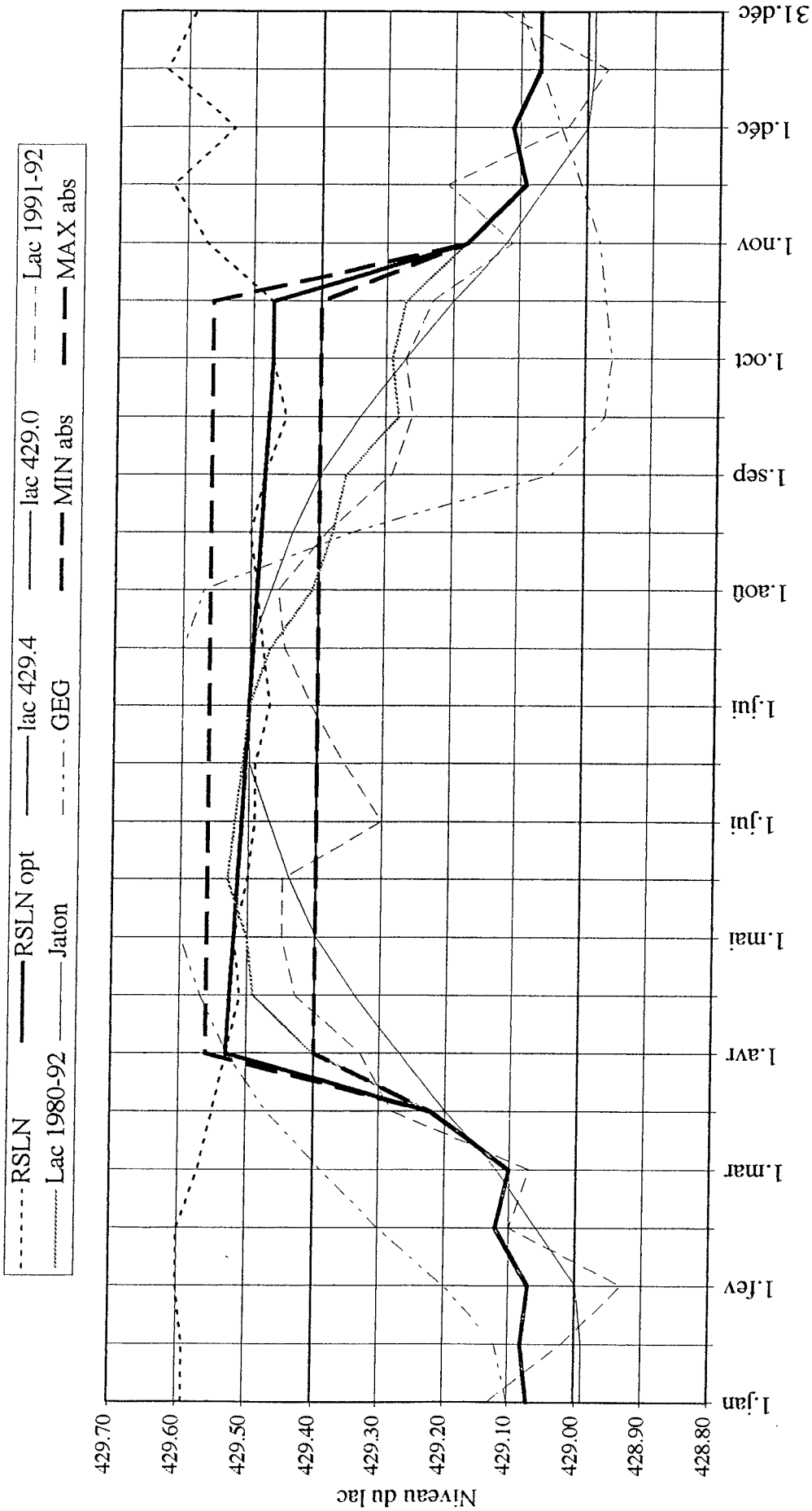


Figure 6.3 Courbe optimale de régulation du niveau du lac pour les besoins de la végétation et du milieu
(voir explications dans le texte, chap. 6.3)

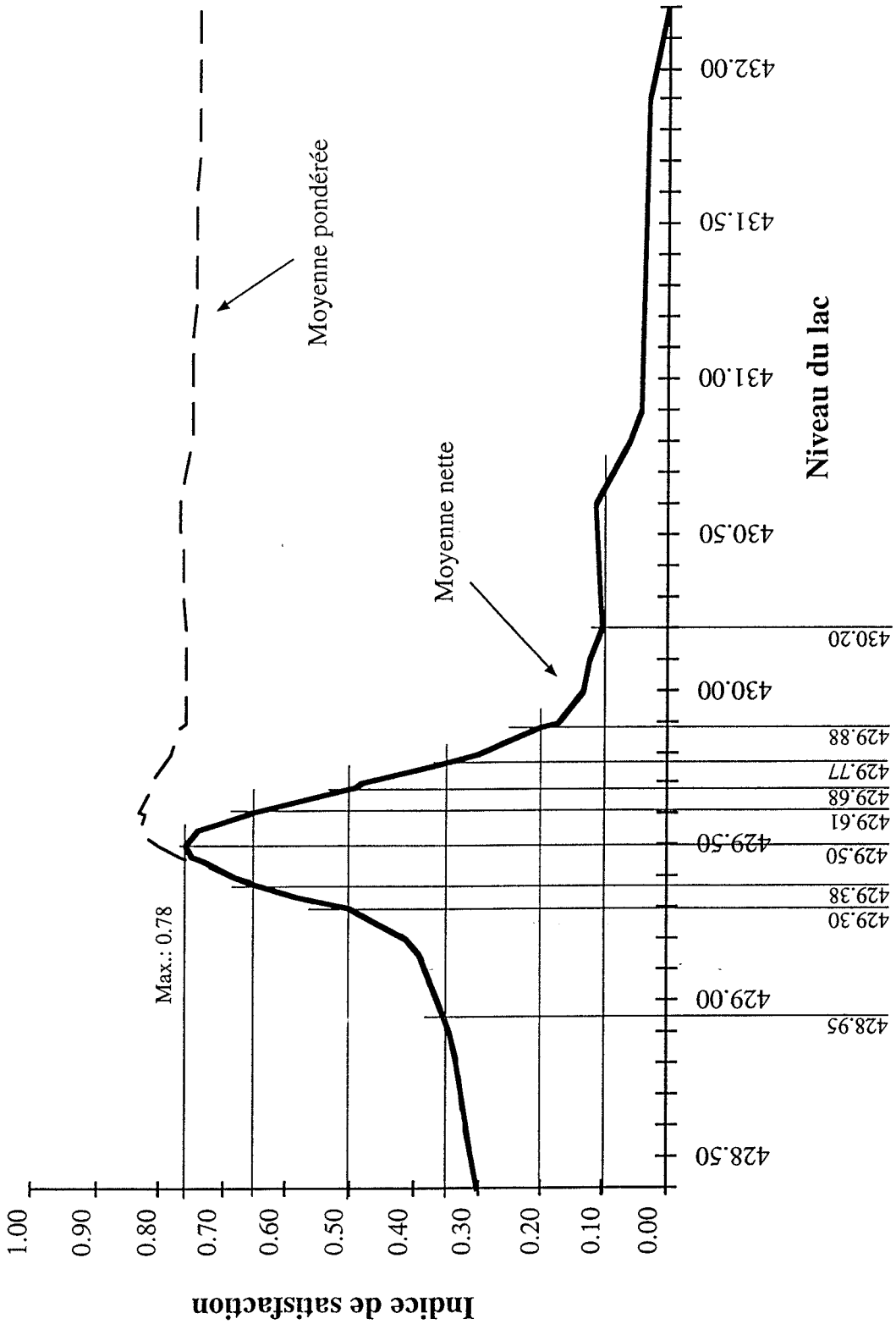


Figure 6.4 Indice de satisfaction des besoins en inondation en fonction du niveau du lac (période de végétation)

Tableau 6.1 Typologie globale végétation - nappes - sols (données de la saison végétation)

