4.6

Bull. Ecol., t. 23 (1-2) 1992 : 35-47

HYDROCHIMIE DES NAPPES DES PRAIRIES HUMIDES DE LA RIVE SUD DU LAC DE NEUCHÂTEL*

Alexandre BUTTLER

Laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie, Institut de botanique de l'Université
22, ch. de Chantemerle, 2007 Neuchâtel (Suisse)

SUMMARY
(original scientific paper)

HYDROCHEMISTRY OF THE GR[illegible] WET MEADOWS OF THE SOUTH SHORE OF LAKE NEUCHATEL (SWITZERLAND).

The ground water chemi[illegible] soil layer of four wet meadows belonging to the plant associations Caricetum elatae *and* Orchio-Schœnetum nigricant[illegible] *ensity of the hydromorphic characteristics revealed by the pedological and hydrodynamic studies. The different vegetation [illegible] ell distinguished by the action of thermodynamic balances (where intervene notably the oxygen, the oxydo-reduction p[illegible] ic carbon and the iron) but less so by biological balances (where intervene the nitrogen and the phosphorus). The properties of the ground water vary greatly according to soils. Very reducing in peat, the ground water acquires aerobic properties in summer on the surface of reduced gleys with anmoor. In the oxidized humus-bearing gleys with anmoor-hydromull or hydromull, the ground water has few reducing properties and the air penetrates deep into the ground.*

KEY WORDS : Hydrochemistry - Hydrodynamics - Hydromorphic soils - Marshes - Wet meadows - Fenland

RÉSUMÉ
(travail original)

Le chimisme des nappes, étudié par horizon pédologique dans les sols de quatre types de prairies humides appartenant aux associations du Caricetum elatae *et de l'*Orchio-Schoenetum nigricantis, *confirme l'intensité des caractères d'hydromorphie mis en évidence par l'étude pédologique et hydrodynamique. Les groupements végétaux se distinguent bien par l'action des équilibres thermodynamiques (où interviennent notamment l'oxygène, le potentiel d'oxydo-réduction, le carbone organique et le fer), mais moins par celle des équilibres biologiques (où interviennent l'azote et le phosphore). Les propriétés des nappes varient beaucoup selon les sols. Très réductrice dans les tourbes, la nappe acquiert des propriétés aérobies en été dans les horizons de surface des gleys réduits à anmoor. Dans les gleys oxydés humifères à anmoor-hydromull ou à hydromull, la nappe est peu réductrice et l'aération du profil se fait jusqu'en profondeur*

MOTS CLÉS : Hydrochimie - Hydrodynamique - Sols hydromorphes - Marais - Prairies humides

INTRODUCTION

En milieu hydromorphe, la charge chimique de l'eau du sol constitue un facteur prépondérant pour la végétation, puisque cette eau se trouve la plupart du temps sous la forme d'une nappe servant de « pool » nutritif aux végétaux. Les caractéristiques physico-chimiques de cette nappe peuvent varier dans le temps et dans l'espace et sont en relation étroite avec la matrice minérale du sol, l'activité biologique dans ce dernier (production de CO_2, NO_3, SO_4), la végétation (lessivage des feuilles, dégradation de la litière) et le (micro) climat (température, précipitations, aération du sol). En milieu riverain s'ajoute encore l'influence du lac, particulièrement en période de crue.

Créés il y a une centaine d'années à la suite de la Correction des eaux du Jura, les milieux humides de la rive sud du lac de Neuchâtel constituent un écosystème particulièrement remarquable (BUTTLER, 1983, 1987). La jeunesse des sols permet une observation presque « en temps réel » des premiers stades de la pédogénèse en milieu hydromorphe. La grande diversité de la végétation (BUTTLER & GALLANDAT, 1990), alliée à des conditions de nappe variées, provoque la formation de nombreux types de sols (BUTTLER *et al.* 1985, BUTTLER & GOBAT, 1991).

*Manuscrit reçu le 30 juin 1991 ; version révisée acceptée pour publication le 14 janvier 1992.

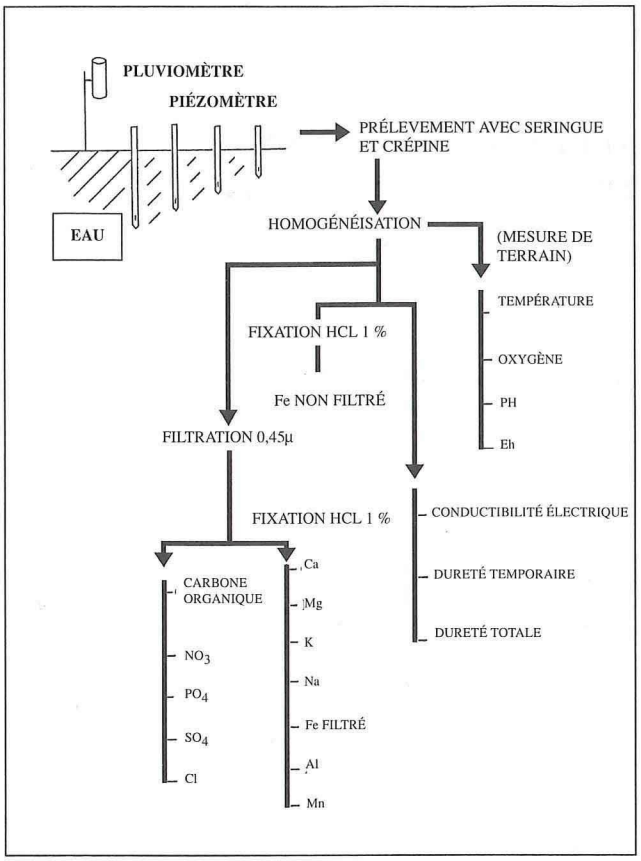


FIG. 1.– Organigramme des analyses physico-chimiques de l'eau des nappes.

