3.2

Bull. Ecol., t. 22 (3-4) 1991 : 405-418

LES SOLS HYDROMORPHES DES PRAIRIES HUMIDES DE LA RIVE SUD DU LAC DE NEUCHÂTEL (SUISSE)*

Alexandre BUTTLER et Jean-Michel GOBAT

Laboratoire d'Écologie végétale et de phytosociologie - Institut de Botanique de l'Université
22, ch. de Chantemerle, 2007 NEUCHATEL (Suisse).

SUMMARY
(original paper)

THE HYDROMORPHIC SOILS OF THE WET MEADOWS OF THE SOUTH SHORE OF LAKE NEUCHATEL (SWITZERLAND).

Investigated in the framework of a global ecological study, the soils of the south shore of lake Neuchâtel (Switzerland) present a remarkable diversity, despite the fact that their existence dates from only one hundred years (they were created by an artificial 3 meters lowering of the subjurassic lakes). A first group made up of 7 types represents the gleys and peat soils developed on deep lying loose sediments, and a second group constituted of 2 types represents the pseudogleys developed on raised sandstone substratum.
*Their physical and chemical properties are shown, as well as their relations with the groundwater and the plant communities (*Caricetum elatae, Cladietum marisci, Orchio-Schœnetum, Molinietum*). The conditions for the soil formation and evolution are discussed, and particularly the various conditions in the upper humic layers.*
The originality of the described soils is shown by some shifts between their morphology and their processes, by the great diversity of the soil types developed after only 100 years and by the putting in question of some succession models of the vegetation.

KEY WORDS : Hydromorphic soils. Peat. Gleys. Pseudogleys. Humus. marshes. Wet meadows. Dynamic. Soil evolution.

RÉSUMÉ
(travail original)

Étudiés dans le cadre d'une recherche globale en écologie végétale, les sols de la Rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse) montrent une diversité remarquable, malgré leurs 100 ans seulement d'existence (mise à jour de terrains par un abaissement artificiel de 3m des lacs subjurassiens). Un premier groupe (7 types) comprend des gleys et des tourbes sur sédiments meubles, un second (2 types) des pseudogleys primaires sur bancs de molasse superficiels.
*Leurs caractères physico-chimiques sont présentés, ainsi que leurs relations avec les nappes et les groupements végétaux (*Caricetum elatae, Cladietum marisci, Orchio-Schœnetum, Molinietum*). Les conditions de formation et d'évolution sont discutées, en particulier celles concernant les horizons humifères, très variés.*
L'originalité des sols décrits est traduite par des observations sur le décalage entre la morphologie du sol et son fonctionnement, par la grande diversité pédologique déjà développée après seulement 100 ans et par la remise en question de certaines étapes de succession du couvert végétal.

MOTS CLÉS : Sols hydromorphes. Tourbes. Gleys. Pseudogleys. Humus. Marais. Prairies humides. Dynamique. Pédogenèse.

Publication le 15 juillet 1991.

INTRODUCTION

Les milieux naturels de la rive sud du lac de Neuchâtel constituent une des préoccupations majeures des instances de la protection de la nature en Suisse, et des efforts constants sont entrepris depuis quelques années pour maintenir cet écosystème exceptionnel (ANTONIAZZA *et al.* 1991). L'objectif prioritaire est de le conserver dans ses dimensions actuelles et de lui garder sa diversité écologique. Le contexte historique et certains aspects écologiques de ces marais, créés il y a une centaine d'années à la suite de la Correction des eaux du Jura (abaissement du niveau des eaux de 2,8 mètres), ont déjà fait l'objet de diverses publications, notamment BUTTLER 1983, BUTTLER *et al.* 1985 et BUTTLER 1987.

Dans un précédent article BUTTLER & GALLANDAT (1990), nous avons décrit les unités phytosociologiques des prairies humides (*Magnocaricion, Caricion davallianae* et *Molinion*) et suggéré un modèle de succession autogène de la végétation. Un système écologique sur sédiments meubles profonds et un autre sur molasse imperméable y sont présentés avec, dans les deux cas, une série évolutive différente selon le degré d'hydromorphie initial des sols.

L'intérêt des sols de la rive sud du lac de Neuchâtel dépasse largement le cadre local, en raison de la convergence des faits suivants :

- Le contexte historique en fait des sols jeunes, en formation depuis une centaine d'années seulement, même si leur matériel constitutif a parfois déjà subi une évolution antérieure.
- Cette jeunesse permet une observation presque « en temps réel » des premiers stades de la pédogenèse en milieu hydromorphe, ce qui est rare en Europe moyenne sur une si vaste étendue (environ 1500 ha de zones naturelles créées il y a cent ans).
- La grande diversité de la végétation, alliée à des conditions de nappe variées, provoque la formation de nombreux types d'humus.
- Enfin, ces sols mettent en évidence, dans de nombreux cas, un décalage entre la morphologie du profil, héritée du passé et souvent encore peu modifiée, et son fonctionnement, qui répond aux facteurs écologiques actuels.
- La connaissance détaillée des paramètres écologiques (végétation, hydrodynamique, hydrochimie, cycles biogéochimiques) acquise dans des travaux antérieurs (*op. cit.*) rend les interprétations pédologiques particulièrement sûres.

Pour les études sur la végétation et les sols, la rive sud du lac de Neuchâtel se présente ainsi comme un parfait « laboratoire naturel », un modèle en vraie grandeur, dans l'espace et dans le temps, et amène des réflexions d'ordre général sur la pédogenèse en milieu hydromorphe.

Dans ce contexte, l'article présente d'abord les observations du terrain (description et analyse de profils-types, avec accent sur les paramètres originaux de chaque sol), puis discute les caractères généraux des sols et leurs relations avec la végétation, notamment leur influence sur la dynamique des groupements. Par exemple, l'évolution directe « prairie à grandes laîches —> prairie à choin », souvent présentée dans la littérature, est ici remise en question par l'étude des sols.

MÉTHODES

La description des profils et les prélèvements d'échantillons ont été effectués durant l'hiver 1982/83, avec la terminologie et le symbolisme de RICHARD *et al.* (1978/81/83). Les couleurs sont données selon le Code MUNSELL, la typologie des sols selon MUECKENHAUSEN (1985).

Les méthodes d'analyses physico-chimiques sont classiques et suivent les indications d'ALLEN *et al.* (1974), AUBERT (1978) et ROUILLER (1981), avec les précisions suivantes :

a) Les bases échangeables au pH du sol ont été analysées par échange avec KCl et NH_4Cl.

b) Deux formes du fer ont été analysées :

1. Le fer libre par réactif Tamm.
2. Le fer oxydé par réactif MEHRA-JACKSON.

Ces deux formes, par leur rapport, mettent en évidence les horizons riches en fer réduit (Fe^{++}), l'origine du matériel, l'importance des formes amorphes du fer par rapport aux formes oxydées ou encore l'importance du fer lié à la matière organique. L'extraction à l'oxalate n'a pas pu être effectuée par manque de temps, mais elle aurait apporté d'autres résultats intéressants sur les formes organométalliques les plus mobiles.

DESCRIPTION DES PRINCIPAUX TYPES DE SOLS

Les sols se répartissent en deux groupes : les tourbes et gleys d'une part, les pseudogleys d'autre part (FIG. 1, TAB. Ia, b et TAB. II).

LES TOURBES ET LES GLEYS

Tourbe eutrophe (Soil Taxonomy : Hydric Medifibrist)

Remarque générale. — Ce profil est le plus hydromorphe de la série sur sédiments meubles, avec un sol inondé en permanence. La tourbe en formation est constituée principalement de fibres de *Carex elata* (radicelles, gaines, etc.), alors que la végétation est dominée par *Cladium mariscus*. Ceci indique un changement récent de végétation, au cours duquel *Cladium mariscus* a envahi cette zone, autre-