Désignation	Code	R No	Unité	Types				Socle	Alt	moy	Inondations avec liaison au lac						sèche	%
				Vég	Nappe	Sols	Global				liés	%	≠ liés	%	Total	%		
Grands roseaux (3,2)	4j1	410	Roselière	1	1	41	114	400	429.72	36.6	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	16g2	1607	Roselière	1	6	11	161	90	429.52	17.7	2	1%	1	0%	3	1%	0	0%
	29j1	2910	Roselière	1	6	13	161		429.44	7.6	51	21%	21	9%	72	29%	0	0%
	27j1	2710	Roselière	1	6	34	163	300	429.44	9.3	51	21%	13	5%	64	26%	0	0%
	2f1	206	Roselière	1	6	21	162	115	429.13	-0.2	**227**	52%	7	3%	135	**55%**	1	3%
	4g1	407	Marais à laiche des rives	1	7	21	172	270	429.29	-8.9	**138**	56%	89	36%	227	**93%**	0	0%
	4h1	408	Roselière	1	7	21	172	310	429.31	-6.9	**138**	56%	76	31%	214	**87%**	0	0%
	4i1	409	Roselière	1	7	21	172	350	429.25	-12.1	**207**	84%	27	11%	234	**96%**	0	0%
	5h1	508	Roselière	1	7	22	172		429.44	-2.0	0	0%	117	70%	117	70%	0	0%
	29f1	2906	Roselière	1	7	22	172		429.50	-7.3	0	0%	186	76%	186	76%	0	0%
	30i1	3009	Marais à laiche des rives	1	7	22	172		429.35	-2.6	**99**	40%	100	41%	199	**81%**	0	0%
	30j1	3010	Marais à laiche des rives	1	7	22	172		429.37	-3.6	**99**	40%	83	34%	182	**74%**	0	0%
	30k1	3011	Roselière	1	7	22	172		429.18	-17.0	**220**	90%	7	3%	227	**93%**	0	0%
Roseaux et laiches élevées en tourradons eau libre permanente	21d1	2104	Groupement à marisque	2	6	13	261		429.34	-2.0	119	49%	48	20%	167	68%	2	6%
	27e1	2705	Groupement à marisque	2	7	11	271	50	429.25	-15.7	0	0%	240	98%	240	98%	6	17%
	21e1	2105	Marais à laiche élevée	2	7	13	271		429.18	-19.7	**158**	64%	87	36%	245	**100%**	0	0%
	21f1	2106	Marais à laiche élevée	2	7	13	271		429.22	-15.9	**166**	68%	79	32%	245	**100%**	0	0%
	21g1	2107	Marais à laiche élevée	2	7	13	271		429.19	-18.3	**166**	68%	79	32%	245	**100%**	0	0%
	2e1	205	Groupement à marisque	2	7	21	272	55	429.38	-1.7	93	38%	114	47%	207	84%	0	0%
	19h1	1908	Marais à laiche élevée	2	7	22	272	420	429.35	-2.3	138	56%	25	10%	163	67%	0	0%
	19i2	1909	Marais à laiche élevée	2	7	22	272	470	429.20	-19.1	**153**	62%	92	38%	245	**100%**	0	0%
	19j1	1910	Marais à laiche élevée	2	7	22	272	500	429.25	-13.1	**153**	62%	92	38%	245	**100%**	0	0%
	21i1	2109	Marais à laiche élevée	2	7	22	272		429.27	-10.5	**166**	68%	69	28%	235	**96%**	0	0%
	21h1	2108	Roselière	2	7	23	272		429.30	-7.1	**172**	70%	43	18%	215	**88%**	0	0%

Tableau 6.1 Typologie globale végétation - nappes - sols (données de la saison végétation)(suite)

Désignation	Code	R No	Unité	Types				Socle	Alt	moy	Inondations avec liaison au lac						sèche	%
				Vég	Nappe	Sols	Global				liés	%	≠ liés	%	Total	%		
Roseaux, laiches	13g1	1307	Marais à laiche élevée	3	6	11	361	150	429.44	7.6	36	15%	76	31%	112	46%	3	9%
élevées en tourradons	12i1	1209	Marais à laiche élevée	3	6	12	361	310	429.45	9.5	36	15%	74	30%	110	45%	0	0%
et semis d'arbustes,	5d1	504	Marais à laiche des rives	3	6	14	361	365	429.73	14.4	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
à eau libre temporaire	12f1	1206	Groupement à massette	3	6	21	362	40	429.43	2.6	25	10%	120	49%	145	59%	2	6%
	12g1	1207	Groupement à massette	3	6	21	362	70	429.44	7.0	36	15%	78	32%	114	47%	0	0%
	12h1	1208	Marais à laiche des rives	3	6	21	362	145	429.43	4.2	25	10%	107	44%	132	54%	0	0%
	30h1	3008	Marais à laiche élevée	3	6	22	362		429.44	5.2	51	21%	43	18%	94	38%	0	0%
	13h2	1308	Marais à laiche élevée	3	6	34	363	190	429.60	22.5	0	0%	1	0%	1	0%	0	0%
	29c1	2903	Groupement à marisque	3	6	34	363		429.76	19.3	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	29g1	2907	Marais à laiche élevée	3	6	34	363		429.52	9.1	0	0%	74	30%	74	30%	1	3%
	29i1	2909	Marais à laiche élevée	3	6	34	363		429.51	12.1	0	0%	11	4%	11	4%	0	0%
	29d1	2904	Marais à laiche élevée	3	6	34	363		429.66	9.9	0	0%	55	22%	55	22%	0	0%
	4f1	406	Marais à laiche élevée	3	7	11	371	220	429.28	-10.2	**115**	47%	109	44%	224	**91%**	0	0%
	5g1	507	Marais à laiche des rives	3	7	13	371		429.49	6.5	0	0%	28	17%	28	17%	0	0%
	5e1	505	Groupement à massette	3	7	22	372	730	429.39	-10.2	0	0%	235	96%	235	96%	0	0%
	9j1	910	Groupement à marisque	3	7	22	372		429.62	-0.7	0	0%	193	79%	193	79%	0	0%
	9k1	911	Marais à laiche élevée	3	7	22	372		429.56	-6.7	0	0%	215	88%	215	88%	0	0%
	19l1	1912	Marais à laiche élevée	3	7	22	372	1210	429.29	-9.6	**146**	60%	96	40%	242	**100%**	0	0%
	19m1	1913	Marais à laiche élevée	3	7	22	372	1210	429.33	-5.4	**153**	63%	55	23%	208	**86%**	0	0%
	23c1	2303	Groupement à marisque	3	7	23	372	80	430.21	-2.9	0	0%	167	68%	167	68%	0	0%
	23d2	2304	Marais à laiche élevée	3	7	23	372	220	429.85	1.2	0	0%	162	66%	162	66%	0	0%
	29e1	2905	Marais à laiche élevée	3	7	34	373		429.50	-1.8	0	0%	170	69%	170	69%	0	0%
Groupements	9o1	915	Groupement à marisque	4	2	13	421		429.67	15.4	0	0%	87	36%	87	36%	0	0%
à marisque	9h1	908	Groupement à marisque	4	2	43	424	395	429.97	29.3	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	16e1	1605	Groupement à marisque	4	4	11	441	80	430.05	1.1	0	0%	90	37%	90	37%	17	49%
	13f1	1306	Groupement à marisque	4	4	12	441	63	429.64	16.4	0	0%	0	0%	0	0%	6	17%
	23e2	2305	Marais à choin	4	4	34	443	445	429.86	24.1	0	0%	66	28%	66	28%	1	3%
	9c1	903	Groupement à marisque	4	5	13	451		430.81	8.1	**0**	0%	117	48%	117	**48%**	5	14%
	9d2	904	Marais à choin	4	5	13	451		430.74	9.9	**0**	0%	96	39%	96	**39%**	7	20%
	4e1	405	Groupement à marisque	4	6	31	463	80	429.52	13.3	**2**	1%	3	1%	5	**2%**	0	0%
	12d1	1204	Groupement à marisque	4	6	33	463	30	429.72	0.8	**0**	0%	85	37%	85	**37%**	14	41%
	12e1	1205	Groupement à marisque	4	6	33	463	35	429.64	4.3	**0**	0%	84	34%	84	**34%**	8	23%

Tableau 6.1 Typologie globale végétation - nappes - sols (données de la saison végétation)(suite)

Désignation	Code	R No	Unité	Types				Socle	Alt	moy	Inondations avec liaison au lac						sèche	%
				Vég	Nappe	Sols	Global				liés	%	≠ liés	%	Total	%		
Groupements à choin et molinie	9m2	913	Prairie à molinie	5	2	22	522		429.77	22.8	0	0%	0	0%	0	0%	1	3%
	30f1	3006	Prairie à molinie	5	2	34	523		429.67	11.3	0	0%	0	0%	0	0%	15	43%
	27g1	2707	Marais à choin	5	2	34	523	320	429.70	31.2	0	0%	5	2%	5	2%	0	0%
	27i1	2709	Marais à choin	5	2	34	523	330	429.71	31.7	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	30g2	3007	Prairie à molinie	5	2	34	523		429.68	29.8	0	0%	1	0%	1	0%	0	0%
	13e1	1305	Prairie à molinie	5	3	31	533	42	429.76	10.9	0	0%	0	0%	0	0%	14	41%
	27f1	2706	Marais à choin	5	3	33	533	215	429.66	33.5	0	0%	2	1%	2	1%	0	0%
	30e1	3005	Marais à petites laiches	5	4	32	543		429.67	23.1	0	0%	0	0%	0	0%	3	9%
	2d1	204	Groupement à marisque	5	6	12	561	31	430.03	3.8	0	0%	69	28%	69	28%	4	11%
	9a1		Marais à choin	5	6	33	563		431.87	10.2	0	0%	0	0%	0	0%	9	33%
	27d2	2704	Marais à choin	5	6	33	563	35	429.56	5.4	0	0%	8	3%	8	3%	11	31%
	19g1	1907	Groupement à marisque	5	6	34	563	360	429.49	8.1	8	3%	4	2%	12	5%	6	17%
	23b1	2302	Prairie à molinie	5	6	42	564	45	429.85	6.7	0	0%	28	11%	28	11%	8	23%
	9i1	909	Groupement à marisque	5	7	22	572		429.55	-1.0	0	0%	195	80%	195	80%	0	0%
	9l1	912	Groupement à marisque	5	7	22	572		429.67	2.5	0	0%	118	48%	118	48%	0	0%
Aulnaies blanches, aulnaies noires	9n1	914	Aulnaie blanche	6	2	34	623		429.68	20.0	0	0%	42	17%	42	17%	0	0%
	27c1	2703	Saulaie de manteau	6	3	42	634	30	429.90	10.4	0	0%	0	0%	0	0%	22	63%
	23f2	2306	Saulaie de manteau	6	3	43	634	420	429.86	39.8	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	10j2	1010	Aulnaie blanche	6	6	13	661	610	429.80	-1.3	0	0%	191	78%	191	78%	0	0%
	10d1		Aulnaie noire	6	7	21	672	47	430.52	4.3	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	10i1	1009	Aulnaie blanche	6	7	22	672	500	429.91	-4.3	0	0%	213	87%	213	87%	0	0%
	9e2	905	Saulaie de manteau	6	9	32	693	320	430.82	46.2	0	0%	27	11%	27	11%	0	0%
Saulaies de manteau	5i1	509	Saulaie de manteau	7	1	41	714		430.00	58.6	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	9p1		Saulaie perturbée	7	1	41	714		429.79	38.6	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	12j1	1210	Saulaie de manteau	7	1	41	714	320	429.83	47.5	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	21j1	2110	Saulaie perturbée	7	1	43	714		429.73	42.8	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	27h1	2708	Saulaie de manteau	7	1	43	714	340	429.84	46.5	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	29h1	2908	Saulaie de manteau	7	1	43	714		429.75	35.3	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	4c1	403	Saulaie de manteau	7	2	42	724	105	429.77	21.6	0	0%	0	0%	0	0%	5	14%
	30d2	3004	Saulaie de manteau	7	3	43	734		429.82	47.0	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	19n1	1914	Saulaie perturbée	7	6	13	761	1230	429.59	24.3	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	5c2	503	Saulaie de manteau	7	6	14	761	205	429.71	5.4	0	0%	88	46%	88	46%	0	0%
	16f2	1606	Saulaie de manteau	7	9	42	794	60	429.82	25.9	0	0%	0	0%	0	0%	15	43%
	19f2	1906	Saulaie de manteau	7	9	43	794	350	429.87	30.4	0	0%	0	0%	0	0%	7	20%