Dans cet article, l'approche écologique des prairies humides est complétée par la description des variations spatiales et temporelles de l'hydrochimie des nappes. Les caractères des nappes sont mis en évidence avec les groupements végétaux et les types de sols. L'importance de la productivité et des cycles biogéochimiques est abordée sous l'angle de la gestion des marais.

Les prairies étudiées correspondent à des associations développées sur sédiments meubles et profonds et font partie :

- soit de la série évolutive infra-aquatique:

1) prairie mésotrophe à Laîche élevée (*Caricetum elatae*, var. à *Carex lasiocarpa*), avec un sol du type tourbe eutrophe sur anmoor. Cette tourbe récente est liée à la présence d'une nappe phréatique permanente élevée et très constante, sans inondation directe par le lac ;

2) prairie eutrophe à Laîche élevée (*Caricetum elatae*, var. à *Phalaris arundinacea*), avec un sol du type gley réduit à anmoor tourbeux. La nappe élevée, très fluctuante et les inondations directes par le lac en période de crues sont à l'origine de la croissance des Laîches en gros tourradons ;

3) prairie à petites Laîches (*Caricetum elatae*, var. à *Carex panicea*), avec un sol du type gley oxydé humifère à anmoor-hydromull. Dans ce cas la nappe est plus basse, mais aussi fluctuante, et les inondations directes par le lac sont encore possibles en période de crues,

- soit de la série évolutive supra-aquatique :

4) prairie à Choin (*Orchio-Schœnetum nigricantis*, var. à *Galium palustre*), avec un sol du type gley oxydé humifère à hydromull. La nappe est ici nettement plus profonde et il n'y a jamais d'inondations directes par le lac.

MÉTHODE

Le prélèvement de l'eau des nappes a été effectué au moyen de piézomètres conçus pour prélever à différentes profondeurs, dans les horizons pédologiques.

Constitué d'un tube en PVC d'un diamètre de 3 cm et fermé en pointe à son extrémité inférieure, le piézomètre est enfoncé dans le s[illegible]ns creusement préalable. Ceci permet d'obtenir un [illegible] d'étanchéité sur les parois et empêche ainsi la c[illegible]erticale de l'eau. Des orifices latéraux sont amé[illegible] 15 cm de l'extrémité inférieure pour l'entrée sélec[illegible]u. Les prélèvements ont été faits au moyen d'une s[illegible] et d'une crépine, après la purge préalable du système. La fréquence mensuelle de prélèvement s'est échelonnée sur toute la saison de végétation (période d'avril à octobre des années 1984 et 1985).

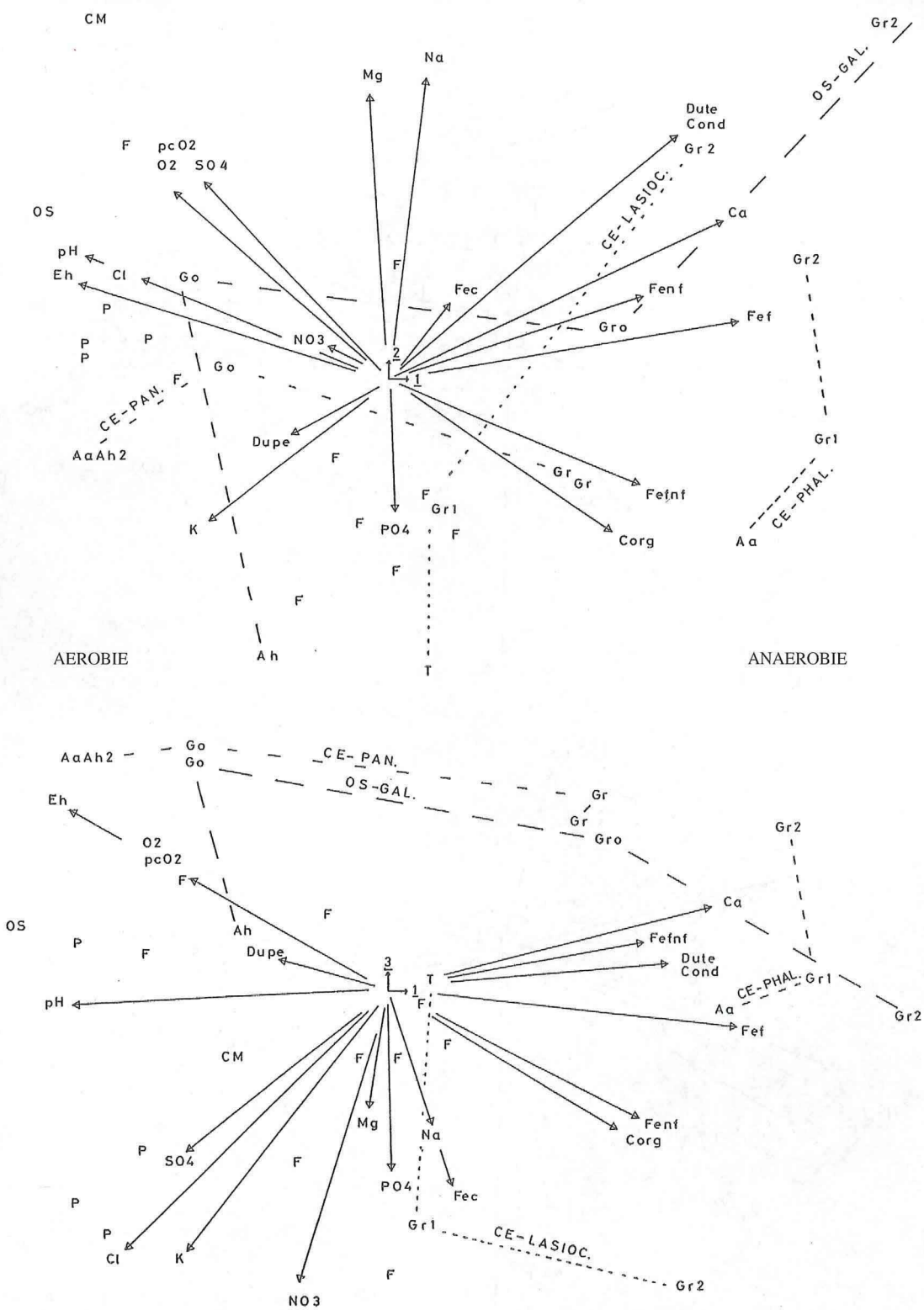
Pour comparaison, nous avons également récolté l'eau de pluie, l'eau du lac et du canal de la Broye, ainsi que celle d'un ruisseau s'écoulant de la falaise dans le marais.