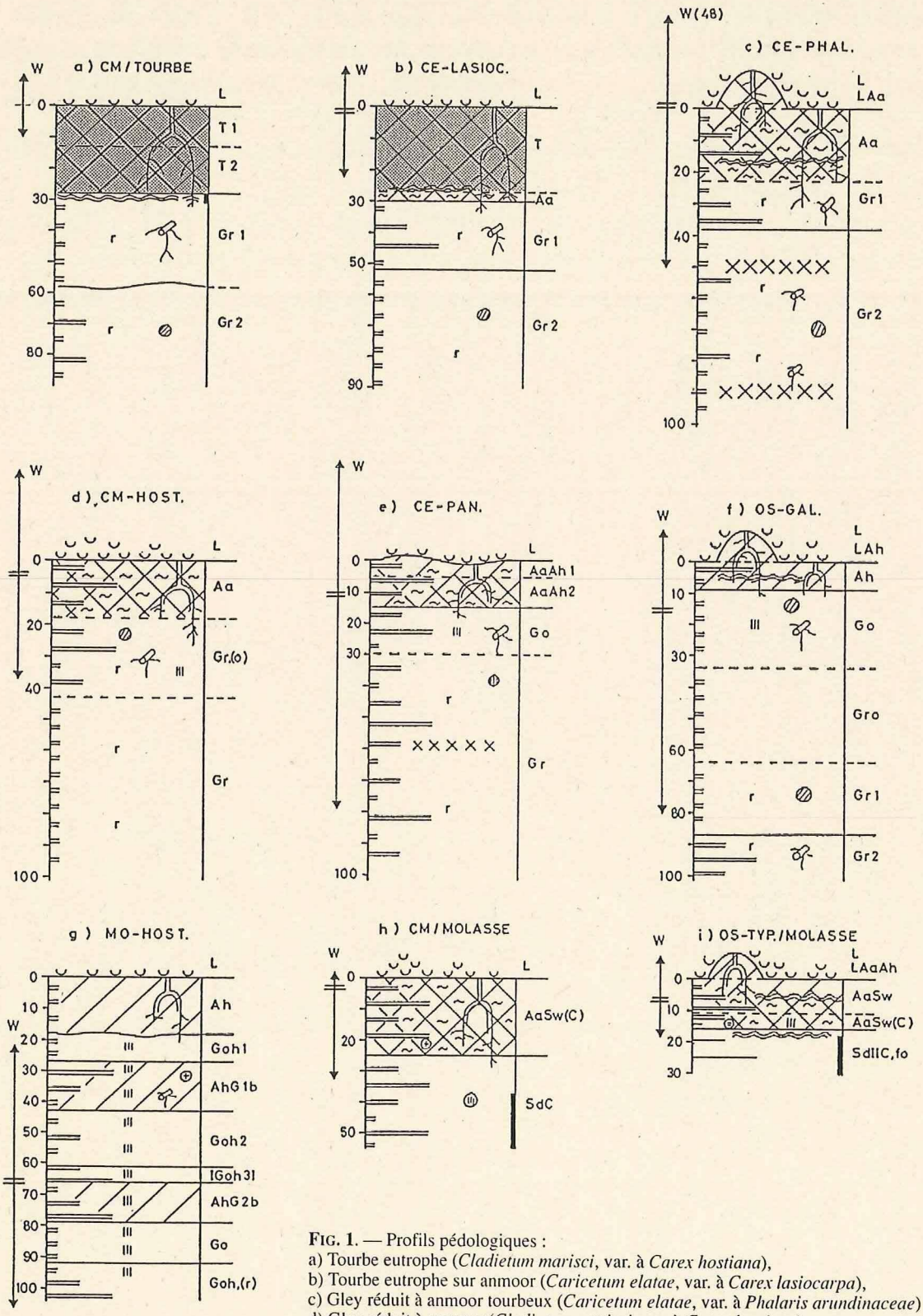

FIG. 1. — Profils pédologiques :
a) Tourbe eutrophe (*Cladietum marisci*, var. à *Carex hostiana*),
b) Tourbe eutrophe sur anmoor (*Caricetum elatae*, var. à *Carex lasiocarpa*),
c) Gley réduit à anmoor tourbeux (*Caricetum elatae*, var. à *Phalaris arundinaceae*)
d) Gley réduit à anmoor (*Cladietum marisci*, var. à *Carex hostiana*),
e) Gley oxydé humifère à anmoor-hydromull (*Caricetum elatae*, var. à *Carex panicea*),
f) Gley oxydé humifère à hydromull (*Orchio-Schœnetum nigricantis*, var. à *Galium palustre*),
g) Gley oxydé peu humifère à mull (*Molinietum cœruleae*),
h) Pseudogley primaire à anmoor (*Cladietum marisci*, var. à *Carex hostiana*)
i) Pseudogley primaire à anmoor-hydromull (*Orchio-Schœnetum nigricantis*, var. *typicum*).
(la double flèche W à gauche du profil traduit l'amplitude et le niveau moyen de la nappe).

TABLEAU Ia. — Tableau général des analyses physico-chimiques des sols.

Type de sol, Carré permanent, Horizon:	Prof. cm	Couleur Munsell	Texture : >2mm %	SG %	SM %	SF %	LG %	LF %	A %	Teneur eau %	Perte feu %	Mat. organ. %	C org. %	N tot. %	C/N
TOURBE EUTROPHE (CM/TOURBE):															
T 1	13	7.5YR3/2	,0	-	-	-	-	-	-	90,0	91,2	84,1	48,90	1,54	31,8
T 2	28	10YR4/4	,0	-	-	-	-	-	-	89,0	84,3	81,2	47,20	1,24	38,1
Gr 1	58	2.5 Y5/0	,3	,5	54,9	39,3	1,7	2,5	1,1	23,8	,7	3,8	2,20	,02	-
Gr 2	73	5 Y5/2	,3	,2	1,4	65,8	18,6	10,6	3,4	27,2	1,3	6,4	3,70	,04	-
TOURBE EUTROPHE SUR ANMOOR (CE-LASIOC.):															
T	27	5YR2/2	,0	-	-	-	-	-	-	85,5	87,4	79,4	46,19	1,14	40,5
Aa	30	5YR3/2	,0	-	-	-	-	-	-	62,5	16,2	17,2	10,00	,59	16,9
Gr 1	52	5 Y6/2	,0	,1	,8	26,6	17,4	35,6	19,4	24,5	1,0	1,3	,73	,01	-
Gr 2	>85	5 Y6/1	,0	,0	7,8	78,5	7,8	3,1	2,8	25,3	,8	1,4	,80	,03	-
GLEY REDUIT A ANMOOR TOURBEUX (CE-PHAL.):															
LAa	0	10YR3/2	,0	-	-	-	-	-	-	75,4	39,2	28,9	16,79	1,03	16,3
Aa	23	10YR3/2	,0	,1	1,5	33,2	22,4	26,2	16,6	69,9	24,2	23,6	13,70	,86	15,9
Gr 1	38	5Y4/2	,1	,2	,4	31,8	18,4	32,4	16,8	30,5	2,4	2,0	1,19	,02	-
Gr 2	>100	-	,0	5,9	33,3	41,2	6,7	6,4	6,5	14,0	1,6	1,5	,90	,04	-
GLEY REDUIT A ANMOOR (CM-HOST.):															
Aa	18	10YR4/3	,0	,9	2,4	5,3	8,1	35,2	48,3	75,5	24,6	21,7	12,59	,80	15,7
Gr,(o)	43	5 Y5/2	,0	2,2	11,1	23,6	22,8	23,5	16,8	29,0	1,6	1,4	,81	,05	-
Gr	>95	5 Y5/1	,0	3,9	85,0	5,1	1,5	1,1	3,2	22,2	,4	,7	,40	,02	-
GLEY OXYDE HUMIFERE A ANMOOR-HYDROMULL (CE-PAN.):															
AaAh 1	5	-	0	,1	6,0	36,6	23,0	11,5	22,8	62,4	22,1	19,9	11,59	,67	17,3
AaAh 2	15	10YR3/1	,0	,5	7,7	22,5	23,6	22,2	23,5	69,5	17,8	16,4	9,56	,66	14,5
Go	30	5 Y5/1	,0	,0	,5	22,9	26,8	29,1	20,7	37,2	2,7	3,9	2,29	,09	-
Gr	>100	2.5 Y4/0	,0	,1	1,0	36,6	27,8	22,4	12,2	33,2	2,6	3,2	1,85	,08	-
GLEY OXYDE HUMIFERE A HYDROMULL (OS-GAL.):															
LAh	0	5YR2/1	,0	,3	35,8	29,0	3,2	8,4	23,2	67,8	25,3	22,6	13,12	,92	14,3
Ah	9	5YR2/1	,0	,4	49,1	33,5	2,8	6,0	8,3	64,9	25,1	23,0	13,35	,87	15,3
Go	34	5 Y6/3	,0	,2	39,6	41,6	6,3	7,1	5,3	25,0	1,3	1,2	,69	,05	-
Gr 1	87	5 Y5/1	,0	5,1	,1	71,5	7,2	10,3	5,9	22,7	1,1	1,3	,73	,02	-
Gr 2	>105	5 Y6/1	,0	,1	17,7	3,7	15,6	37,5	25,3	36,1	2,3	2,2	1,27	,04	-
GLEY OXYDE PEU HUMIFERE A MULL (MO-HOST.):															
Ah	18	10YR3/2	1,4	2,1	33,7	50,0	4,0	5,5	4,6	26,6	5,9	10,1	5,90	,25	23,6
Goh 1	27	10YR5/3	,3	4,6	43,6	41,5	3,1	7,3	,0	16,5	1,5	6,0	3,50	,04	-
AhG1b	43	10YR4/2	,1	1,3	10,1	25,4	14,6	26,7	21,9	25,6	2,2	10,1	5,90	,10	-
Goh 2	61	10YR5/2	1,8	2,2	21,0	49,7	11,6	9,1	6,4	25,5	1,6	8,9	5,20	,06	-
[Goh 3]	66	10YR6/3	,0	,1	,2	2,1	10,2	56,9	30,6	26,1	1,7	10,7	6,20	,05	-
AhG2b	79	10YR3/3	,1	,9	7,4	44,1	19,7	16,6	11,3	38,0	5,7	12,4	7,20	,16	-
Go	92	10YR5/4	,0	1,5	16,4	72,8	4,0	3,1	2,4	20,6	,6	3,8	2,20	,02	-
Goh,(r)	98	10YR4/1	,0	,2	3,4	34,2	24,9	22,3	15,1	27,9	1,7	8,9	5,20	,06	-
PSEUDOGLEY PRIMAIRE A ANMOOR (CM/MOLASSE):															
AaSw(C)	25	10YR5/3	,0	,0	1,0	1,4	4,8	51,4	41,5	56,0	13,6	10,5	6,08	,25	24,3
SdC	>52	5 Y6/3	6,2	,1	32,9	20,3	3,9	25,0	17,9	21,4	1,5	1,2	,69	,03	-
PSEUDOGLEY PRIMAIRE A ANMOOR-HYDROMULL (OS-TYP./MOLASSE):															
AaSw	11	7.5YR3/2	,0	,1	6,5	25,3	13,2	27,3	27,2	68,3	24,8	23,7	13,79	,57	24,2
AaSw(C)	16	2.5Y6/4	2,9	,3	14,7	25,1	16,8	25,1	17,9	35,9	4,4	3,7	2,17	,13	16,7
SdIIC,fo	>25	2.5YR4/6	,0	,2	3,7	22,9	16,6	36,8	19,8	18,1	1,7	,3	,16	,04	-