Tableau 6.1 Typologie globale végétation - nappes - sols (données de la saison végétation)(suite)

Désignation	Code	R No	Unité	Types				Socle	Alt	moy	Inondations avec liaison au lac						sèche	%
				Vég	Nappe	Sols	Global				liés	%	≠ liés	%	Total	%		
Ripisylves de transition de lac	13d1	1304	Ripisylve de transition, faciès à pin	8	1	42	814	27	430.44	21.0	0	0%	0	0%	0	0%	20	57%
	21a1	2101	Ripisylve de transition, plantation	8	1	42	814	40	431.53	12.3	0	0%	0	0%	0	0%	23	66%
	2c1	203	Ripisylve de transition	8	1	51	815	29	430.55	26.1	0	0%	0	0%	0	0%	15	43%
	5b1		Ripisylve de transition, plantation	8	2	43	824	310	430.07	29.2	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	19a2	1901	Ripisylve de transition	8	4	42	844	110	432.62	17.3	0	0%	0	0%	0	0%	6	17%
	19b2	1902	Ripisylve de transition	8	4	42	844	130	432.35	28.5	0	0%	0	0%	0	0%	3	9%
	5a1	501	Ripisylve de transition, plantation	8	8	43	884	515	430.77	69.2	0	0%	0	0%	0	0%	5	14%
	29a2	2901	Ripisylve de transition, plantation	8	8	43	884		430.15	53.3	0	0%	0	0%	0	0%	7	20%
	29b1	2902	Ripisylve de transition	8	8	43	884		430.24	61.0	0	0%	0	0%	0	0%	7	20%
	30b2	3002	Ripisylve de transition	8	8	52	885		430.29	69.5	0	0%	0	0%	0	0%	6	18%
	9g1	907	Ripisylve de transition	8	9	43	894	390	430.09	27.0	0	0%	3	1%	3	1%	9	26%
	19d2	1904	Ripisylve de transition	8	9	43	894	360	431.10	24.0	0	0%	0	0%	0	0%	13	38%
	9f1	906	Ripisylve de transition	8	9	52	895	460	430.80	68.0	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	30c2	3003	Ripisylve de transition	8	9	52	895		429.86	44.2	0	0%	11	5%	11	5%	4	11%
	21c2	2103	Ripisylve de transition	8	10	42	8104		430.64	79.0	0	0%	0	0%	0	0%	13	37%
	16d2	1604	Ripisylve de transition, faciès à pin	8	10	42	8104	70	430.34	19.6	0	0%	0	0%	0	0%	19	54%
	21b1	2102	Ripisylve de transition, plantation	8	10	42	8104	80	430.76	25.4	0	0%	0	0%	0	0%	19	54%
	19c2	1903	Ripisylve de transition	8	10	43	8104	310	431.49	18.5	0	0%	0	0%	0	0%	16	46%
	19c2	1905	Ripisylve de transition	8	10	43	8104	320	430.56	59.2	0	0%	0	0%	0	0%	10	29%
Chênaies Pinède	4b1	402	Chênaie	9	1	42	914	35	430.18	27.9	0	0%	0	0%	0	0%	26	74%
	2b1		Chênaie	9	1	51	915	35	431.74	25.4	0	0%	0	0%	0	0%	7	20%
	23a1	2301	Pinède	9	2	42	924	35	430.58	17.5	0	0%	0	0%	0	0%	10	29%

Légende:

Code code du site
R No numéro du relevé de végétation
Types typologies partielles (végétation, nappes, sols) et globale
Socle prof. jusqu'à la molasse imperméable [m]
Alt altitude [m/mer]

moy profondeur moyenne de la nappe [cm]
liés nombre de jours d'inondation liés au lac
≠ liés nombre de jours d'inondation non liés au lac
% proportion en % (100% = 245 jours)
sèche durée de sécheresse (nombre de semaines)
% durée de sécheresse en % (100% = 35 semaines)

Remarques: - lorsque l'unité n'est pas spécifiée, il s'agit de cm
- les valeurs en caractères gras ont été sélectionnées pour établir les valeurs moyennes du type (cf. 6.3)

Tableau 6.2a Valeurs mi-mensuelles optimales moyennes pour la régulation du niveau du lac