La mise au point de la méthode analytique (FIG. 1) a été suggérée par les travaux de MISEREZ (1973). Environ 50 à 100 ml d'eau ont été prélevés sur le terrain, avec une mesure immédiate pour la température ainsi que pour l'acidité, le potentiel d'oxydo-réduction (Eh) et l'oxygène dissous (mesures avec appareils à électrode). La filtration est nécessaire pour les parties aliquotes destinées à l'analyse des cations et des anions. Elle permet d'éliminer les particules en suspension qui pourraient interférer lors de l'analyse ultérieure (la taille de 0,45 microns est arbitraire, mais on considère qu'elle coïncide avec un changement de la nature chimique de l'échantillon).

FIG. 2.– Analyse en composantes principales des données chimiques de l'eau des nappes : période printanière (14 mai 1985) (plan 1/2 = 49 %, plan 1/3 = 45 %).

Remarque : les données concernant les pinèdes et les frênaies ne sont pas discutées dans ce travail .

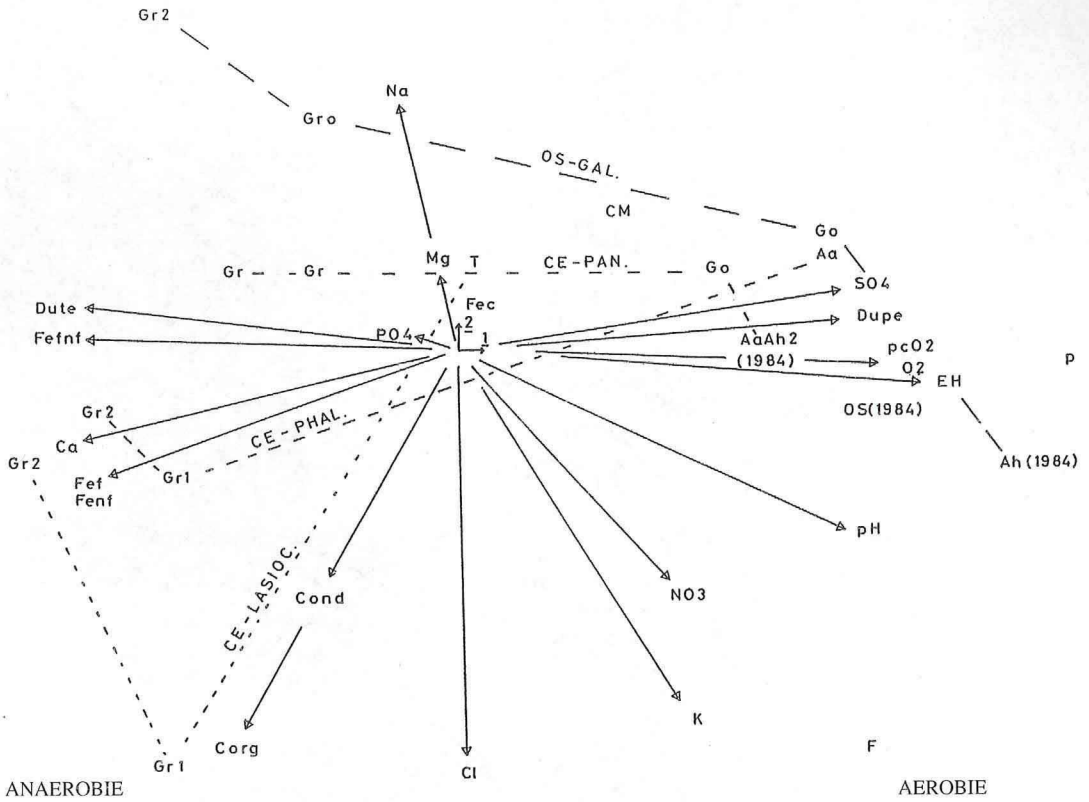
Végétation :
CE-LASIOC. : Prairie mésotrophe à Laîche élevée ; CE-PHAL. : Prairie eutrophe à Laîche élevée ; CE-PAN. : Prairie à petites Laîches ; OS-GAL. : Prairie à Choin ; CM : Prairie à Marisque sur molasse ; OS : Prairie à Choin sur molasse ; P : Pinèdes sur molasse ; F : Frênaies.