TABLEAU Ib. — Tableau général des analyses physico-chimiques des sols (suite).

Type de sol, Carré permanent, Horizon:	pH eau	Calc. act. %	Calc. tot. %	Ca éch. méq./ 100g	Mg éch. méq./ 100g	K éch. méq./ 100g	Na éch. méq./ 100g	S méq./ 100g	Fe Ta (TA=Tamm; MJ=Mehra-Jackson) %o	Fe MJ %o	NH4-N mg/ 100g	NO3-N mg/ 100g
TOURBE EUTROPHE (CM/TOURBE):												
T 1	7,1	,0	,0	48,90	11,20	,88	1,10	62,1	1,16	1,52	42,00	40,59
T 2	8,1	,0	,0	37,68	7,98	,55	1,28	47,5	,83	1,05	-	-
Gr 1	7,8	-	11,8	11,68	,62	,06	,26	12,6	,48	,75	-	-
Gr 2	7,4	5,1	21,0	14,52	1,18	,05	,28	16,0	1,33	1,98	-	-
TOURBE EUTROPHE SUR ANMOOR (CE-LASIOC.):												
T	6,7	,0	,2	57,75	7,23	3,75	2,38	71,1	4,38	5,88	27,01	21,60
Aa	6,5	-	1,3	40,05	1,83	,10	,55	42,5	2,03	2,46	-	-
Gr 1	7,4	2,5	17,2	12,28	,33	,05	,18	12,8	,39	1,52	-	-
Gr 2	7,2	7,0	23,6	13,17	,58	,15	,37	14,3	,91	2,63	-	-
GLEY REDUIT A ANMOOR TOURBEUX (CE-PHAL.):												
LAa	7,3	4,5	8,1	36,23	1,03	,23	,25	37,7	2,12	4,45	39,34	32,09
Aa	6,9	3,8	12,1	35,28	,89	,12	,21	36,5	2,61	5,78	-	-
Gr 1	7,8	5,3	25,1	13,07	,25	,04	,08	13,4	,44	1,52	-	-
Gr 2	7,4	3,0	36,6	11,53	,21	,04	,04	11,8	1,34	1,23	-	-
GLEY REDUIT A ANMOOR (CM-HOST.):												
Aa	7,6	21,5	48,2	27,10	3,10	,28	,27	30,8	4,66	7,15	11,53	9,92
Gr,(o)	8,1	7,5	21,5	12,13	,78	,09	,09	13,1	,45	1,43	-	-
Gr	8,4	4,3	11,7	10,78	,38	,04	,11	11,3	,40	,47	-	-
GLEY OXYDE HUMIFERE A ANMOOR-HYDROMULL (CE-PAN.):												
AaAh 1	7,6	2,8	9,8	30,09	,73	,26	,34	31,4	1,42	2,60	8,51	6,13
AaAh 2	7,3	5,3	13,5	33,53	,84	,28	,29	34,9	1,99	4,08	-	-
Go	7,8	7,5	29,3	18,31	,37	,08	,15	18,9	,80	2,63	-	-
Gr	7,5	7,0	33,6	17,51	,42	,07	,15	18,2	1,24	1,49	-	-
GLEY OXYDE HUMIFERE A HYDROMULL (OS-GAL.):												
LAh	7,8	-	,7	28,64	1,36	,17	,18	30,4	2,85	4,30	16,06	12,88
Ah	7,6	-	,8	31,69	1,50	,18	,19	33,6	2,51	4,76	-	-
Go	7,8	4,3	21,7	15,52	,39	,05	,03	16,0	,26	2,55	-	-
Gr 1	7,8	4,5	20,5	14,62	,58	,06	,08	15,3	1,04	2,55	-	-
Gr 2	7,7	21,0	50,8	15,67	1,23	,09	,34	17,3	1,00	2,65	-	-
GLEY OXYDE PEU HUMIFERE A MULL (MO-HOST.):												
Ah	8,4	3,0	19,3	15,57	,32	,12	,21	16,2	,83	2,21	9,49	4,84
Goh 1	8,8	4,6	22,6	11,53	,20	,03	,04	11,8	,65	1,48	-	-
AhG1b	8,2	13,0	30,3	16,57	,45	,07	,06	17,2	2,52	5,38	-	-
Goh 2	7,9	7,5	34,1	13,47	,33	,03	,02	13,9	,79	2,33	-	-
[Goh 3]	8,3	14,5	40,0	18,41	,67	,10	,01	19,2	1,18	8,55	-	-
AhG2b	7,6	12,1	32,0	18,66	,50	,04	,00	19,2	1,02	2,50	-	-
Go	8,1	8,9	15,2	11,98	,23	,03	,02	12,3	,18	1,68	-	-
Goh,(r)	7,9	8,4	33,1	15,57	,38	,06	,02	16,0	,83	3,65	-	-
PSEUDOGLEY PRIMAIRE A ANMOOR (CM/MOLASSE):												
AaSw(C)	7,9	6,0	9,5	26,45	4,33	,28	,29	31,4	2,30	10,08	8,56	7,78
SdC	8,0	6,5	20,0	18,21	3,36	,23	,28	22,1	,53	11,65	-	-
PSEUDOGLEY PRIMAIRE A ANMOOR-HYDROMULL (OS-TYP./MOLASSE):												
AaSw	7,9	9,3	11,8	32,24	5,31	,70	,48	38,7	,68	5,28	6,48	6,04
AaSw(C)	8,2	6,0	20,4	15,57	2,52	,18	,23	18,5	,50	5,68	-	-
SdIIC,fo	8,1	1,3	1,3	16,77	4,24	,34	,35	21,7	,36	11,40	-	-

TABLEAU II. — Rapport entre quelques paramètres physico-chimiques des sols.