Dates		Tr 02		Tr 04		Tr 05		Tr 09		Tr 12		Tr 13		Tr 16		Tr 19		Tr 21		Tr 23		Tr 27		Tr 29		Tr 30		Moyenne	Min	Max
		JxL	alt.	JxL	alt.	JxL	alt.	JxL	alt.	JxL	alt.	JxL	alt.	JxL	alt.	JxL	alt.	JxL	alt.	JxL	alt.	JxL	alt.	JxL	alt.	JxL	alt.	pondérée		
01.Jan	15.Jan	275	429.36	2208	429.52	670	429.73	2868	429.97	0		1080	429.64	89	430.05	2925	429.35	0		0		913	429.44	500	429.76	1932	429.40	**429.59**	429.35	430.05
16.Jan	31.Jan	275	429.36	2024	429.52	804	429.73	2629	429.97	516	429.64	990	429.64	198	429.52	975	429.35	0		0		913	429.44	600	429.76	4374	429.44	**429.59**	429.35	429.97
01.Feb	15.Feb	275	429.36	1840	429.52	670	429.73	2868	429.97	0		1080	429.64	198	429.52	975	429.34	0		0		913	429.44	500	429.76	3645	429.44	**429.60**	429.34	429.97
16.Feb	29.Feb	250	429.36	2024	429.52	670	429.73	2629	429.97	0		990	429.64	180	429.52	975	429.34	0		0		830	429.44	500	429.76	3645	429.44	**429.60**	429.34	429.97
01.Mar	15.Mar	300	429.36	2208	429.52	1608	429.73	2868	429.97	0		1080	429.64	216	429.52	780	429.33	0		0		996	429.44	1200	429.76	8748	429.44	**429.57**	429.33	429.97
16.Mar	31.Mar	400	429.36	2392	429.52	2144	429.73	3107	429.97	0		1170	429.64	288	429.52	3250	429.35	670	429.37	0		1328	429.44	1600	429.76	9477	429.44	**429.55**	429.35	429.97
01.Apr	15.Apr	330	429.41	2208	429.52	2010	429.73	2868	429.97	400	429.46	1080	429.64	270	429.52	4550	429.35	4355	429.37	0		1079	429.44	1500	429.76	5832	429.44	**429.53**	429.35	429.97
16.Apr	30.Apr	450	429.41	1840	429.52	2010	429.73	2390	429.97	320	429.46	900	429.64	270	429.52	4875	429.35	5025	429.37	0		996	429.44	1500	429.76	5832	429.44	**429.51**	429.35	429.97
01.May	15.May	450	429.41	2024	429.52	2010	429.73	2868	429.97	160	429.46	1080	429.64	270	429.52	4875	429.35	5025	429.37	0		747	429.44	1500	429.76	5103	429.44	**429.52**	429.35	429.97
16.May	31.May	120	429.41	1104	429.52	2144	429.73	1434	429.97	258	429.64	540	429.64	288	429.52	4225	429.35	3350	429.37	0		1328	429.44	1600	429.76	8019	429.44	**429.50**	429.35	429.97
01.Jun	15.Jun	60	429.41	552	429.52	1876	429.73	717	429.97	270	429.72	270	429.64	267	430.05	4875	429.35	3015	429.37	0		1162	429.44	1400	429.76	8748	429.44	**429.49**	429.35	430.05
16.Jun	30.Jun	450	429.41	920	429.52	2010	429.73	1673	429.97	540	429.72	630	429.64	252	429.52	4875	429.35	5025	429.37	0		1079	429.44	1500	429.76	8748	429.44	**429.49**	429.35	429.97
01.Jul	15.Jul	360	429.41	368	429.52	2010	429.73	478	429.97	540	429.72	180	429.64	178	430.05	4875	429.35	5025	429.37	0		1245	429.44	1500	429.76	9477	429.44	**429.47**	429.35	430.05
16.Jul	31.Jul	450	429.41	2656	429.38	2144	429.73	140	429.62	640	429.46	1200	429.60	288	429.52	5200	429.35	5360	429.37	2702	429.85	1328	429.44	1600	429.76	9477	429.44	**429.48**	429.35	429.85
01.Aug	15.Aug	120	429.41	2490	429.38	2010	429.73	60	429.62	1040	429.46	1125	429.60	270	429.52	4875	429.35	5025	429.37	2895	429.85	1245	429.44	1500	429.76	8748	429.44	**429.49**	429.35	429.85
16.Aug	31.Aug	420	429.41	332	429.38	2144	429.73	320	429.62	1280	429.46	1200	429.60	270	429.52	5200	429.35	3685	429.37	3088	429.85	1245	429.44	1600	429.76	11664	429.44	**429.50**	429.35	429.85
01.Sep	15.Sep	360	429.41	498	429.38	1340	429.73	200	429.62	800	429.46	750	429.60	126	429.52	3900	429.35	4020	429.37	1930	429.85	581	429.44	1000	429.76	7290	429.44	**429.48**	429.35	429.85
16.Sep	30.Sep	240	429.41	664	429.38	804	429.73	40	429.62	480	429.46	450	429.60	126	429.52	4550	429.35	4690	429.37	1158	429.85	581	429.44	600	429.76	4374	429.44	**429.45**	429.35	429.85
01.Oct	15.Oct	350	429.36	120	429.25	1876	429.73	0		1040	429.46	1050	429.60	252	429.52	4875	429.35	5025	429.37	1351	429.85	1162	429.44	1400	429.76	10206	429.44	**429.47**	429.25	429.85
16.Oct	31.Oct	250	429.36	184	429.52	2144	429.73	239	429.97	270	429.72	90	429.64	89	430.05	4550	429.35	4690	429.37	0		830	429.44	1600	429.76	11664	429.44	**429.47**	429.35	430.05
01.Nov	15.Nov	375	429.36	2024	429.52	2010	429.73	2629	429.97	80	429.45	990	429.64	979	430.05	1625	429.35	1675	429.37	0		1245	429.44	1500	429.76	8019	429.44	**429.57**	429.35	430.05
16.Nov	30.Nov	325	429.36	1472	429.52	2010	429.73	2868	429.97	0		1080	429.64	267	430.05	1625	429.35	0		0		1079	429.44	1500	429.76	4374	429.44	**429.62**	429.35	430.05
01.Dec	15.Dec	175	429.36	2208	429.52	1340	429.73	2868	429.97	800	429.45	1080	429.64	1068	430.05	4875	429.35	4355	429.37	0		581	429.44	1000	429.76	7290	429.44	**429.53**	429.35	430.05
16.Dec	31.Dec	325	429.36	2392	429.52	1474	429.73	3107	429.97	0		720	429.64	267	430.05	1300	429.35	1340	429.37	0		1079	429.44	800	429.76	729	429.44	**429.63**	429.35	430.05

Légende:

JxL: facteur de pondération (nombre de jours (col. totliés du Tab. 6.1) x longueur inondée à l'altitude considérée)

alt.: altitude minimale du lac permettant d'obtenir le nombre moyen de jours d'inondation du type considéré (cf. texte)

: limites de la période de végétation

Tableau 6.2b Facteurs de pondération pour le calcul des valeurs optimales moyennes: nombre de jours et longueurs inondées

Dates		Tr 02		Tr 04		Tr 05		Tr 09		Tr 12		Tr 13		Tr 16		Tr 19		Tr 21		Tr 23		Tr 27		Tr 29		Tr 30	
		jours	long.	jours	long.	jours	long.	jours	long.	jours	long.	jours	long.	jours	long.	jours	long.	jours	long.	jours	long.	jours	long.	jours	long.	jours	long.
01.Jan	15.Jan	11	25	12	184	5	134	12	239	0		12	90	1	89	9	325	0		0		11	83	5	100	3	644
16.Jan	31.Jan	11	25	11	184	6	134	11	239	2	258	11	90	11	18	3	325	0		0		11	83	6	100	6	729
01.Feb	15.Feb	11	25	10	184	5	134	12	239	0		12	90	11	18	5	195	0		0		11	83	5	100	5	729
16.Feb	29.Feb	10	25	11	184	5	134	11	239	0		11	90	10	18	5	195	0		0		10	83	5	100	5	729
01.Mar	15.Mar	12	25	12	184	12	134	12	239	0		12	90	12	18	4	195	0		0		12	83	12	100	12	729
16.Mar	31.Mar	16	25	13	184	16	134	13	239	0		13	90	16	18	10	325	2	335	0		16	83	16	100	13	729
01.Apr	15.Apr	11	30	12	184	15	134	12	239	5	80	12	90	15	18	14	325	13	335	0		13	83	15	100	8	729
16.Apr	30.Apr	15	30	10	184	15	134	10	239	4	80	10	90	15	18	15	325	15	335	0		12	83	15	100	8	729
01.May	15.May	15	30	11	184	15	134	12	239	2	80	12	90	15	18	15	325	15	335	0		9	83	15	100	7	729
16.May	31.May	4	30	6	184	16	134	6	239	1	258	6	90	16	18	13	325	10	335	0		16	83	16	100	11	729
01.Jun	15.Jun	2	30	3	184	14	134	3	239	1	270	3	90	3	89	15	325	9	335	0		14	83	14	100	12	729
16.Jun	30.Jun	15	30	5	184	15	134	7	239	2	270	7	90	14	18	15	325	15	335	0		13	83	15	100	12	729
01.Jul	15.Jul	12	30	2	184	15	134	2	239	2	270	2	90	2	89	15	325	15	335	0		15	83	15	100	13	729
16.Jul	31.Jul	15	30	16	166	16	134	7	20	8	80	16	75	16	18	16	325	16	335	14	193	16	83	16	100	13	729
01.Aug	15.Aug	4	30	15	166	15	134	3	20	13	80	15	75	15	18	15	325	15	335	15	193	15	83	15	100	12	729
16.Aug	31.Aug	14	30	2	166	16	134	16	20	16	80	16	75	15	18	16	325	11	335	16	193	15	83	16	100	16	729
01.Sep	15.Sep	12	30	3	166	10	134	10	20	10	80	10	75	7	18	12	325	12	335	10	193	7	83	10	100	10	729
16.Sep	30.Sep	8	30	4	166	6	134	2	20	6	80	6	75	7	18	14	325	14	335	6	193	7	83	6	100	6	729
01.Oct	15.Oct	14	25	12	10	14	134	0		13	80	14	75	14	18	15	325	15	335	7	193	14	83	14	100	14	729
16.Oct	31.Oct	10	25	1	184	16	134	1	239	1	270	1	90	1	89	14	325	14	335	0		10	83	16	100	16	729
01.Nov	15.Nov	15	25	11	184	15	134	11	239	1	80	11	90	11	89	5	325	5	335	0		15	83	15	100	11	729
16.Nov	30.Nov	13	25	8	184	15	134	12	239	0		12	90	3	89	5	325	0		0		13	83	15	100	6	729
01.Dec	15.Dec	7	25	12	184	10	134	12	239	10	80	12	90	12	89	15	325	13	335	0		7	83	10	100	10	729
16.Dec	31.Dec	13	25	13	184	11	134	13	239	0		8	90	3	89	4	325	4	335	0		13	83	8	100	1	729

Légende:

jours: nombre de jours d'inondation directe nécessaire pour le site considéré

long.: longueur inondée (du site au lac) pour une altitude ≤ à celle du site considéré

Tableau 6.3 Indices de satisfaction des besoins en inondation en fonction du niveau du lac