Horizons pédologiques : **T** : tourbe ; **Aa** : anmoor ; **Ah** : hydromull ; **Go** : gley oxydé ; **Gr** : gley réduit

Paramètres physico-chimiques abrégés :

Cond = conductivité ; **Dute** = dureté temporaire ; **Dupe** = dureté permanente ; **Corg** = carbone organique ; **Fenf** = fer non filtré ; **Fef** = fer filtré ; Fefnf = rapport fer filtré/fer non filtré ; **Fec** = fer non filtré - fer filtré ; **pcO_2** = % de saturation en oxygène.



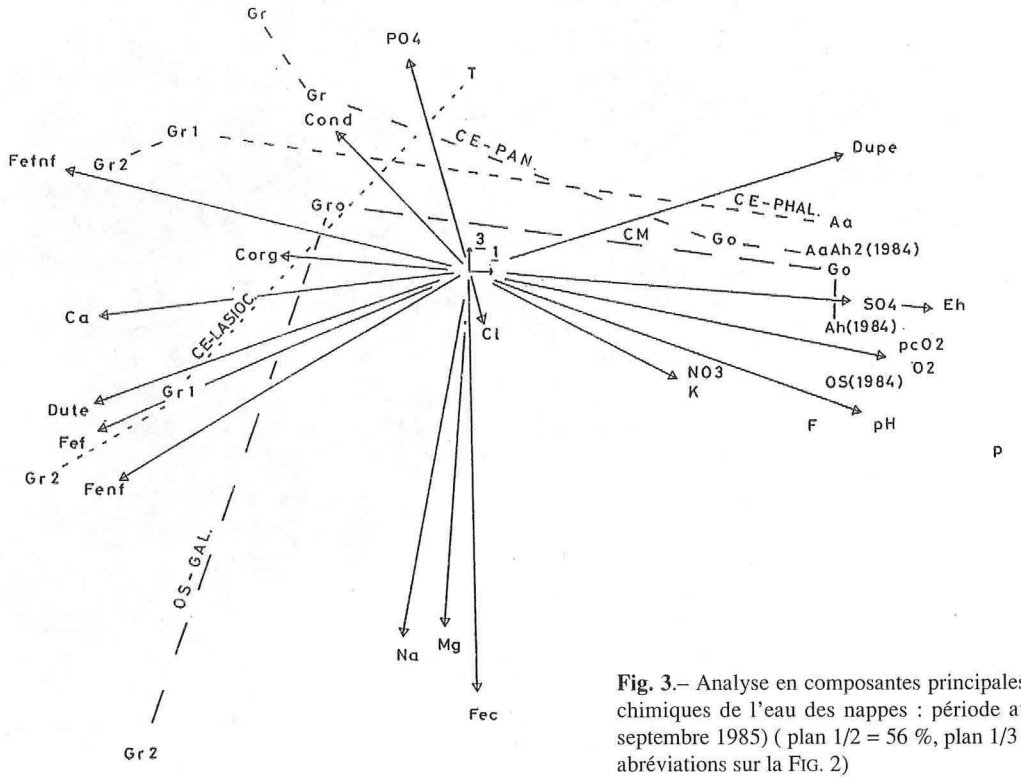


Fig. 3.– Analyse en composantes principales des données chimiques de l'eau des nappes : période automnale (10 septembre 1985) (plan 1/2 = 56 %, plan 1/3 = 55 % - voir abréviations sur la FIG. 2)

Les analyses de laboratoire furent effectuées dès le lendemain du prélèvement, après décantation et, pour les duretés, filtration sur papier S+S (no. 595). Le carbone organique a été mesuré par la méthode d'absorption spectrophotométrique à 270 nm (MISEREZ 1973), les anions par dosage colorimétrique (Technicon), et les cations par dosage au spectrophotomètre d'émission plasma DCP (OES).

Le Fe non filtré a été dosé au spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA).

L'intérêt des formes du fer est présenté par MISEREZ (1973), ainsi que BOUYER *et al.* (1980, 1981). Le fer non filtré équivaut au fer total et le fer filtré reflète la quantité de fer « hydrosoluble » assimilé au Fe échangeable (en milieu réducteur, essentiellement le fer ferreux). La différence entre le fer non filtré et le fer filtré donne par conséquent la quantité de fer complexé insoluble (essentiellement ferrique).

La conductibilité électrique a été mesurée à l'aide d'une électrode de platine.

Les duretés temporaire (acidimétrie) et totale (complexométrie) ont été mesurées avec les méthodes du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. La dureté permanente est obtenue par la différence de la dureté totale et de la dureté temporaire.

En raison de leurs teneurs insignifiantes, la silice, le manganèse et l'aluminium ne sont pas présentés dans les résultats. L'acidité est donnée par le pH, l'imprécision liée à l'usage du logarithme pour les calculs ne portant pas à conséquence, compte tenu de la gamme très restreinte des valeurs de pH.

RÉSULTATS

CARACTÉRISATION HYDROCHIMIQUE DES STATIONS

Analyse en composantes principales

Cette analyse est illustrée pour deux périodes caractéristiques :

1) Période printanière avec hautes eaux lacustres, nappe phréatique élevée dans les marais et même inondations occasionnelles de certains d'entre eux par les crues du lac (FIG. 2).