Type de sol, Carré permanent, Horizon:	Prof. cm	Ca/Mg	Ca/K	Ca/S %	FeTa/ FeMJ %	NH4/ NO3	Calcaire act./tot. %	Sabl. (S) %	Lim. (L) %	Arg. (A) %	A/S	A/L	A/S+L
TOURBE EUTROPHE (CM/TOURBE):													
T1	13	4,4	55,6	78,8	76,3	1,0	-	-	-	-	-	-	-
T2	28	4,7	68,5	79,3	79,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Gr1	58	18,8	194,7	92,6	64,0	-	-	94,7	4,2	1,1	,01	,26	,01
Gr2	73	12,3	290,4	90,6	67,2	-	24	67,4	29,2	3,4	,05	,12	,04
TOURBE EUTROPHE SUR ANMOOR (CE-LASIOC.):													
T	27	8,0	15,4	81,2	74,5	1,3	0	-	-	-	-	-	-
Aa	30	21,9	400,5	94,2	82,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Gr1	52	37,2	245,6	95,6	25,7	-	15	27,5	53,0	19,4	,71	,37	,24
Gr2	>85	22,7	87,8	92,1	34,6	-	30	86,3	10,9	2,8	,03	,26	,03
GLEY REDUIT A ANMOOR TOURBEUX (CE-PHAL.):													
LAa	0	35,2	157,5	96,0	47,6	1,2	56	-	-	-	-	-	-
Aa	23	39,6	294,0	96,7	45,2	-	31	34,8	48,6	16,6	,48	,34	,20
Gr1	38	52,3	326,8	97,2	28,9	-	21	32,4	50,8	16,8	,52	,33	,20
Gr2	>100	54,9	288,3	97,5	100,0	-	8	80,4	13,1	6,5	,08	,50	,07
GLEY REDUIT A ANMOOR (CM-HOST.):													
Aa	18	8,7	96,8	88,1	65,2	1,2	45	8,6	43,3	48,3	5,62	1,12	,93
Gr,(o)	43	15,6	134,8	92,7	31,5	-	35	36,9	46,3	16,8	,46	,36	,20
Gr	>95	28,4	269,5	95,4	85,1	-	36	94,0	2,6	3,2	,03	1,23	,03
GLEY OXYDE HUMIFERE A ANMOOR-HYDROMULL (CE-PAN.):													
AaAh1	5	41,2	115,7	95,8	54,6	1,4	29	42,7	34,5	22,8	,53	,66	,30
AaAh2	15	39,9	119,8	96,0	48,8	-	39	30,7	45,8	23,5	,77	,51	,31
Go	30	49,5	228,9	96,8	30,4	-	26	23,4	55,9	20,7	,88	,37	,26
Gr	>100	41,7	250,1	96,5	83,2	-	21	37,7	50,2	12,2	,32	,24	,14
GLEY OXYDE HUMIFERE A HYDROMULL (OS-GAL.):													
LAh	0	21,1	168,5	94,4	66,3	1,2	-	65,1	11,6	23,2	,36	2,00	,30
Ah	9	21,1	176,1	94,4	52,7	-	-	83,0	8,8	8,3	,10	,94	,09
Go	34	39,8	310,4	97,1	10,2	-	20	81,4	13,4	5,3	,07	,40	,06
Gr1	87	25,2	243,7	95,3	40,8	-	22	76,7	17,5	5,9	,08	,34	,06
Gr2	>105	12,7	174,1	90,4	37,7	-	41	21,5	53,1	25,3	1,18	,48	,34
GLEY OXYDE PEU HUMIFERE A MULL (MO-HOST.):													
Ah	18	48,7	129,8	96,0	37,6	2,0	16	85,8	9,5	4,6	,05	,48	,05
Goh1	27	57,7	384,3	97,7	43,9	-	20	89,7	10,4	,0	,00	,00	,00
AhG1b	43	36,8	236,7	96,6	46,8	-	43	36,8	41,3	21,9	,60	,53	,28
Goh2	61	40,8	449,0	97,3	33,9	-	22	72,9	20,7	6,4	,09	,31	,07
[Goh3]	66	27,5	184,1	95,9	13,8	-	36	2,4	67,1	30,6	12,75	,46	,44
AhG2b	79	37,3	466,5	97,2	40,8	-	38	52,4	36,3	11,3	,22	,31	,13
Go	92	52,1	399,3	97,7	10,7	-	58	90,7	7,1	2,4	,03	,34	,02
Goh,(r)	98	41,0	259,5	97,1	22,7	-	25	37,8	47,2	15,1	,40	,32	,18
PSEUDOGLEY PRIMAIRE A ANMOOR (CM/MOLASSE):													
AaSw(C)	25	6,1	94,5	84,4	22,8	1,1	63	2,4	56,2	41,5	17,29	,74	,71
SdC	>52	5,4	79,2	82,5	4,5	-	33	53,3	28,9	17,9	,34	,62	,22
PSEUDOGLEY PRIMAIRE A ANMOOR-HYDROMULL (OS-TYP./MOLASSE):													
AaSw	11	6,1	46,1	83,2	12,9	1,1	78	31,9	40,5	27,2	,85	,67	,38
AaSw(C)	16	6,2	86,5	84,2	8,8	-	29	40,1	41,9	17,9	,45	,43	,22
SdIIC,fo	>25	4,0	49,3	77,3	3,2	-	96	26,8	53,4	19,8	,74	,37	,25

fois dominée par *Carex elata*. Une des hypothèses de succession végétale du *Caricetum elatae* au *Cladietum marisci* par envahissement, établie par l'analyse des relevés floristiques (BUTTLER & GALLANDAT 1990), est confirmée ici par l'analyse pédologique.

Caractères physico-chimiques. — La texture est grossière, avec une tourbe directement superposée aux horizons de sable ; cette particularité confirme l'hypothèse d'une évolution végétale directe du *Nymphaeion* au *Caricetum elatae*, var. à *Carex lasiocarpa* (une roselière aurait laissé une trace pédologique à la base de l'horizon T2, sous forme par exemple d'un anmoor ou d'une gyttja).

La matière organique forme la presque totalité des horizons de surface, mais elle est aussi présente dans les gleys (M.O. héritée, sous forme de racines). Le C/N élevé, typique d'une tourbe eutrophe peu évoluée, est un peu plus faible dans l'horizon T1, légèrement pâteux et à couleur différente. Cette hétérogénéité confirme l'hypothèse d'un changement récent des conditions écologiques et floristiques.

Le rapport FeTa/FeMJ est élevé, semblable à celui de l'horizon T de la tourbe eutrophe sur anmoor (*Cf. Infra*), de la tourbe fossile des forêts de la réserve naturelle de Cudrefin (BUECHE, en préparation) et de quelques horizons profonds de gley réduit. Cette situation reflète le manque d'aération des horizons.

Les valeurs d'azote minéral sont de loin les plus élevées par rapport à l'ensemble des sols, notamment en raison de la faible densité apparente de la tourbe.

Tourbe eutrophe sur anmoor
(Soil Taxonomy : Hydric Medifibrist)

Remarque générale. — Ce profil se trouve dans une situation identique au précédent. Le niveau d'eau y est très constant, proche de la surface, mais une légère baisse est perceptible en été. La formation de tourbe par *Carex elata* est active : un horizon homogène de tourbe surmonte un petit horizon d'anmoor de 3 cm d'épaisseur. Inexistant dans le profil précédent, celui-ci aurait pu se former sous l'influence d'un régime hydrique différent, avec des périodes d'assèchement.

Caractères physico-chimiques. — Les deux horizons de gley sont fort différents, avec une texture limoneuse fine pour le premier, et sableuse pour le second. La présence d'argiles en quantité non négligeable entre 30 et 52 cm (20 %) a permis la création d'un horizon intermédiaire d'anmoor. L'horizon Gr1, par sa texture fine, contribue à la pérennité de la nappe en été. Cette hypothèse est confirmée indirectement par l'étude du gley oxydé humifère à hydromull (*cf. infra*) qui se trouve à proximité, à une altitude identique.

Dans ce deuxième cas, le sol présente un assèchement plus marqué en été car les horizons sont très sableux jusqu'à 90 cm de profondeur, où apparaît alors une couche de texture plus fine (Horizon Gr2), de même type (probablement le même alluvionnement) que l'horizon Gr1 dont il est question ici. Les niveaux minima des nappes dans ces deux milieux correspondent à la profondeur de cette strate d'alluvionnement peu perméable.

La matière organique est d'environ 80 % dans la tourbe (peu contaminée par des éléments minéraux allochtones) et 17 % dans l'anmoor. Le rapport C/N est de 40 dans la tourbe et 17 dans l'anmoor.

Les pH, très légèrement acides dans la tourbe et l'anmoor (6,7 et 6,5), représentent les valeurs les plus « basses » pour les marais de la rive sud. Le rapport FeTa/FeMJ est très élevé dans les deux horizons organiques (asphyxie).

Les valeurs d'azote minéral sont élevées dans l'absolu, mais plutôt basses pour des horizons holorganiques à densité apparente faible. Le caractère plus mésotrophe de la végétation apparaît surtout par rapport au profil précédent, nettement eutrophe.

Gley réduit à anmoor tourbeux
(Soil Taxonomy : Histic Humaquept)

Remarque générale. — Situé à proximité du lac, ce sol en est fortement influencé par les variations (inondations). Il présente des dépôts d'origine fluviale (delta) et lacustre. On note la présence de gros touradons fibreux de *Carex elata*.

Caractères physico-chimiques. — La texture est limoneuse dans les horizons Aa et Gr1, sablo-limoneuse en dessous. Une bonne proportion d'argile permet la formation d'un anmoor qui présente un caractère tourbeux par accumulation de matériel organique non décomposé. La part importante de limons et d'argiles ainsi que l'alternance de nombreuses couches à texture différenciée dans l'horizon Gr2 témoignent de l'origine mixte des sédiments.

Par rapport aux deux sols tourbeux précédents, l'incorporation de la matière organique au substrat minéral est meilleure, grâce à l'assèchement estival du sol (plus forte activité biologique).

Les teneurs en bases échangeables profitent du bon développement du complexe argilo-humique, même si les valeurs du Mg et du K restent faibles.

Gley réduit à anmoor
(Soil Taxonomy : Mollic Haplaquept)

Remarque générale. — Ce profil présente des conditions hydrodynamiques très semblables au gley réduit à anmoor tourbeux (*cf. supra*), mais la meilleure aération de l'horizon de surface augmente l'activité de l'humus. Celui-ci conserve néanmoins un taux de matière organique impor-

tant. La formation de l'anmoor est rendue possible par une texture argilo-limoneuse en surface. La végétation est dominée par *Cladium mariscus*.