Altitude du lac	428.40	428.50	428.80	428.90	428.95	429.00	429.10	429.15	429.20	429.30	429.34	429.38	429.40	429.45		429.47		429.50		429.55	
	net	net	net	net	net	net	net	net	net	net	net	net	net	net	pond	net	pond	net	pond	net	pond
01.Jan 15.Jan	0.60	0.60	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66	0.67	0.69	0.74	0.76	0.80	0.81	0.81	0.82	0.81	0.83	0.80	0.84	0.77	0.86
16.Jan 31.Jan	0.57	0.57	0.60	0.61	0.62	0.62	0.64	0.65	0.66	0.71	0.73	0.76	0.79	0.82	0.83	0.82	0.84	0.80	0.84	0.78	0.87
01.Feb 15.Feb	0.56	0.57	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64	0.65	0.71	0.73	0.76	0.79	0.82	0.83	0.82	0.84	0.80	0.84	0.77	0.86
16.Feb 29.Feb	0.56	0.56	0.58	0.59	0.60	0.61	0.63	0.63	0.65	0.70	0.72	0.75	0.77	0.81	0.82	0.81	0.83	0.79	0.83	0.77	0.86
01.Mar 15.Mar	0.59	0.59	0.61	0.63	0.63	0.64	0.66	0.67	0.68	0.73	0.75	0.78	0.80	0.83	0.84	0.82	0.84	0.81	0.85	0.78	0.87
16.Mar 31.Mar	0.42	0.42	0.44	0.45	0.46	0.47	0.49	0.51	0.52	0.61	0.71	0.76	0.78	0.82	0.83	0.82	0.84	0.80	0.84	0.77	0.86
01.Apr 15.Apr	0.35	0.35	0.38	0.39	0.40	0.41	0.43	0.44	0.46	0.55	0.65	0.73	0.76	0.80	0.81	0.80	0.82	0.81	0.85	0.78	0.87
16.Apr 30.Apr	0.34	0.34	0.37	0.38	0.39	0.40	0.42	0.43	0.45	0.54	0.64	0.73	0.76	0.80	0.81	0.80	0.82	0.81	0.85	0.78	0.87
01.May 15.May	0.36	0.36	0.39	0.40	0.41	0.42	0.44	0.45	0.47	0.55	0.66	0.74	0.77	0.81	0.82	0.81	0.83	0.81	0.85	0.78	0.87
16.May 31.May	0.35	0.35	0.37	0.38	0.39	0.40	0.42	0.44	0.46	0.55	0.64	0.69	0.70	0.75	0.76	0.76	0.78	0.77	0.81	0.74	0.83
01.Jun 15.Jun	0.32	0.32	0.34	0.35	0.36	0.37	0.39	0.40	0.42	0.51	0.62	0.66	0.68	0.72	0.73	0.75	0.77	0.76	0.80	0.74	0.83
16.Jun 30.Jun	0.28	0.29	0.31	0.32	0.33	0.34	0.36	0.37	0.39	0.48	0.58	0.67	0.71	0.75	0.76	0.78	0.80	0.79	0.83	0.77	0.86
01.Jul 15.Jul	0.25	0.25	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.34	0.35	0.44	0.54	0.63	0.67	0.72	0.73	0.74	0.76	0.75	0.79	0.73	0.82
16.Jul 31.Jul	0.22	0.23	0.25	0.26	0.27	0.28	0.30	0.32	0.33	0.42	0.53	0.61	0.65	0.70	0.71	0.72	0.74	0.73	0.77	0.71	0.80
01.Aug 15.Aug	0.22	0.22	0.24	0.26	0.27	0.27	0.30	0.31	0.33	0.42	0.52	0.61	0.64	0.68	0.69	0.72	0.74	0.73	0.77	0.71	0.80
16.Aug 31.Aug	0.23	0.23	0.26	0.27	0.28	0.28	0.31	0.32	0.34	0.43	0.53	0.57	0.60	0.66	0.67	0.70	0.72	0.71	0.75	0.69	0.78
01.Sep 15.Sep	0.28	0.28	0.31	0.32	0.33	0.34	0.36	0.38	0.39	0.48	0.51	0.57	0.61	0.66	0.67	0.70	0.72	0.71	0.75	0.69	0.78
16.Sep 30.Sep	0.31	0.31	0.33	0.35	0.36	0.36	0.38	0.39	0.40	0.49	0.52	0.57	0.62	0.66	0.67	0.71	0.73	0.72	0.76	0.70	0.79
01.Oct 15.Oct	0.44	0.44	0.47	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.61	0.63	0.66	0.68	0.72	0.73	0.76	0.78	0.77	0.81	0.75	0.84
16.Oct 31.Oct	0.41	0.42	0.44	0.45	0.46	0.47	0.49	0.50	0.52	0.59	0.61	0.64	0.66	0.71	0.72	0.75	0.77	0.76	0.80	0.74	0.83
01.Nov 15.Nov	0.56	0.57	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64	0.65	0.70	0.72	0.75	0.76	0.79	0.80	0.79	0.81	0.78	0.82	0.75	0.84
16.Nov 30.Nov	0.63	0.63	0.65	0.67	0.67	0.68	0.70	0.71	0.72	0.77	0.79	0.82	0.83	0.84	0.85	0.84	0.86	0.82	0.86	0.79	0.88
01.Dec 15.Dec	0.46	0.46	0.48	0.50	0.50	0.51	0.53	0.54	0.55	0.61	0.63	0.66	0.68	0.73	0.74	0.75	0.77	0.74	0.78	0.72	0.81
16.Dec 31.Dec	0.61	0.61	0.64	0.65	0.66	0.66	0.68	0.69	0.70	0.76	0.78	0.81	0.82	0.83	0.84	0.83	0.85	0.81	0.85	0.78	0.87
Valeurs annuelles																					
Moyenne	**0.41**	**0.42**	**0.44**	**0.45**	**0.46**	**0.47**	**0.49**	**0.50**	**0.51**	**0.59**	**0.65**	**0.70**	**0.72**	**0.76**	0.77	**0.78**	0.80	**0.77**	0.81	**0.75**	0.84
Min	0.22	0.22	0.24	0.26	0.27	0.27	0.30	0.31	0.33	0.42	0.51	0.57	0.60	0.66	0.67	0.70	0.72	0.71	0.75	0.69	0.78
Max	0.63	0.63	0.65	0.67	0.67	0.68	0.70	0.71	0.72	0.77	0.79	0.82	0.83	0.84	0.85	0.84	0.86	0.82	0.86	0.79	0.88
Valeurs de la saison de végétation																					
Moyenne	**0.30**	**0.31**	**0.33**	**0.34**	**0.35**	**0.36**	**0.38**	**0.39**	**0.41**	**0.50**	**0.58**	**0.65**	**0.68**	**0.73**	0.74	**0.75**	0.77	**0.76**	0.80	**0.74**	0.83
Min	0.22	0.22	0.24	0.26	0.27	0.27	0.30	0.31	0.33	0.42	0.51	0.57	0.60	0.66	0.67	0.70	0.72	0.71	0.75	0.69	0.78
Max	0.44	0.44	0.47	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.61	0.66	0.74	0.77	0.81	0.82	0.81	0.83	0.81	0.85	0.78	0.87

Tableau 6.3 Indices de satisfaction des besoins en inondation en fonction du niveau du lac (suite)

Altitude du lac	429.60		429.70		429.77		429.80		429.88		429.90		430.00		430.20		430.60		430.90		432.20	
	net	pond	net	pond	net	pond	net	pond	net	pond	net	pond	net	pond	net	pond	net	pond	net	pond	net	pond
01.Jan 15.Jan	0.69	0.85	0.50	0.83	0.37	0.81	0.32	0.80	0.21	0.78	0.18	0.77	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
16.Jan 31.Jan	0.70	0.86	0.50	0.83	0.37	0.81	0.32	0.80	0.21	0.78	0.18	0.77	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
01.Feb 15.Feb	0.69	0.85	0.50	0.83	0.37	0.81	0.32	0.80	0.21	0.78	0.18	0.77	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
16.Feb 29.Feb	0.69	0.85	0.50	0.83	0.37	0.81	0.32	0.80	0.21	0.78	0.18	0.77	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
01.Mar 15.Mar	0.70	0.86	0.51	0.84	0.38	0.82	0.33	0.81	0.22	0.79	0.19	0.78	0.14	0.77	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
16.Mar 31.Mar	0.70	0.86	0.50	0.83	0.37	0.81	0.32	0.80	0.21	0.78	0.18	0.77	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
01.Apr 15.Apr	0.70	0.86	0.51	0.84	0.38	0.82	0.33	0.81	0.22	0.79	0.19	0.78	0.14	0.77	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
16.Apr 30.Apr	0.70	0.86	0.51	0.84	0.38	0.82	0.33	0.81	0.22	0.79	0.19	0.78	0.14	0.77	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
01.May 15.May	0.70	0.86	0.51	0.84	0.37	0.81	0.33	0.81	0.22	0.79	0.19	0.78	0.14	0.77	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
16.May 31.May	0.67	0.83	0.49	0.82	0.37	0.81	0.32	0.80	0.21	0.78	0.18	0.77	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
01.Jun 15.Jun	0.67	0.83	0.49	0.82	0.36	0.80	0.31	0.79	0.20	0.77	0.17	0.76	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
16.Jun 30.Jun	0.69	0.85	0.51	0.84	0.38	0.82	0.33	0.81	0.22	0.79	0.19	0.78	0.14	0.77	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
01.Jul 15.Jul	0.66	0.82	0.48	0.81	0.36	0.80	0.31	0.79	0.20	0.77	0.17	0.76	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
16.Jul 31.Jul	0.64	0.80	0.45	0.78	0.32	0.76	0.28	0.76	0.18	0.75	0.16	0.75	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
01.Aug 15.Aug	0.63	0.79	0.44	0.77	0.31	0.75	0.27	0.75	0.18	0.75	0.16	0.75	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
16.Aug 31.Aug	0.62	0.78	0.44	0.77	0.31	0.75	0.27	0.75	0.18	0.75	0.16	0.75	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
01.Sep 15.Sep	0.62	0.78	0.44	0.77	0.31	0.75	0.27	0.75	0.18	0.75	0.16	0.75	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
16.Sep 30.Sep	0.62	0.78	0.44	0.77	0.31	0.75	0.27	0.75	0.18	0.75	0.16	0.75	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
01.Oct 15.Oct	0.67	0.83	0.48	0.81	0.35	0.79	0.31	0.79	0.20	0.77	0.17	0.76	0.14	0.77	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
16.Oct 31.Oct	0.67	0.83	0.49	0.82	0.36	0.80	0.31	0.79	0.20	0.77	0.17	0.76	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
01.Nov 15.Nov	0.68	0.84	0.49	0.82	0.36	0.80	0.31	0.79	0.20	0.77	0.17	0.76	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
16.Nov 30.Nov	0.71	0.87	0.51	0.84	0.37	0.81	0.32	0.80	0.21	0.78	0.18	0.77	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
01.Dec 15.Dec	0.64	0.80	0.48	0.81	0.35	0.79	0.31	0.79	0.20	0.77	0.17	0.76	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
16.Dec 31.Dec	0.70	0.86	0.50	0.83	0.36	0.80	0.32	0.80	0.21	0.78	0.18	0.77	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
Valeurs annuelles																						
Moyenne	**0.67**	0.83	**0.49**	0.82	**0.36**	0.80	**0.31**	0.79	**0.20**	0.77	**0.18**	0.77	**0.13**	0.76	**0.10**	0.76	**0.11**	0.77	**0.04**	0.75	**0.00**	0.74
Min	0.62	0.78	0.44	0.77	0.31	0.75	0.27	0.75	0.18	0.75	0.16	0.75	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
Max	0.71	0.87	0.51	0.84	0.38	0.82	0.33	0.81	0.22	0.79	0.19	0.78	0.14	0.77	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
Valeurs de la saison de végétation																						
Moyenne	**0.66**	0.82	**0.48**	0.81	**0.35**	0.79	**0.30**	0.78	**0.20**	0.77	**0.17**	0.76	**0.13**	0.76	**0.10**	0.76	**0.11**	0.77	**0.04**	0.75	**0.00**	0.74
Min	0.62	0.78	0.44	0.77	0.31	0.75	0.27	0.75	0.18	0.75	0.16	0.75	0.13	0.76	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74
Max	0.70	0.86	0.51	0.84	0.38	0.82	0.33	0.81	0.22	0.79	0.19	0.78	0.14	0.77	0.10	0.76	0.11	0.77	0.04	0.75	0.00	0.74