2) Période automnale avec un niveau de lac bas et des nappes encore profondes suite à la période de forte évapotranspiration estivale (FIG. 3).

Les images factorielles étant semblables pour les années 1984 et 1985, nous ne présentons ici que celles de 1985.

A) Groupes de paramètres physico-chimiques et associations.– Sur les plans factoriels de chacune des deux périodes (FIG. 2 et 3), on peut construire des groupes de paramètres plus ou moins corrélés (corrélations angulaires).

On constate, dans les deux cas, que les groupes sont très semblables. D'une façon générale, leur position suggère les associations cohérentes suivantes:

- opposition entre pH et Ca, dureté temporaire, conductivité,
- opposition entre Fe filtré, Fe non filtré, rapport Fe filtré/Fe non filtré, C organique et Eh, O_2, saturation en O_2,
- comportement identique entre Mg et Na,
- comportement voisin (surtout en automne) entre pH, O_2, saturation en O_2, SO_4, dureté permanente, NO_3 et K.

La distinction entre les deux saisons est marquée par la position des phosphates : au printemps, sous l'effet des inondations directes par le lac, ils se comportent comme les nitrates et le potassium (pôle eutrophe), tandis qu'en automne ils leur sont opposés. Ceci confirme le caractère limitant de cet élément dans les prairies humides naturelles (EGLOFF, 1983). Lorsque les teneurs en nitrates et potassium augmentent sous l'effet de l'activité biologique durant la saison estivale, les teneurs en phosphates deviennent limitantes. Au printemps, le synergisme de ces trois paramètres est induit principalement par le lac.

Ceci montre l'importance des inondations pour la végétation qui est inondée temporairement par le lac. La productivité annuelle dépasse 500 g/m² dans la prairie eutrophe à Laîche élevée inondée par le lac, alors qu'elle est de moins de 200 g/m² dans la prairie à petites Laîches, peu inondée, ou de 100 g/m² dans la prairie à Choin, jamais atteinte par les eaux du lac (BUTTLER, 1987).

Ces observations doivent être complétées par les remarques suivantes :

• Le comportement semblable du C organique et du fer (filtré et non filtré) est dû essentiellement à l'opposition de ces deux paramètres à O_2 et au Eh. La complexation du fer ferreux par la matière organique n'intervient que dans une moindre mesure (par adsorption). Même les complexes ferriques (solubles) formés en surface sont dégradés sous l'effet du calcium, lorsqu'ils atteignent les horizons profonds. Le fer ferrique est alors réduit en fer ferreux. Il faut donc attribuer à la matière organique un rôle essentiellement réducteur.

• La proximité angulaire entre dureté temporaire et Fe filtré (et non filtré) montre bien l'effet de la décarbonatation (liée au gaz carbonique), qui libère le fer contenu dans la matrice carbonatée. Les matrices de corrélations des différentes stations (TAB. I) ont montré que cette corrélation est plus forte dans le cas des sols sur sédiments lacustres.

• Le pH est opposé à Ca et à la dureté temporaire (cas d'un système ouvert), puisque l'agressivité à l'égard du calcaire est accrue avec une nappe plus acide.

• La conductivité est corrélée avec les ions en solution, comme par exemple le fer ferreux (fer filtré) ou le calcium. Cette corrélation s'affaiblit en automne s'il y a complexation par la matière organique (*cf.* page 41).

TABLEAU I.– Principales corrélations entre paramètres physico-chimiques dans l'eau des nappes (r > 0,5 avec P > 0,95).
Paramètres physico-chimiques abrégés :
Cond = conductivité ; **Dute** = dureté temporaire ; **Dupe** = dureté permanente ; **Corg** = carbone organique ; **Fenf** = fer non filtré ; **Fef** = fer filtré ; Fefnf = rapport fer filtré/fer non filtré ; **Fec** = fer non filtré - fer filtré ; **pcO_2** = % de saturation en oxygène.

	Sédiments lacustres (origine molassique)	Alluvions de l'Aar
	Prairie mésotrophe à Laîche élevée (CE-LASIOC.); N=15	Prairie eutrophe à Laîche élevée (CE-PHAL.); N=38
Nappe élevée	Eh - (-Fef - Fenf - Ca - Mg - Na - Dute) Mg - Na Fefnf - (- Mn) Eh - (- pcO2) Al - (- pcO2) Cond - Fef Cond - Al Corg - K Corg - Cl Corg - PO4 Dupe - Mn Dupe - (- Fef) Si - SO4 K - PO4 PO4 - Cl	Fec - Fenf Cond - (- Si) Ca - (- SO4) Cond - Ca Corg - Mn Dupe - (- Ca) Si - K Si - Mn K - (- Mg) NO3 - (- Fefnf)
	Prairie à Choin (OS-GAL.); N=42	Prairie à petites Laîches (CE-PAN.); N=45
Nappe basse	Eh - (- Fef - Fenf - Ca - Mg - Na - Dute) Mg - Na pH - (- Fef - Fenf - Fefnf) SO4 - (- Fef - Fenf - Ca) pcO2 - Dupe Dute - Si K - NO3 - Al	Fec - Fenf Cond - (- Si - pH) pcO2 - pH - (- Fef - Fenf - Fefnf - Ca - Mg - Dute) Eh - (- Fef) Fec - Mn Corg - Fef - Fenf Corg - Na

Corrélations générales :

Fef - Fenf - Ca - Mg - Dute
Fec - (- Fefnf)
K - Cl

Remarque : paramètre 1 - (paramètre 2) = corrélation inverse

• La conductivité est davantage liée au C organique en automne, car les grosses molécules de matière organique qui se sont accumulées en hiver sont fragmentées durant l'été (activité biologique), ce qui libère des ions dans la solution de sol.