Caractères physico-chimiques. — La texture est très fine en surface, avec 48 % d'argile, ce qui représente la valeur la plus élevée pour l'ensemble des sols. Les conditions sont ainsi idéales pour la formation d'un anmoor (argile et matière organique en quantité suffisante, nappe légèrement fluctuante, comme en témoigne l'horizon Gr(o) sous-jacent). Ce dernier est plus grossier, de texture limoneuse, avec un certain équilibre des classes granulométriques. La superposition d'horizons de texture très fine à un horizon entièrement sableux traduit l'action du ruisseau situé à proximité, qui a recouvert de ses alluvions les sédiments lacustres.

La somme des bases échangeables est plus importante en surface en raison de la texture fine. En revanche, les rapports Ca/K et surtout Ca/Mg de l'horizon de surface sont faibles et s'apparentent à ceux trouvés dans les stations, non boisées ou forestières, situées sur molasse ou dans la zone d'influence d'un ruisseau. Le caractère allochtone du matériel ayant formé l'horizon d'anmoor est confirmé, pour autant que ces rapports soient de bons indicateurs d'origine du matériel. Les valeurs d'azote minéral sont nettement plus faibles que dans le gley réduit à anmoor tourbeux, lequel profite de l'influence directe du lac.

Gley oxydé humifère à anmoor-hydromull (Soil Taxonomy : Typic Haplaquoll)

Remarque générale. — Ce profil, formé sur l'ancien delta de l'Aar, est situé 200 mètres en amont du gley réduit à anmoor tourbeux. L'importance du matériel alluvionnaire par rapport aux sédiments lacustres est montrée par la texture fine dominante ainsi que par la stratification par différents matériaux. On observe notamment une couche limoneuse avec de la matière organique enfouie.

L'humus est du type mixte, anmoor en période humide et hydromull en période sèche (surtout en été). Cette particularité est mise en évidence non seulement par la description de terrain, mais aussi par certains caractères analytiques. Il fonctionne à la manière des humus décrits par LOUSTEAU (1984), avec alternances saisonnières entre l'anmoor et l'hydromull et recolonisation chaque printemps du premier par la pédofaune du second. Tous les anmoors de la rive sud ne suivent cependant pas cette règle et certains ne passent jamais à l'état « hydromull », en raison soit de leur localisation dans le profil, héritée de la pédogenèse (à la base d'une tourbe et donc noyés actuellement en permanence), soit de la permanence d'apports hydriques latéraux (ruissellement superficiel).

La végétation est également du type mixte puisqu'il s'agit d'une association du *Magnocaricion* avec tendance au *Caricion davallianae*.

Caractères physico-chimiques. — La texture est relativement fine sur tout le profil (limono-argileuse ou limoneuse fine), mais l'aération du sol et la formation de l'hydromull sont facilitées par la présence de sables fins (environ 30 % du matériel). La quantité de matière organique dans l'horizon organo-minéral atteint 16 à 20 %, ce qui indique une bonne minéralisation (rapport C/N de 17, dans l'horizon AaAh1).

Le passage anmoor-hydromull, qui se concrétise par la formation des agrégats, est lié à l'alternance de dessiccation et réhumidification ainsi que de gel et dégel que connaît la surface du sol (*cf.* SCHAEFFER 1967), possible grâce à l'absence d'inondation à cette époque.

L'appauvrissement de l'horizon de surface en calcaire peut s'expliquer par une dissolution en relation avec le CO_2 dégagé lors de l'activité biologique de l'hydromull et le battement de la nappe (SCHAEFFER 1967).

Gley oxydé humifère à hydromull (Soil Taxonomy : Typic Haplaquoll)

Remarque générale. — Pour la première fois apparaît un horizon de gley oxydé Go, atteignant 25 cm d'épaisseur, et se poursuivant sur 30 cm supplémentaires de manière diffuse (Horizon Gro). De gros touradons se forment, constitués de gaines et racines non décomposées de *Schœnus* et *Molinia* mêlées à des particules organo-minérales (grains de sable et micro-agrégats stables).

Ce sol correspond à l'*Orchio-Schœnetum nigricantis*, souvent décrit dans la littérature phytosociologique comme un stade naturel d'évolution succédant au *Caricetum elatae*. Or, l'analyse des relevés de végétation (BUTTLER & GALLANDAT 1990) montre que ces deux associations concernent des séries évolutives indépendantes. Plusieurs des caractères du sol appuient cette hypothèse.

Caractères physico-chimiques. — Les horizons de gley oxydé sont sablo-limoneux, alors que le gley réduit de profondeur est limoneux fin, avec une forte proportion d'argile (25 %). Cet horizon, situé à 88 cm, est semblable par sa texture au Gr1 du sol à tourbe eutrophe sur anmoor (*cf. supra*) tout proche (dans ce cas à 30 cm de profondeur). L'influence de cet horizon de texture fine sur le régime hydrique a déjà été discutée plus haut. La porosité élevée des horizons Go et Gro (81 % de sable) facilite la descente de la nappe et l'aération des horizons en été.

La teneur en matière organique en surface est semblable à celle des anmoors. Le simple aspect quantitatif n'est donc pas suffisant pour différencier l'anmoor de l'hydromull. La structure (nettement grumeleuse, même en hiver) et la nature de la matière organique sont déterminantes. Le rapport C/N de l'humus (14 à 15) traduit une bonne activité biologique, favorisée aussi par des espèces à enracinement fasciculé comme *Schœnus sp.* et *Molinia sp.*, qui contribuent à donner à l'horizon humique une structure grumeleuse (SCHAEFFER 1967).

Le rapport FeTa/FeMJ décroît avec la profondeur. Dans l'horizon Go, il est spécialement bas, ce qui indique une prédominance des formes cristallines du fer (taches rouille). Comme nous le verrons plus loin, ce rapport est encore plus faible dans le cas du pseudogley avec la même végétation.

Gley oxydé peu humifère à mull
(Soil Taxonomy : Typic Haplaquoll)

Remarque générale. — Le caractère alluvionnaire de ce sol, situé dans l'ancien delta de l'Aar, est très marqué, ne serait-ce que par le nombre d'horizons qu'il a été nécessaire de distinguer pour sa description. Des horizons organo-minéraux enfouis sont visibles, constituant de véritables mulls enterrés, datant de phases plus anciennes de pédogenèse (sols superposés).

Ce sol correspond à la situation la plus sèche pour les marais non boisés sur sédiments meubles, et abrite par conséquent un *Molinietum*.

Caractères physico-chimiques. — Le squelette est présent, même en faible quantité, ce qui reflète la présence de matériel morainique mêlé aux alluvions. On a pu constater que les traces de moraine apparaissent dans les endroits éloignés du lac, ou surélevés par rapport à celui-ci (érosion par le lac plus faible). La texture est très variée, typique de l'origine alluvionnaire du substrat. La topographie surélevée de cette station fait que la nappe est relativement profonde, les premiers signes de réduction apparaissant à 90 cm seulement.

Les alternances de couches à texture grossière ou plus fine ne semblent pas influencer le comportement de la nappe, le profil étant très poreux. Ceci s'explique par le fait que les horizons à texture fine sont précisément ceux qui présentent une structure ancienne de mull et donc une bonne porosité héritée.La matière organique est distribuée dans tout le profil, avec un rapport C/N de 24 en surface, ce qui est très élevé pour un humus qualifié de mull. En dépit du régime hydrique favorable, le manque d'argiles dans l'horizon humifère (5 %) freine l'évolution de la matière organique. Le complexe argilo-humique est ainsi insuffisant pour permettre une bonne structure. La quantité importante de calcaire s'oppose aussi à une bonne humification de la matière organique (cas des mulls carbonatés).

Les rapports Ca/Mg et Ca/K sont globalement très élevés, à l'image des autres sols sur l'ancien delta de l'Aar. Les valeurs d'azote minéral mettent bien en évidence le caractère maigre du sol, ce qui est conforme aux exigences écologiques d'un *Molinietum*.

Les pseudogleys

Deuxième grand groupe de sols sur la rive sud du lac, les pseudogleys se sont formés à la faveur du défaut de drainage externe (= latéral) et interne (= vertical) des replats de molasse situés au pied des falaises bordant les marais. Ils sont apparentés aux pararendzines des pinèdes voisines (CORNALI, à paraître).

Le socle de molasse constitue un plancher pour la nappe (horizon Sd), d'origine pluviale et de ruissellement, qui se forme temporairement dans l'horizon supérieur, nettement plus poreux (horizon Sw). L'hydromorphie n'y est que temporaire, puisqu'en été, la nappe, par ailleurs riche en oxygène et à Eh relativement élevé, disparaît sans qu'une alimentation par ascension capillaire soit possible (nappe perchée).