Légende: net: indice résultant de la Σ des valeurs positives (*Phragmition + Magnocaricion*) - la Σ des valeurs négatives (*Caricion davallianae + Molinion*)
pond: idem, mais pondération des valeurs par les longueurs respectives des groupements

7 BIBLIOGRAPHIE

Aebischer, A., (1993) Einfluss des Wasserstandsschwankungen des Neuenburgersees auf den Bruterfolg von schilfbewohnenden Singvögeln. Schlussbericht. Resultate der Jahre 1990 bis 1993. Auftrag des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Berne.

Aeschimann, D. & Burdet, H., (1989) Flore de la Suisse, Le nouveau Binz. Ed. Griffon, Neuchâtel, 597 p.

Affolter, F., Auroi, Ch. et Matthey, W., (1981) La biocénose des habitats larvaires de Hybomitra bimaculata (Macquart)(Diptera, Tabanidae). *Revue suisse zool.* 88(4): 965-975.

Ammann-Moser, B., (1975) Vegetationskundliche und pollenanalytische Untersuchungen auf dem Heidenweg im Bielersee. *Beitr. Geobot. Landesaufn. Schweiz* 56, 76 p.

Antoniazza, M., (1979): Les oiseaux nicheurs des marais non boisés de la rive sud du lac de Neuchâtel. Travail de licence, Université de Neuchâtel, Institut de zoologie, 138 p.

Antoniazza, V., (1980) Régime alimentaire et autres facteurs d'isolement écologique de trois passereaux nicheurs du marais. Travail de licence, Université de Neuchâtel, Institut de zoologie, 53 p.

Antoniazza, M., Beguin, C., Hegg, O., Müller, H.-U. et Zoller, H., (1980 a) Biogéographie appliquée à la région du lac de Neuchâtel, estimation de la valeur naturelle des écosystèmes riverains. *Bull. Soc. Neuchâteloise de Géographie* 25: 21-50.

Antoniazza, M., Beguin, C., Hegg, O., Müller, H.-U. et Zoller, H., (1980 b) Indices biocénotiques pour l'évaluation de la valeur des écosystèmes dans la région des trois lacs subjurassiens. *Sémin. phytosociologie appliquée*, Metz.

Aquarius, (1993) Effets de la deuxième correction des eaux du Jura sur la faune piscicole. Rapport du bureau Aquarius, Neuchâtel, sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage.

Auroi, Ch., (1986) Comportement des mâles de Hybomitra muehlfeldi Macquart (Diptera, Tabanidae). *Bull. Soc. entomol. suisse* 59: 303-314.

Auroi, Ch. et Graf-Jaccottet, M., (1985) Modèle de prédiction du nombre de captures de Haematopota pluvialis (L) (Diptera, Tabanidae) d'après la date et les conditions météorologiques en plaine et en montagne. *Acta Oecologica. Oecol. Gener.* 6(2): 179-194.

Baize, D. & Girard, M.-C., (1992) Référentiel pédologique, principaux sols d'Europe. A.F.E.S., Inst. nat. Rech. agron., Paris (INRA), 222 p.

Becker, F., (1973) Atlas géologique de la Suisse, carte 1165 "Morat" et notice explicative. Commission Géol. Suisse.

Berset, J., (1949/50) La végétation de la réserve de Cheyres et des rives avoisinantes du lac de Neuchâtel. *Bull. Soc. Frib. Sc. Nat.* 40: 65-94.

Binz, H.-R., (1980) Der Schilfrückgang - ein Ingenieurproblem ? *Verb. z. Schutze Land.* 53: 35-52.

Bouet, M., (1985) Climat et météorologie de la Suisse romande. Ed. Payot, Lausanne, 171 p.

Brancucci, M., (1979) Considérations sur la faune des Dytiscidae de la grève de Cudrefin (VD) (Insecta, Coleoptera). *Bull. Vaud. Sc. nat.* 24: 301-311.

Bueche, M., Buttler, A., Cornali, Ph., Perrochet, P., (1994) Effects of water level regulation of lake Neuchâtel (Switzerland) on the shore wetlands: mathematical modelling of groundwater-lakewater interactions. *Proceedings of the International Symposium "Conservation and Management of Fens"*, 6th-10th June 1994, Poland: 201-212.

Bueche M., (en prép.) Ecologie des forêts feuillues de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse). Thèse de doctorat Université de Neuchâtel.

Buttler, A., (1983) La rive sud du lac de Neuchâtel. *Bull. Groupe Travail p. l'Enseignement de l'Ecologie - ECO-Informations* 8: 1-16.

Buttler, A., (1985) Species and community responses to mowing in swamps; a contribution from marshes on the south bank of lake Neuchâtel (Switzerland). *Studies in Plant Ecology* 16: 18-19.

Buttler, A., (1987) Etude écosystémique des marais non boisés de la rive sud du lac de Neuchâtel. Thèse Université de Neuchâtel, 284 p.

Buttler, A., (1990) Quelques aspects climatiques dans les marais non boisés de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse). *Bull. Soc. neuchâtel. Sc. nat.* 113: 217-230.