• O_2 est corrélé avec SO_4 et par conséquent avec la dureté permanente, spécialement en automne, car le soufre est oxydé durant la saison estivale, principalement dans les horizons de surface, mieux aérés (*cf.* page 41). L'acidification liée à la réaction chimique n'intervient pas, le milieu étant suffisamment tamponné.

• K et NO_3 sont indirectement très liés, surtout en automne, après la période d'aération estivale du sol et d'intense activité biologique. Le potassium provient des argiles (recharge par l'intermédiaire des plantes), tandis que les nitrates sont libérés par la flore microbienne.

• PO_4 est très complexant à l'égard du fer ferrique (vivianite), ce qui explique l'opposition avec Fe non filtré moins Fe filtré (Fec).

Le comportement identique de Mg et de Na indique l'origine molassique de certains sédiments (BUTTLER & GOBAT, 1991).

B) Position des stations et des horizons pédologiques.– Les horizons pédologiques de la prairie mésotrophe à Laîche élevée sont toujours liés au pôle anaérobie, au printemps comme en automne. Les horizons de surface, en particulier l'horizon T, occupent une position un peu différente en raison des faibles valeurs pour le fer, le calcium, la conductivité et la dureté temporaire (voir également le tableau II).

Les horizons pédologiques de la prairie eutrophe à Laîche élevée se comportent de façon analogue à ceux de la même prairie mésotrophe, mais en automne l'horizon Aa rejoint le pôle aérobie (plus de O_2 et SO_4, voir également le tableau II).

Les horizons pédologiques de la prairie à petites Laîches se comportent de deux façons différentes, puisque les horizons AaAh et Go se démarquent, au printemps comme en automne, en occupant le pôle aérobie. Les deux horizons Gr (prélèvement à respectivement 50 et 85 cm de profondeur) occupent le pôle anaérobie.

Les horizons pédologiques de la prairie à Choin se comportent de façon très hétérogène et extrême. Les horizons Ah et Go occupent toujours le pôle aérobie, mais de

façon un peu différente: le premier ne présente que de faibles valeurs pour Ca, pour la dureté temporaire et pour la conductivité, tandis que le second est marqué par d'importantes valeurs pour O_2, SO_4 et pour la dureté permanente (voir également TAB. II). Les horizons Gro et Gr2 occupent le pôle anaérobie au printemps, mais en automne ils prennent une position intermédiaire. L'horizon Gr2 se comporte de façon extrême en raison de ses valeurs moyennes très élevées pour la dureté temporaire, pour Fe filtré, Fe non filtré, Ca, Mg et Na (voir également TAB. II).

Sur ces plans factoriels (FIG. 2 et 3) sont encore situés d'autres groupements végétaux, et notamment une prairie à Marisque (*Cladietum marisci* : CM) et une prairie à Choin (OS) développées sur molasse avec un sol superficiel du type pseudogley (BUTTLER & GOBAT, 1991). On constate que ces deux sols occupent constamment le pôle aérobie.

Quant au lac, au canal de la Broye et au ruisseau, leur position (non représentée) est systématiquement du côté aérobie. Le ruisseau est toujours décalé du côté des nitrates.

CORRÉLATIONS ENTRE PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES

Pour compléter l'image donnée par l'analyse en composantes principales, nous avons calculé pour l'ensemble des quatre stations considérées, puis pour chacune d'entre elles, la matrice de corrélations (linéaires) des paramètres physico-chimiques sur la base de l'ensemble des données piézométriques récoltées durant deux ans. Le tableau I en donne les principales tendances.

Les associations générales de paramètres physico-chimiques (valables pour toutes les stations) ont été discutées précédemment sur la base des résultats de l'analyse en composantes principales. Etant donné les contraintes statistiques choisies pour l'interprétation des corrélations, les associations discutées précédemment ne se retrouvent pas intégralement ici.

En ce qui concerne les corrélations spécifiques, nous ne retiendrons que les points suivants :

TABLEAU IIa.– Caractéristiques physico-chimiques moyennes de l'eau des nappes et du lac dans les différentes stations et horizons pédologiques.
Végétation :
CE-LASIOC. : Prairie mésotrophe à Laîche élevée ; CE-PHAL. : Prairie eutrophe à Laîche élevée ; CE-PAN. : Prairie à petites Laîches ; OS-GAL. : Prairie à Choin ; CM : Prairie à Marisque sur molasse ; OS : Prairie à Choin sur molasse ; P : Pinèdes sur molasse ; F : Frênaies.

Horizons pédologiques : **T** : tourbe ; **Aa** : anmoor ; **Ah** : hydromull ; **Go** : gley oxydé ; **Gr** : gley réduit.

Paramètres physico-chimiques abrégés :
Cond = conductivité ; **Dute** = dureté temporaire ; **Dupe** = dureté permanente ; **Corg** = carbone organique ; **Fenf** = fer non filtré ; **Fef** = fer filtré ; Fefnf = rapport fer filtré/fer non filtré ; **Fec** = fer non filtré - fer filtré ; **pcO_2** = % de saturation en oxygène.