Ce plancher étant dû à une différence de porosité liée à l'existence d'une autre couche géologique, on parle de pseudogley primaire (DUCHAUFOUR 1977, REHFUESS 1981 et MUECKENHAUSEN 1985). Il n'y a pas, dans notre cas, d'horizon d'accumulation d'argile, provoqué par un lessivage en milieu désaturé (pseudogley secondaire).

Pseudogley primaire à anmoor
(Soil Taxonomy : Lithic-Mollic Haplaquept)

Remarque générale. — Ce profil est le plus hydromorphe sur molasse et correspond à une végétation dominée par *Cladium mariscus*. La texture très fine de l'horizon humifère ainsi que la proximité d'un ruisseau permettent le maintien d'une importante humidité capillaire dans le sol, et ceci durant la majeure partie de l'année. En conséquence, l'humus formé est du type anmoor, sans évolution estivale vers l'hydromull.

Caractères physico-chimiques. — La présence de 6 % de matériel grossier reflète le matériel morainique, qu'on retrouve sur les replats de molasse devant la falaise.

Une différence très nette apparaît entre les deux horizons, avec une texture respectivement argilo-limoneuse (LF + A = 93 %, favorable à l'anmoor) et limono-sableuse.
On doit admettre ainsi une triple origine du matériel minéral :

1) la molasse, produisant du matériel plutôt grossier (sablo-limoneux),

2) la moraine superficielle, mélangée à la molasse altérée et présente également dans le bas de l'horizon organo-minéral,

3) les dépôts fins d'alluvionnement du ruisseau.

La matière organique est très faible dans l'horizon de surface, inférieure de moitié à celle du gley réduit à anmoor avec la même végétation. Le rapport calcaire actif/calcaire total est très élevé, ce qui est une caractéristique des stations sur molasse. Les horizons sont riches en Mg et en K , ce qui semble traduire les caractéristiques minéralogiques du milieu molassique (rapports Ca/Mg et Ca/K très faibles).

Le rapport FeTa/FeMJ est particulièrement bas pour les marais, grâce à des valeurs de fer MJ très élevées. Plus qu'une évolution de la matière organique, ceci montre que les formes cristallines du fer dominent. La molasse bigarrée contribue probablement aussi à cette forme du fer (héritage).

Les valeurs d'azote minéral sont plus importantes que celles du pseudogley primaire à anmoor-hydromull (*Cf. infra*), en raison du ruisseau tout proche.

Par leur texture fine et leur forte capacité en eau, les alluvions du ruisseau pourraient avoir favorisé le *Cladietum marisci* par rapport à l'*Orchio-Schœnetum nigricantis*, lequel semble préférer un matériel plus grossier.

Pseudogley primaire à anmoor-hydromull (Soil Taxonomy : Lithic Haplaquoll)

Remarque générale. — Contrairement au profil précédent, celui-ci présente un assèchement plus important des horizons durant l'été (pas d'alimentation diffuse par un ruisseau). La végétation forme des touradons fibreux constitués de gaines et racines non décomposées de *Schœnus* et *Molinia*, mêlées à des particules organo-minérales qui évoluent en hydromull en périodes d'assèchement.

La présence d'un paléosol rubéfié est une curiosité de cette station. Cette couche peu épaisse de couleur rougeâtre constitue une pseudo-roche-mère. Malgré sa proximité de la surface, elle ne semble en effet jouer qu'un rôle mineur dans la pédogenèse actuelle. L'horizon principal pour la végétation est celui qui lui est directement superposé, constitué d'un mélange carbonaté de molasse altérée et de moraine, alors que le paléosol est décarbonaté. Ce paléosol est probablement une relique d'une phase antérieure de pédogenèse, sous climat méditerranéen (GRATIER, comm. pers.).

Caractères physico-chimiques. — La texture est relativement constante, avec suffisamment d'argiles pour constituer un anmoor. Par sa structure tassée, le paléosol constitue le plancher imperméable de la nappe (propriété qui se retrouve dans la molasse non altérée, sous le paléosol). On voit donc que, pour les pseudogleys décrits ici, les variations fines de texture et de structure ont un rôle fondamental car le régime hydrique se joue sur de très faibles épaisseurs d'horizons (quelques centimètres, *cf.* discussion).

Le calcaire actif décroît avec la profondeur et représente une part importante du total, comme c'est souvent le cas sur molasse. Le paléosol est très pauvre en calcaire total, bien qu'il soit surmonté d'un horizon très carbonaté. Une légère décarbonatation est observable dans l'horizon AaSw, en raison de l'activité biologique de l'humus en été. Les rapports Ca/Mg et Ca/K sont très bas, ce qui est une constante sur molasse.

DISCUSSION ET CONCLUSION

CARACTERES GÉNÉRAUX DES SOLS

Hydromorphie. — Tous les sols décrits sont influencés par une nappe et peuvent être qualifiés d'hydromorphes. Selon que cette nappe est permanente ou temporaire, on est en présence respectivement de gleys et tourbes ou de pseudogleys. Les gleys et les tourbes se trouvent sur sédiments meubles, plus ou moins profonds, tandis que les pseudogleys sont limités aux affleurements de molasse, au pied des falaises.

Matière organique. — Le régime hydrique détermine l'activité biologique de l'horizon de surface et, corollairement, sa structure et sa porosité. Avec l'assèchement et l'aération croissants, on passe de la tourbe à l'anmoor, puis à l'hydromull et au mull. L'hydromull représente une forme d'humus métastable, aux propriétés mixtes selon les saisons (SCHAEFFER 1967).

Les rapports C/N sont de 41 à 32 pour la tourbe, 24 à 15 pour l'anmoor, 17 à 14 pour l'hydromull et 24 pour le mull carbonaté. Dans ce dernier cas, le rapport élevé s'explique par la nature très sableuse et calcaire de l'horizon, qui ralentit l'évolution de la matière organique.

Bases échangeables. — La remontée de la nappe jusqu'en surface a pour effet un apport régulier de Ca^{2+} dans l'horizon de surface. En conséquence, tous les sols ont un complexe absorbant saturé même si, dans certains cas (horizons de tourbe, horizons LAh des touffes de *Schœnus*, paléosol), le taux de calcaire total est faible à nul. La somme des bases échangeables (S) est de 48 à 71 méq/100 g pour les horizons de tourbe (densité apparente !), 30 à 43 méq/100 g pour les horizons organo-minéraux de surface (excepté dans le mull, très sableux, avec 16 méq/100 g) et 11 à 22 méq/100 g dans les horizons minéraux. Le calcium représente toujours plus de 77 % des bases échangeables. Les rapports Ca/S les plus bas sont atteints dans les horizons de tourbe et dans les pseudogleys où Mg, K et Na prennent une importance relative plus grande.

Texture. — Tous les sols décrits présentent une grande hétérogénéité texturale, témoignant de la nature variable des sédiments : colluvions lacustres, alluvions fluviales, dépôts morainiques et socle de molasse. En aucun cas cette hétérogénéité ne peut être due au lessivage d'argiles, en raison de l'âge récent des dépôts.

Formes et dynamique du fer. — Le rapport Fe Ta/Fe MJ est très faible dans le cas des pseudogleys (moins de 23 %). Dans les autres sols, il est important dans les horizons de tourbe (75 à 79 %), moyen dans l'anmoor et l'hydromull (45 à 66 %), faible dans le mull (38 %). Pour les horizons organiques et organo-minéraux, cette tendance est conforme au degré d'évolution de la matière organique (liaison du fer avec la matière organique). Dans les horizons minéraux du gley réduit, il y a en général prédominance des formes amorphes du fer, non oxydé (rapport important - asphyxie). Dans les horizons minéraux du gley oxydé, il y a, au contraire, prédominance des formes cris-

tallines du fer qui est alors oxydé (rapport faible - taches rouille). Dans le cas des pseudogleys, une partie du fer oxydé est héritée de la molasse.

Avec l'augmentation de l'activité biologique dans l'hydromull ou le mull, et la production accrue de CO_2, on assiste à une mobilisation du calcaire et du fer ferreux produit en milieu réducteur, par le biais des bicarbonates et des acides organiques formés et accumulés en conditions d'anaérobiose (SCHAEFFER 1967). La nappe (voire la pluie) intervient ici en transportant ces éléments vers la profondeur (décarbonatation de l'horizon supérieur) ou, au contraire, vers la surface (recarbonatation et précipitation du fer ferrique sous forme d'hydrates ferriques dans l'horizon Go, bien aéré).

Dans les pseudogleys la dynamique du fer est restreinte et laisse peu de traces visibles (pas de marmorisation) en raison d'une nappe pluviale oxydante peu agressive. Dans ce cas, le pH neutro-alcalin et le manque de composés organiques complexants empêchent une mobilisation importante du fer et l'apparition des taches rouille et plages déferrifiées typiques des pseudogleys, et ceci malgré un degré d'hydromorphie relativement important.