Buttler, A., (1992) Hydrochimie des nappes des prairies humides de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse). *Bull. Ecol.* 23 (1-2): 35-47.
Buttler, A., Bueche, M., Cornali, Ph. et Gobat, J.-M., (1985) Historischer und ökologischer Ueberblick über das Südostufer des Neuenburger Sees. *Telma (Hannover)* 15: 31-42.
Buttler, A. & Gallandat, J.-D., (1989) Phytosociologie des prairies humides de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse) et modèle de succession autogène. *Phytocoenologia* 18 (1): 129-158.
Buttler, A. & Gobat, J.-M., (1991) Les sols hydromorphes des prairies humides de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse). *Bull. Ecol.*, 22 (3-4): 405-418.
Clerc C., (en prép.) Révision de la cartographie de la rive sud du lac de Neuchâtel. Groupe d'étude et de gestion, Cheseaux-Noréaz.
Cornali, Ph., (1992) Ecologie des pinèdes *(Pinus silvestris)* de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse). Thèse Université de Neuchâtel, 240 p.
Cuccodoro, S., (1990) Etude géophysique et commentaires hydrologiques rive sud du lac de Neuchâtel. Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Rapport établi pour l'Institut de Botanique de l'Université de Neuchâtel.
Dorthe, C., (1986) Etude synécologique de la faune d'Invertébrés sur les rives du lac de Neuchâtel, II. Les indices de diversité et leur rapport avec les associations végétales des prairies marécageuses. Univ. Fribourg, Institut de zoologie, travail de diplôme non publié, 80 p.
Duchaufour, Ph., (1983) Pédologie, t.1. Pédogenèse et classification. Masson, Paris, 477 p.
Egloff, Th., (1986) Auswirkungen und Beseitigung von Düngungseinflüssen auf Streuwiesen. Diss. ETH No. 8045, Zürich, 183 p.
Ellenberg, H. & Kloetzli, F., (1972) Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. *Mitt. Schweiz. Anst. Forst. Versuchsw.* 48 (4): 589-930.
Enggist, M., (1994) Modèle hydrodynamique et relation avec la végétation dans le marais du secteur de Portalban (FR) - Cudrefin (VD). Travail de diplôme , Université de Lausanne, 118 p.
Foucault de, B., (1986) Petit manuel d'initiation à la phytosociologie sigmatiste. Société linnéenne du nord de la France, Amiens, 51 p.
Gallandat, J.-D., Gobat, J.-M. & Roulier, C., (1993) Cartographie des zones alluviales d'importance nationale. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, *Cahier de l'environnement* 199, 112 p. + annexes.
Gapany, N., (1986) Etude synécologique de la faune d'Invertébrés sur les rives du lac de Neuchâtel, I. Les distributions d'abondances et leur rapport avec les associations végétales des prairies marécageuses. Univ. Fribourg, Institut de zoologie, travail de diplôme non publié, 89 p.
GEG, (1987) Journal des Grèves. *Bull. Info. Gestion Grande Cariçaie* 10, avril 1987.
Gillet, F., de Foucault, B. & Julve, P., (1991) La phytosociologie synusiale intégrée: objets et concepts. *Candollea* 46: 315-340.
Girardet, A., (1926) La végétation du lac de Neuchâtel. Publ. int. Université de Lausanne.
Gobat, J.-M., Roulier, Ch., Schuler, B., (1980) Valeur naturelle des rives du lac de Neuchâtel (Suisse). *Colloques phytosociol. IX, "Les forêts alluviales", Strasbourg*: 627-632.
Gratier, M., (1980) Les sols du plateau vaudois. *Mém. Soc. vaudoise Sc. nat.* 16(3), 188 p.
Grootjans, A. & Van Diggelen, R., (1995) Assessing the restoration prospects of degraded fens, in: Restoration of Temperate Wetlands (Edited by B. Wheeler, S. Shaw, W. Fojt and R. Robertson), John Wiley & Sons: 73-90.
Grünig, A., (1980) Unsere Seeufer in Vergangenheit und Gegenwart. *Verb. z. Schutze Land.* 53: 15-34.
Guinochet, M., (1973) Phytosociologie. Ed. Masson, Paris, 227 p.
Haenni, J.-P., (1980) Contribution à la connaissance de la biologie des papillons aquatiques (Lepidoptera, Pyraloidea) sur la rive sud du lac de Neuchâtel. *Bull. Soc. neuchâtel. Sc. nat.* 103: 29-43.
Huber, A., (1993) Ufererosion am Neuenburgersee. *Actes du colloque « Seeufer-zerstörung und Seeuferrenaturierung in Mitteleuropa », Konstanz 1992*: 94-102.
Imhof, E., (1965/68) Atlas de la Suisse. Ed. Serv. topogr. féd., Wabern-Berne.
Jaton, J.-F., (1989) IIe Correction des eaux du Jura. Effets du règlement 1980-82 de régulation des lacs en matière hydro-agricole. Institut de Génie rural - Hydrologie et aménagements, EPFL, Lausanne.

Kadlec, R.H. & Kadlec J.A., (1979) Wetlands and water quality. Wetland Functions and Values: The State of Our Understanding (eds. P.E. Greeson, J.R. Clark & J.E. Clark). American Water Resources Association, Minneapolis, Minnesota: 436-456

Keller, L., (1969/70) Etude des groupements végétaux de la réserve de Cheyres. *Bull. Soc. Frib. Sc. Nat.* 59: 47-59.

Kloetzli, F., (1969) Die Grundwasserbeziehungen der Streu- und Moorwiesen im nördlichen Schweizer Mittelland. *Beitr. Geobot. Land. Schweiz* 52, 296 p.

Kloetzli, F., (1972) Grundsätzliches zur Systematik von Pflanzengesellschaften. *Ber. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich* 41: 35-47.

Koch, W., (1926) Die Vegetationseinheiten der Linthebene, unter Berücksichtigung der Verhältnisse in der Nordostschweiz. *Jb. natw. Ges. St.-Gallen* 61, 144 p.

Koerselman, W. & Verhoeven, J. T. A., (1995) Eutrophication of fen ecosystems: external and internal nutrient sources and restoration strategies, in: Restoration of Temperate Wetlands (Edited by B. Wheeler, S. Shaw, W. Fojt and R. Robertson), John Wiley & Sons: 91-112.

LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES DE L'EPFZ, (1990) Rapport no 956/1F. *Erosion de la rive sud du lac de Neuchâtel. Examen des causes, prévision de l'évolution future, recommandations sur les mesures à prendre.* Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich.

LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES DE L'EPFZ, (1993) Rapport no 956/2F. Erosion de la rive sud du lac de Neuchâtel. Rapport final. Laboratoire de recherches hydauliques, hydrologiques et glaciologiques de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich.

Lachavanne J.-B., (1982) Liste des macrophytes du lac de Neuchâtel. Rapport non publié de l'Unité de biologie aquatique de l'Université de Genève.

Lachavanne, J.-B., Perfetta, J., Noetzlin, A., Juge, R. et Lods-Crozet, B., (1986) Etude chorologique et écologique des macrophytes des lacs suisses en fonction de leur altitude et de leur niveau trophique. Rapport FNRS de l'Unité de biologie aquatique de l'Université de Genève.

Landolt, E., (1977) Oekologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. *Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich* 64, 208 p.

Lang, G., (1973) Die Vegetation des westlichen Bodenseegebietes. Pflanzensoziologie 17. Gustav Fischer Verlag, Jena, 451 p.

Legendre, L. & Legendre, P., (1984) Ecologie numérique t.1, 2. Ed.Masson, 260 p, 335 p.

Legendre, P. & Vaudor, A., (1985 / 1991) Le progiciel R. - Analyse multidimensionnelle, analyse spatiale. Département des sciences biologiques, Université de Montréal, 144 p.

Le Nédic, C., (en prép.) Contribution à la connaissance de l'embroussaillement dans les zones humides (titre provisoire). Thèse de doctorat à l'Institut de botanique de l'Université de Lausanne.

Le Nédic, C., Mülhauser, B., Antoniazza, M., (in press.) Gestion de la Grande Cariçaie II. Surveillance scientifique des effets de l'entretien sur la flore et la faune, in: «Manuel de conservation des marais en Suisse», édité par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).

Leon, R., (1968) Balance d'eau et d'azote dans les prairies à litière des alentours de Zürich. *Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich* 41: 2-67.

LSPN, (1979 a) Etude no 2: Urgence de l'entretien des prairies à laiches - état de l'embroussaillement. Groupe de travail Rives du lac de Neuchâtel (auteur: Roulier, Ch.), 11p.

LSPN, (1979 b) Etude no 3: Valeur écologique des forêts et recommandations pour leur entretien. Groupe de travail Rives du lac de Neuchâtel (auteur: Roulier, Ch.).

LSPN, (1979 c) Etude no 5: Essais de fauchage des prairies à laiches de la rive sud du lac de Neuchâtel. Groupe de travail Rives du lac de Neuchâtel (auteurs: Roulier, Ch. et Antoniazza, M.), 31 p.

LSPN, (1979 d) Etude no 7: Valeur naturelle des rives et de l'arrière-pays du lac de Neuchâtel. Groupe de travail Rives du lac de Neuchâtel (auteurs: Müller, H.-U. et Antoniazza, M.), 42 p.

LSPN, (1979 e) Etude no 11: Réaménagement de la baie d'Ostende - propositions. Groupe de travail Rives du lac de Neuchâtel (auteur: M. Antoniazza), 14 p.

LSPN, (1979 f) Etude no 12: Impact et accueil du public dans les marais de la rive sud du lac de Neuchâtel. Groupe de travail Rives du lac de Neuchâtel (auteurs: Roulier, Ch. et Antoniazza, M.).

LSPN, (1980) Etude no 10: Etude préliminaire de l'érosion de la rive sud du lac de Neuchâtel. Groupe de travail Rives du lac de Neuchâtel (auteurs: Roulier, Ch.), 21 p.

LSPN, (1981) Etude no 16: Réaménagement de l'embouchure de l'Arnon - propositions. Groupe de travail Rives du lac de Neuchâtel (auteur: A. Piguet), 4 p.

LSPN, (1989) Cartographie de la végétation des forêts des Côtes du Lac , propriété de la ville d'Yverdon. Gestion des zones naturelles de la rive sud du lac de Neuchâtel, rapport no 11. Groupe d'étude et de gestion, Cheseaux-Noréaz (auteurs: Roulier, C.)

LSPN, (1991) Suivi de la végétation aquatique des étangs de Font (1988-1992). Rapport intermédiaire 1990, Rapport no 22. Gestion des zones naturelles de la rive sud du lac de Neuchâtel. Groupe d'étude et de gestion, Cheseaux-Noréaz (auteur: Oïhénart C. et Perfetta, J.).

LSPN, (1993) Colonisation des étangs de Font par la végétation de 1988 à 1992. Gestion des zones naturelles de la rive sud du lac de Neuchâtel, rapport no 22. Groupe d'étude et de gestion, Cheseaux-Noréaz (auteur: Oïhénart, C. et Perfetta, J.).

LSPN, (1994) Programme général de surveillance scientifique, rapport de gestion no 29. Groupe d'étude et de gestion, Champ-Pittet, Cheseaux-Noréaz (auteur: C. Le Nédic).

LSPN/WWF, (1980) Plan de protection de la rive sud-est du lac de Neuchâtel, 97 p.

Luedi, W., (1935) Das grosse Moos im westschweizerischen Seelande und die Geschichte seiner Entstehung. *Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich* 11, 344 p.

Marti, K., (1994) Zum Standort von Magnocaricion-Gesellschaften in der Schweiz *(Caricetum elatae, Caricetum paniculatae, Caricetum ripariae, Caricetum vesicariae). Veröff. Geobot. Inst. ETH, Zürich*, 120, 97 p.