STATION	N	pcO2	c.v.	O2	c.v.	Eh	c.v.	pH	c.v.	Cond	c.v.	Dute	c.v.	Dupe	c.v.
OS	10	48.4	51.8	4.9	52.9	175.7	97.7	7.5	2.1	640.7	79.5	282.0	21.5	13.1	55.5
CM	13	36.5	59.4	3.5	52.7	117.5	50.4	7.1	5.2	900.6	62.0	459.5	13.5	12.2	102.4
CE-LASIOC.:															
T	5	15.5	82.1	1.5	83.0	77.4	92.2	6.5	6.2	1115.0	129.3	167.6	5.2	5.4	111.6
Gr1	5	21.4	21.3	2.1	23.1	-82.2	159.1	6.7	3.2	1001.7	79.5	385.2	12.9	5.4	100.2
Gr2	5	24.8	31.2	2.5	33.9	-95.6	127.0	6.8	2.5	1208.3	71.1	497.0	2.8	0.	-
CE-PHAL.:															
Aa	12	33.9	70.5	3.2	66.1	-6.5	820.3	6.9	4.0	845.6	72.1	412.8	21.2	16.9	60.3
Gr1	13	28.7	54.1	2.7	49.9	-43.6	140.6	6.9	7.3	1006.1	52.3	540.3	7.3	13.8	69.3
Gr2	13	33.6	55.2	3.2	52.3	-38.5	200.8	6.8	2.9	1054.5	51.6	587.9	4.0	8.4	88.8
CE-PAN.:															
AaAh2	9	43.6	32.4	4.1	33.8	84.3	61.2	7.2	6.0	590.8	57.2	346.3	44.8	6.7	85.8
Go	10	44.4	44.3	4.2	44.0	104.4	45.9	7.3	4.4	671.2	61.2	345.5	11.1	6.0	84.3
Gr	13	30.7	32.3	2.9	30.2	5.2	1721.8	6.8	3.6	795.6	56.6	433.2	4.3	6.2	82.6
Gr	13	24.3	40.2	2.3	40.3	5.0	897.3	6.8	3.7	816.3	53.1	447.4	3.2	5.3	85.4
OS-GAL.:															
Ah	7	18.8	83.5	1.9	82.7	102.9	40.1	7.0	4.4	412.3	102.0	192.0	28.0	5.1	99.4
Go	11	47.7	49.1	4.7	49.3	138.4	46.7	7.2	3.7	684.8	76.6	331.5	18.7	13.1	89.2
Gro	11	27.1	49.8	2.7	49.4	2.5	3945.2	6.9	4.9	818.7	65.0	423.8	10.7	5.5	150.3
Gr2	13	20.6	46.5	2.0	45.1	-33.5	282.0	6.8	4.5	1116.5	53.2	635.6	4.0	3.1	243.7
LAC	13	106.5	7.1	10.1	13.2	71.5	332.7	8.1	6.3	305.9	57.6	126.8	9.2	11.6	60.4
BROYE	13	111.5	7.3	10.0	21.1	125.6	71.6	7.9	5.1	439.3	51.2	175.7	17.4	35.2	130.2
RUISSEAU	13	98.6	12.1	9.9	14.7	109.8	229.9	8.3	1.9	750.4	56.8	311.2	7.8	41.8	34.6
PLUVIOMETRE1	10	-	-	-	-	-	-	4.7	22.8	-	-	-	-	-	-
PLUVIOMETRE2	9	-	-	-	-	-	-	4.5	14.8	-	-	-	-	-	-

• Les deux stations avec nappe basse présentent une corrélation inverse entre le pH et Fe filtré, Fe non filtré, le rapport Fe filtré/Fe non filtré. Ceci s'explique par la précipitation plus rapide du fer dans la gamme de pH des deux stations en question (voir diagramme de stabilité du fer en fonction du Eh et du pH chez MISEREZ, 1973).

• Les deux stations sur sédiments lacustres présentent une corrélation positive entre Mg et Na, ce qui indique l'origine molassique des sables (la même indication est donnée par la corrélation Si-SO_4). Ces deux mêmes stations présentent encore une opposition entre Eh et Fe filtré, Fe non filtré, Ca, Mg, Na, dureté temporaire. Cette dernière est probablement liée à la nature du substrat (plus de fer et de calcaire libérés par la matrice des sédiments).

• Les deux stations sur alluvions de l'Aar présentent une corrélation inverse entre la conductivité et Si, ainsi qu'une corrélation positive entre Fe non filtré moins Fe filtrée et Fe non filtré.

• La corrélation positive entre C organique et K dans la prairie mésotrophe à Laîche élevée pourrait être due à la présence de tourbe.

• La corrélation positive entre Si et K dans la prairie eutrophe à Laîche élevée indique la présence d'argiles fines dans la matrice carbonatée, et probablement aussi dans la solution filtrée.

• La prairie à Choin possède des caractères de milieu aéré : corrélation entre K et NO_3 ainsi qu'opposition entre SO_4 et Fe filtré, Fe non filtré, Ca.

Nous avons également calculé les matrices de corrélations aux deux périodes considérées pour l'analyse en

TABLEAU IIb.– Caractéristiques physico-chimiques moyennes de l'eau des nappes et du lac dans les différentes stations et horizons pédologiques. (N = nombre de mesures, c.v. = coefficient de variation ($s/\overline{X}$ * 100) résultats en mg/l, sauf pcO_2 (%), Eh (mV), Cond (uS) et Corg (sans unité).

Végétation :
CE-LASIOC. : Prairie mésotrophe à Laîche élevée ; CE-PHAL. : Prairie eutrophe à Laîche élevée ; CE-PAN. : Prairie à petites Laîches ; OS-GAL. : Prairie à Choin ; CM : Prairie à Marisque sur molasse ; OS : Prairie à Choin sur molasse ; P : Pinèdes sur molasse ; F : Frênaies.