Mais il est probable aussi que cette discrétion des caractères morphologiques soit liée à la jeunesse des sols. REHFUESS (1981) décrit une situation comparable avec un pseudogley primaire sur marnes riches en calcaire, dont le pH élevé et le degré d'altération faible n'ont occasionné qu'une infime libération de fer et de manganèse (voir également MUECKENHAUSEN et ZAKOSEK 1961).

Azote. — Les teneurs en azote minéral sont généralement faibles : plus de 20 mg/100 g pour l'anmoor tourbeux et les tourbes (rôle de la densité apparente dans ce dernier cas!), et moins de 20 mg/100 g pour les autres humus. La valeur la plus importante, compte tenu des densités apparentes, se rencontre dans le gley réduit à anmoor tourbeux (39 mg/100 g dans l'humus), lequel est fréquemment inondé par le lac.

Malgré ces teneurs faibles, la production végétale aérienne est très forte (elle peut atteindre 500 g/m2/an) et la minéralomasse riche en azote (BUTTLER, 1987). Ce paradoxe s'explique en partie par la présence, dans la rhizosphère du roseau notamment, de bactéries aérobies fixatrices d'azote, se développant dans des microsites aérés du gley réduit (ARREGUIT, 1990).

Relation entre le sol et la végétation (TAB. III)

Déterminisme des associations végétales sur sédiments meubles profonds.

■ Indépendamment des variantes d'association, on constate que le ***Caricetum elatae*** **et le** ***Cladietum marisci*** **colonisent les mêmes types de sols**, soit la tourbe eutrophe et le gley réduit à anmoor. Ceci confirme les indications écologiques données par l'étude de la végétation (BUTTLER & GALLANDAT, 1990). Le *Cladietum marisci* possède une large amplitude écologique, qui couvre à peu près celle du *Caricetum elatae*. Le fort pouvoir compétitif de *Cladium mariscus* fait que cette espèce est capable d'envahir les variantes sèches du *Caricetum elatae*, et même les variantes humides de l'*Orchio-Schœnetum nigricantis*.

■ **Les trois variantes du** ***Caricetum elatae*** **sont parfaitement individualisées par l'étude des sols.** Les formes d'humus vont de la tourbe à l'anmoor tourbeux et à l'anmoor-hydromull. Ce dernier type caractérise la variante la plus sèche (var. à *Carex panicea*), dont nous avons déjà mentionné la tendance au *Caricion davallianae* (similarité avec les conditions écologiques de l'Orchio-*Schœnetum nigricantis*).

■ Ce dernier présente, quant à lui, des caractéristiques pédologiques distinctes de celles du *Caricetum elatae* et du *Cladietum marisci*. Le gley est nettement plus oxydé et l'humus prend la forme d'un hydromull. L'affranchissement de l'eau est plus marqué (pas d'inondation par le lac), ce qui laisse supposer **l'existence d'une série évolutive supra-aquatique**. A cette dernière appartient également le *Molinietum cœruleae* qui se développe sur un gley très oxydé, avec un humus de type mull.

Déterminisme des associations végétales sur molasse

■ Le *Cladietum marisci* et l'*Orchio-Schœnetum nigricantis* se rencontrent sur des sols morphologiquement assez proches. Néanmoins, le type d'humus montre une différence sensible dans le régime hydrique : anmoor dans le premier cas, anmoor-hydromull dans le second.

■ Le *Molinietum cœruleae* existe également sur pseudogley, mais de façon plus localisée (profil non décrit).

Séries évolutives. — De manière globale la correspondance est bonne entre la nature du sous-sol, le régime hydrique et la typologie des sols (TAB. III). Plusieurs des hypothèses présentées lors de l'étude de la végétation (BUTTLER & GALLANDAT 1990) sont confirmées par l'étude des sols :

D'une part la présence de deux systèmes différents selon la nature du substrat :

■ sédiments meubles profonds avec gleys et tourbes,

■ molasse avec pseudogleys.

D'autre part, **l'existence de séries évolutives différentes selon le régime hydrique :**

❒ série infra-aquatique avec tourbes ou gleys réduits à anmoor ou anmoor tourbeux,

❒ série supra-aquatique avec gleys oxydés humifères ou peu humifères, à humus de type hydromull ou mull.

En outre, **l'hypothèse d'un envahissement du** ***Caricetum elatae*** **par le** ***Cladietum marisci***, ainsi que celle **d'un passage direct du** ***Nymphaeion*** **au** ***Caricetum elatae***, sans groupement intermédiaire de type roselière, sont vérifiées.

TABLEAU III. — Principales caractéristiques écologiques des prairies humides.

Substrat géologique	Type de nappe	Niveau de nappe *(niv. moyen / fluctuation max. - cm)*	Type de végétation	Type de sol	Carré permanent	Altitude	Condition stationnelle
Sédiments meubles, plus ou moins profonds	Phréatique, permanente	Elevé et très stable *(-0,4 / 35,0)*	Cladietum marisci, var. à Carex hostiana	Tourbe eutrophe	CM/tourbe	429,89	Dépôts lacustres sableux
			Caricetum elatae, var. à Carex lasiocarpa	Tourbe eutrophe sur anmoor	CE-lasioc.	429,81	Dépôts lacustres sableux
		Elevé mais fluctuant, avec inondations par le lac *(0,9 / 98,0)*	Caricetum elatae, var. à Phalaris arundinacea	Gley réduit à anmoor tourbeux	CE-Phal.	429,44	Dépôts sablo-limoneux lacustres
		(-3,1 / 66,0)	Cladietum marisci, var. à Carex hostiana	Gley réduit à anmoor	CM-host.	429,65	Dépôts lacustres sableux
		(-9,8 / 111,0)	Caricetum elatae, var. à Carex panicea	Gley oxydé humifère à anmoor-hydromull	CE-pan.	429,63	Dépôts lacustres et fluviaux limoneux
		Encore élevé, fluctuant, mais pas d'inondation par le lac *(-15,0 / 90,0)*	Orchio-Schoenetum nigricantis, var. à Galium palustre	Glex oxydé humifère à hydromull	OS-Gal.	429,83	Dépôts lacustres sablo-limoneux
		Profond, jamais d'inondation *(-67,0 / >80,0)*	Molinietum coeruleae	Gley oxydé peu humifère à mull	MO-host.	430,07	Dépôts alluviaux à dominance de sable
Socles surélevés de molasse	Pluviale, temporaire	Humidité durable (proximité du ruisseau) *(-3,1 / 37,0)*	Cladietum marisci, var. à Carex hostiana	Pseudogley primaire à anmoor	CM/molasse	431,62	Replat en pied de falaise avec socle molassique et placage morainique
		Assèchement estival important *(-7,2 / 32,0)*	Orchio-Schoenetum nigricantis, var. typicum	Pseudogley primaire à anmoor-hydromull	OS-typ./ molasse	431,50	

Le principe dynamique très restricitif de la succession autogène semble être confirmé par l'étude des sols. Mais cet aspect devrait être repris en tenant compte des études pédologiques en cours dans les forêts. Toutefois, on constate déjà que **le phénomène de l'atterrissement par succession autogène ne concerne que la série infra-aquatique.** Celle-ci peut présenter, par conséquent, une série plus variée d'associations végétales qui se succèdent et contribuent au rehaussement du sol : *Potamogetonion - Nymphaeion - Phragmitetum communis - Caricetum elatae*, avec leurs variantes respectives.

Dans le cas de la série supra-aquatique, les sols n'accumulent guère de matière organique (humus actifs de type hydromull ou mull) et les associations végétales sont rapidement menacées par l'embroussaillement, surtout dans les milieux les plus secs (*Molinietum*).

Relation entre le sol, le régime hydrique et la végétation

Pour les gleys et les tourbes, la description des sols est parfaitement conforme à la classification des nappes (BUTTLER 1987 et TAB. III). On peut constater ainsi le rôle pédogénétique prépondérant de la dynamique de la nappe. De façon générale, sur sédiments meubles, les prairies humides de la série évolutive infra-aquatique sont caractérisées par une nappe élevée, stable ou fluctuante, mais avec des inondations importantes, notamment par le lac. Celles de la série évolutive supra-aquatique sont caractérisées par des nappes plus basses, très fluctuantes, et l'absence d'inondations directes par le lac.

Dans le cas des pseudogleys, la différence entre les deux types de sols est marquée par la persistance de l'humidité du sol : humidité durable dans l'anmoor et assèchement prononcé de l'anmoor-hydromull.

Il est à noter également **que la discrimination des groupements se fait sur une différence d'altitude qui n'excède en général pas 10 cm**, comme nous avons pu le voir grâce à des études détaillées de l'hydrodynamique et à un nivellement topographique précis (BUTTLER, 1987). Ceci prouve que très peu de chose, sur ce plan-là, séparent les types de végétation.

Mais, *a contrario*, deux groupements normalement séparés par cette petite différence de niveau peuvent aussi cohabiter à la même altitude. Dans ce cas, la différence se marque à l'intérieur du sol, par des profondeurs différentes affectées à des horizons plus imperméables. Tel est le cas du *Caricetum elatae* var. à *Carex lasiocarpa*, situé à côté et à la même altitude que l'Orchio-*Schœnetum* var. à *Galium palustre*, mais dont la nappe est « retenue » près de la surface par un horizon de texture fine peu profond.