Meyer, D., Antoniazza, V., Bourdier, J.-C. et Roulier, Ch., (1982) Les incendies dans la Grande Cariçaie - étude d'impact sur la flore et la faune. Institut de Zoologie, Université de Fribourg, 30 p.

Moor, M., (1958) Pflanzengesellschaften schweizerischer Flussauen. *Mitt. Schweiz. Anst. Forst. Versuchsw.*, 34 (4): 221-360.

Mueckenhausen, E., (1985) Die Bodenkunde (3ème éd.). DLG Verlag, Frankfurt am Main, 579 p.

Müller, R., (1959) Die II. Juragewässerkorrektion. La IIème correction des eaux du Jura. Commission intercantonale des travaux.

Müller, R., (1973) Les niveaux des lacs du Jura. in: Schwab, H., (1973) Die Vergangenheit des Seelandes in neuem Licht. Ed. Universitaires, Fribourg: 155-176

Müller, H.-U. et al., (1977) L'importance de la région du lac de Neuchâtel au point de vue de la protection de la nature. Sect. d'Ethologie et de recherche sur la faune sauvage de l'Institut de zoologie de l'Université de Zürich, 52p.

Mülhauser, B., (1989) Les peuplements d'arthropodes épiédaphiques de la rive sus-est du lac de Neuchâtel. Travail de licence, Institut de zoologie, Université de Neuchâtel.

Mülhauser, B. et Clerc, C., (1989) Gestion de la Grande Cariçaie I. Objectifs généraux, moyens d'intervention, problèmes pratiques et persperctives après dix années d'expérience, in: «Manuel de conservation des marais en Suisse», édité par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).

Naiman, R.J. & Décamps, H., (1990) The ecology and management of aquatic-terrestrial ecotones. Unesco Man and the Biosphere Series 4, The Parthenon Publ. Group.

Niemann, E., (1963) Beziehungen zwischen Vegetation und Grundwasser. Ein Beitrag zur Präzisierung des ökologischen Zeigerwertes von Pflanzen und Pflanzengesellschaften. *Arch. Nat. schutz Ldsch.forsch.* 3(1): 3-36.

Oberdorfer, E., (1992a) Süddeutsche Pflanzengesellschaften Teil I, Fels- und Mauergesellschaften, alpine Fluren, Wasser-, Verlandungs- und Moorgesellschaften. 3. Auflage. G. Fischer Verlag, 314 p.

Oberdorfer, E., (1992b) Süddeutsche Pflanzengesellschaften Teil IV. Wälder und Gebüsche, a+b. G. Fischer Verlag, Stuttgart, 282 p., 580 p.

OFFICE FEDERAL DE L'ÉCONOMIE DES EAUX, (1984) IIème correction des eaux du Jura. Effets du réglement de régularisation 1980-82 sur l'environnement. Rapport de l'Office fédéral de l'économie des eaux.

OFFICE FEDERAL DES FORETS, (1976) Carte de la végétation et de l'impact de l'Homme de la rive sud du lac de Neuchâtel, avec rapport adjoint. (Etude réalisée par les Universités de Neuchâtel, de Lausanne et de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich).

OFFICE FEDERAL DES FORETS, (1983) Entretien des zones humides en Suisse, 75 p.

Oïhénart, C., Perfetta, J., Robert J. et Lachavanne, J.-B., (1987) Etude de la végétation macrophytique de deux étangs de la Grande Cariçaie: Châble-Perron et Champ-Pittet (Commune de Cheseaux-Noréaz). Rapport de l'Unité de biologie aquatique de l'Université de Genève.

Oïhénart, C., Perfetta, J., Robert J. et Lachavanne, J.-B., (1988) Etude de la végétation macrophytique de deux étangs de la rive sud du lac de Neuchâtel: Châbles-Perron et Champ-Pittet. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 79(1): 23-38.

Overney, C. et Mottier, V., (1990) L'impact du niveau du lac de Neuchâtel sur le fonctionnement et la durabilité des milieux humides de la rive sud. Rapport «gestion et conservation des sols» au Département de génie rural de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

Passarge, H., (1965) Zur Frage der Probeflächenwahl bei Gesellschaftskomplexen im Bereich der Wasser- und Verlandungsvegetation. *Feddes Rep. Bh.* 142: 203-208.

Perfetta, J., Bänziger, R., Juge, R., Lachavanne, J.-B., et Lods-Crozet, B., (1993) Bases nécessaires à la gestion de la beine littorale de la rive sud du lac de Neuchâtel. Rapport interne du Laboratoire d'écologie et de biologie aquatique de l'Université de Genève.

Perrochet, P. & Musy, A., (1991) Transferts de masse en milieux poreux : Le modèle HYDROCHEM. *Ingénieurs et Architectes suisses, SIA*, 22: 388-391.

Perrochet, P., (1992) Ecoulements souterrains et relations nappe lac dans les rives Sud du lac de Neuchâtel. Approche par modélisation mathématique. Transect 19 (Chevroux). Rapport établi pour l'Institut de Botanique de l'Université de Neuchâtel.

Perrochet, P., (1993a) Ecoulements souterrains et relations nappe lac dans les rives Sud du lac de Neuchâtel. Approche par modélisation mathématique. Transect 9 (Cheyres).Rapport établi pour l'Institut de Botanique de l'Université de Neuchâtel.

Perrochet, P., (1993b) Ecoulements souterrains et relations nappe lac dans les rives Sud du lac de Neuchâtel. Approche par modélisation mathématique. Transect 27 (Cudrefin). Rapport établi pour l'Institut de Botanique de l'Université de Neuchâtel.

Perrochet, P., Bueche, M., Buttler, A., Cornali, Ph. & Gobat, J.-M, (à paraître): Mathematical modelling of groundwater-lakewater interactions in a shore wetland. *Environmental management* (submitted).

Pinay, G., Roques, L. & Fabre, A., (1993) Spatial and temporal patterns of denitrification in a riparian forest. *Journal of Applied Ecology* 30: 581-591.

Pradervand, G., (1981): Cartographie de la réserve naturelle de Champ-Pittet. Travail de certificat, Institut de Botanique de l'Université de Lausanne, 38 p.

Quartier, A.-A., (1948) Le lac de Neuchâtel. Ed. de la Baconnière, Neuchâtel, 164 p.

Rehfuess, K.E., (1981) Waldböden: Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Pareys Studientexte 29, Verlag P. Parey, Hamburg u. Berlin, 193 p.

Richard, J.-L., (1982) La conservation des marais. *Intervalles* 4: 5-16.

Richard, J.-L., Rollier, M., Antoniazza, M. et Roulier, Ch., (1982) Plan de protection des rives naturelles du lac de Neuchâtel. *Schweiz. Z. Forstwes.* 133 (1): 65-72.

Roulier, C., (1980) Dynamique des aulnaies noires de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse). *Actes du colloque phytosociologique «La végétation des forêts alluviales», Strasbourg* 1980: 371-391.

Roulier, C., (1983) Contribution à l'étude phytosociologique des groupements végétaux non boisés de la rive sud du lac de Neuchâtel. *Bull. Soc. Frib. Sc. Nat.* 72 (1/2): 75-125.

SERV. AMENAGEMENT DU TERRITOIRE DU CANTON DE VAUD ET OFFICE DES CONSTRUCTIONS ET DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE DU CANTON DE FRIBOURG, (1982) Plan directeur de la rive sud du lac de Neuchâtel et des rives du lac de Morat. *Doc. aménagement régional* 16 (3).

Sollberger, H., (1974): Le lac de Neuchâtel (Suisse). Thèse, Université de Neuchâtel, 434 p.

Spinner, H., (1933) La Correction des eaux du Jura et le climat littoral. *Bull. Soc. Neuchâtel. Sc. nat.* 58: 33-48, 128.

Van der Maarel E., (1979) Transformation of cover-abundance values in phytosociology and its effects on community similarity. *Vegetatio* 39 (2): 97-114.

Vanden Berghen, C., (1982) Initiation à l'étude de la végétation. Les Naturalistes Belges, Bruxelles.

Wassen, M.J., Barendregt, A., Palczynski, A., de Smidt, J.T. & de Mars, H., (1990) The relationship between fen vegetation gradients, groundwater flow and flooding in an undrained valley mire at Biebrza, Poland. *Journal of Ecology* 78: 1106-1122.

Wheeler, B. D. & Shaw, S. C., (1995) A Focus on fens - Controls on the composition of fen vegetation in relation to restoration, in: Restoration of Temperate Wetlands (Edited by B. Wheeler, S. Shaw, W. Fojt and R. Robertson), John Wiley & Sons : 49-72

Wildi, O., (1986) Analyse vegetationskundlicher Daten. *Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich* 90, 226 p.

Wildi, O. & Orloci, L., (1990) Numerical exploration of community patterns. SPB Academic Publishing bv, 124 p.

Williams, T., (1968) The nitrogen relations and other ecological investigations on wet fertilized meadows. *Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich* 41: 69-193.

Wittwer, F., (1988): Recherche faunistiques sur les Staphylinidae (Coleoptera) de la rive sud du lac de Neuchâtel. *Bull. Soc. Entom. Suisse* 61: 233-239.

Yerly, M., (1970) Ecologie comparée des prairies marécageuses dans les Préalpes de la Suisse occidentale. *Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich* 44, 122 p.