Deux aspects originaux des sols de la rive sud du lac de Neuchâtel

L'introduction a déjà présenté l'originalité globale des sols et son contexte. Il est intéressant, en conclusion, d'en accentuer les deux aspects suivants :

Diversité des sols. — Contrairement à bien des idées reçues, « jeunesse » d'un sol ne veut pas dire « monotonie » ou « évolution floue », voire encore « études pédologiques ennuyeuses »! Évidemment, par rapport au pas de temps habituel de l'évolution pédologique (siècles à millénaires), 100 ans représentent peu de chose! Mais ces 100 ans, s'ils ont à peine suffi - même dans les stations les plus sèches que sont les pinèdes (CORNALI, à paraître) - à amorcer la décarbonatation, ont malgré tout permis une grande diversification pédologique.

Contrairement aux sols aérés, cette évolution est le fait, non des constituants minéraux du sol (pas de décarbonatation, pas d'acidification, pas de lessivage, etc.), mais des constituants organiques, dont l'inertie de réaction est beaucoup plus faible.

C'est ainsi que dans une ambiance mésoclimatique, texturale et géochimique globalement presque uniforme mais hydrodynamiquement variée, **s'est développée en peu de temps toute la gamme des humus du milieu calcique**, de la tourbe eutrophe encore en formation au mor calcique sous certaines pinèdes, en passant par l'anmoor, l'hydromull, le mull et tous leurs intermédiaires.

La végétation explorant et influençant préférentiellement les horizons humifères, on voit toute l'importance à accorder à la connaissance précise des humus. Des recherches sont d'ailleurs en cours pour caractériser plus finement la matière organique (GOBAT, à paraître).

Le phénomène du décalage « morpho-fonctionnel ». — La modification - récente à l'échelle pédologique - du pédoclimat, par l'abaissement du niveau des lacs à la fin du XIXème siècle, a provoqué **un soudain hiatus entre la morphologie du sol et son fonctionnement.**

Issue d'une évolution qui s'est déroulée en conditions beaucoup plus hydromorphes, la première s'est soudain trouvée en porte-à- faux avec les nouvelles conditions pédoclimatiques. Selon sa situation, tel matériau autrefois sous l'eau en permanence subit actuellement des périodes d'assèchement prolongées ; tel autre, correspondant autrefois à une zone d'inondation régulière par le lac, n'en est aujourd'hui plus jamais atteint. Citons, par exemple, les sols d'une frênaie à bouleau (BUECHE, à paraître), constitués en profondeur d'une ancienne tourbe eutrophe à roseaux, aujourd'hui exondée 9 mois sur douze et en voie de minéralisation.

Les sols de cette rive présentent ainsi **un éventail très large de l'intensité du décalage entre morphologie et fonctionnement.** Cela va de sols dont les constituants (au moins leur apparence !) n'ont pas « bougé » depuis 100 ans - certaines tourbes -, jusqu'à des sols dont aucune trace de l'état précédent n'est plus visible - telles les tourbes eutrophes récentes en formation directe sur des dépôts de sables lacustres.

Il est à remarquer que **la vitesse d'effacement des conditions anciennes n'est pas corrélée avec l'altitude au-dessus du lac.** On ne peut pas dire que les zones les moins soumises aux inondations évoluent le plus vite, ou vice-versa. La vitesse de transformation de ces sols est plutôt fonction du matériau d'origine et du comportement de chaque nappe, à l'endroit du profil. Ceci confirme indirectement le comportement relativement indépendant des nappes par rapport à celui du lac (BUTTLER, 1987). Il existe des profils très hydromorphes situés plus haut en altitude que des profils plus secs !

Le sol subit ainsi depuis 100 ans une double évolution :

- **un effacement progressif de l'état ancien** et de ses « signatures », plus ou moins rapide selon ce qu'il était au départ et selon les conditions actuelles (p. ex. tourbe fibreuse en voie de minéralisation, atténuation de la stratification des dépôts) ;

- **un affermissement de ses caractères modernes**, plus ou moins rapide en fonction du type et de l'état des caractères anciens hérités et selon les conditions actuelles (p. ex. taches de fer oxydé, légère décarbonatation superficielle).

Le sol actuel peut donc être perçu comme un mélange de deux « sols », séparés par un « saut » des conditions écologiques, mais reliés par une évolution constante et graduelle. Les profils décrits actuellement offrent une image composite de caractères et processus, dont certains sont hérités et d'autres actuels.

Une étude consacrée à la mesure de ce décalage « morpho-fonctionnel » et de son intensité devrait être entreprise ; elle donnerait à coup sûr des renseignements très intéressants sur la persistance de l'état pédologique antérieur et sur la validité des « signes » qui le trahissent (structures typiques, restes végétaux, macromolécules organiques conservées, types d'argiles, nodules ferro-manganiques...).

Gestion des marais et protection des sols

Grâce à cette étude pédologique il apparaît clairement que **lors de la gestion et de l'entretien des marais, il faut tenir compte non seulement de la végétation, mais également des sols.** La simple définition d'une association végétale n'est pas suffisante pour caractériser le milieu. La diversité des sols et les phénomènes évolutifs qui leur sont liés (minéralisation de la matière organique notamment) constituent des éléments susceptibles d'adapter les traitements aux milieux. On sera notamment très attentif aux faibles différences de niveaux qui passent souvent inaperçues dans des traitements à grande échelle (fauchage par exemple).

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier de leur collaboration MM. J.-L. RICHARD, J.-D. GALLANDAT, J.-C. VÉDY et P. LÜSCHER, professeurs, ainsi que Melles C. CACCIA, M. GAFNER, MM. PH. CORNALI, M. BUECHE, J.-P. DUBOIS, J.-D. TEUSCHER et Chr. ROULIER. Ce travail a été partiellement subventionné par le Fonds national suisse de la recherche scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

ALLEN (S.E.), GRIMSHAW (H.M.), PARKINSON (J.A.) et QUARMBY (C.), 1974.- *Chemical analysis of ecological materials.* Blackwell Scientific Publications, Oxford, 566 p.

ANTONIAZZA (M.), MANUEL (F.), RENEVEY (B.), 1991. *La Grande Cariçaie : les rives sauvages du lac de Neuchâtel.* Ed. 24-heures, Lausanne, 247 p..

ARREGUIT (M.), 1990.- *Etude de la fixation d'azote dans la rhizosphère du roseau* (Phragmites communis). Trav. lic. Univ. Neuchâtel.

AUBERT (G.), 1978.- *Méthodes d'analyses des sols.* Centre National de Documentation Pédagogique, Marseille, 191 p.

BUECHE (M.), en préparation.- *Écologie 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 pour l'Enseignement de l'Écologie - ECO-Informations* 8 : 1-16.

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.), 1987.- *Étude écosystémique des marais non boisés de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse) : phytosociologie, pédologie, hydrodynamique et hydrochimie, production végétale, cycles biogéochimiques et influence du fauchage sur la végétation.* Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, 284 p.

BUTTLER (A.) et GALLANDAT (J.-D.) 1990.- Phytosociologie des prairies humides de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse) et modèle de succession autogène. *Phytocœnologia,* 18 : 129-158.

CORNALI (Ph), en préparation.- *Écologie des pinèdes de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse).* Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel.

DUCHAUFOUR (Ph.), 1977.- *Pédologie. I. Pédogenèse et classification.* Ed. Masson, Paris, 477 p.

GOBAT (J.-M.), à paraître.- *Évolution de la matière organique des sols de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse).* Université de Neuchâtel.

LOUSTAU (M.), 1984.- *Morphologie et fonctionnement biodynamique de quelques humus hydromorphes de l'Est de la France.* Thèse de doctorat, Université de Nancy I, 150 p.

MUECKENHAUSEN (E.), 1985.- *Die Bodenkunde (3ème éd.).* DLG Verlag, Frankfurt am Main, 579 p.

MUECKENHAUSEN (E.) et ZAKOSEK (H.), 1961.- Das Bodenwasser. *Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforschung.* 89 : 400-414, Wiesbaden.

REHFUESS (K.E.), 1981.- *Waldböden : Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung.* Pareys Studientexte 29, Verlag P. Parey, Hamburg u. Berlin, 193 p.

RICHARD (F.), LUESCHER (P.) et STROBEL (T.), 1978/81/83 : *Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz I, II, III.* Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf (Schweiz).

ROUILLER (J.), 1981.- *Analyses des sols - Techniques de laboratoire.* Centre de Pédol. Biol. C.N.R.S., Note techn. 32.

SCHAEFER (R.), 1967.- Caractères et évolution des activités microbiennes dans une chaîne de sols hydromorphes mésotrophiques de la plaine d'Alsace. *Rev. Ecol. Biol. Sol.* 4 (Paris), : 385-437, 567-592.