Horizons pédologiques : **T** : tourbe ; **Aa** : anmoor ; **Ah** : hydromull ; **Go** : gley oxydé ; **Gr** : gley réduit.

Paramètres physico-chimiques abrégés :
Cond = conductivité ; **Dute** = dureté temporaire ; **Dupe** = dureté permanente ; **Corg** = carbone organique ; **Fenf** = fer non filtré ; **Fef** = fer filtré ; Fefnf = rapport fer filtré/fer non filtré ; **Fec** = fer non filtré - fer filtré ; **pcO_2** = % de saturation en oxygène.

STATION	Corg	c.v.	Fef	c.v.	Fenf	c.v.	Ca	c.v.	Mg	c.v.	K	c.v.	Na	c.v.	NO3	c.v.	PO4	c.v.	SO4	c.v.
OS	454.7	26.0	0.3	120.4	1.2	64.5	95.3	24.9	13.5	23.5	2.0	26.8	6.6	65.8	0.3	139.6	0.1	253.9	21.8	49.0
CM	304.3	24.9	0.2	89.1	1.4	184.5	141.6	23.4	21.4	29.6	3.3	304.7	16.5	65.4	0.1	170.8	0.1	144.2	34.5	50.0
CE-LASIOC.:																				
T	761.8	7.0	3.3	36.0	4.1	57.5	63.8	6.2	4.5	10.8	0.3	58.3	5.2	27.5	0.1	223.6	0.	-	4.7	35.6
Gr1	1146.8	31.5	18.6	41.6	22.8	21.9	163.7	15.6	6.1	10.7	1.8	68.6	6.7	7.6	0.	-	0.0	223.6	4.0	43.4
Gr2	614.2	28.4	26.7	26.8	33.5	15.2	201.2	8.2	10.2	7.7	0.3	102.2	9.3	11.2	0.0	223.6	0.	-	4.8	93.0
CE-PHAL.:																				
Aa	1091.7	42.7	7.3	53.1	8.8	50.5	165.4	24.8	4.7	18.6	1.0	43.2	1.8	71.3	0.1	277.6	0.1	134.8	20.5	80.3
Gr1	949.2	25.9	10.7	31.5	13.4	33.3	207.1	11.1	6.3	8.2	0.8	61.1	2.8	54.9	0.0	360.6	0.0	204.9	13.0	137.8
Gr2	782.8	31.8	11.3	16.1	13.0	21.4	228.1	11.4	8.2	7.8	0.3	86.1	2.2	57.1	0.0	244.1	0.0	360.6	8.5	106.0
CE-PAN.:																				
AaAh2	334.4	38.4	0.3	137.0	2.4	105.3	145.8	69.5	3.5	38.1	2.1	54.9	0.6	66.2	0.1	131.3	0.1	181.8	11.2	70.9
Go	239.9	30.6	0.2	111.1	2.1	140.0	123.1	19.6	3.8	19.4	1.4	121.8	1.1	78.0	0.1	100.0	0.1	188.6	9.7	65.7
Gr	397.2	31.1	5.0	66.2	7.1	64.2	170.9	8.6	5.0	9.5	0.5	48.3	1.7	58.9	0.1	160.2	0.1	235.6	6.5	79.0
Gr	371.4	30.2	5.0	37.1	5.9	32.6	173.1	9.3	5.2	7.1	0.3	72.3	1.3	53.3	0.0	244.1	0.1	314.9	5.2	85.0
OS-GAL.:																				
Ah	422.1	39.4	0.8	128.9	1.8	134.3	70.7	36.2	3.8	33.2	3.0	91.5	1.5	70.1	0.1	170.8	0.1	170.8	10.8	62.1
Go	200.8	32.1	0.3	176.6	0.8	87.3	124.9	23.7	7.1	23.2	0.7	63.3	3.8	108.7	0.1	143.0	0.0	171.3	14.5	63.5
Gro	164.8	39.8	5.0	66.7	6.6	51.4	151.1	15.4	10.7	13.3	0.5	45.5	6.6	60.1	0.1	150.4	0.0	331.7	10.9	104.3
Gr2	320.5	37.8	11.5	23.4	13.6	19.1	194.5	8.9	27.4	11.2	1.7	246.6	22.4	54.8	0.1	207.5	0.0	259.6	5.6	77.3
LAC	42.9	23.5	0.0	190.0	0.1	310.2	45.1	12.1	6.0	8.9	1.9	18.6	6.1	195.2	1.7	53.7	0.1	180.6	15.3	21.6
BROYE	70.2	32.9	0.0	244.1	0.1	215.7	63.2	18.9	10.2	15.1	3.4	23.2	5.6	52.0	8.6	61.2	0.1	93.4	22.8	19.3
RUISSEAU	68.6	62.5	0.0	204.9	0.2	142.8	122.1	33.4	24.6	41.5	3.6	38.6	13.5	62.3	14.9	68.4	0.8	48.5	25.8	17.4
PLUVIOMETRE1	207.6	126.3	0.1	82.0	-	-	6.1	64.2	0.2	68.6	0.4	65.3	0.3	61.1	2.2	82.6	0.2	73.4	5.8	45.2
PLUVIOMETRE2	143.6	150.9	0.1	132.3	-	-	3.7	71.7	0.2	79.4	0.3	49.6	0.4	100.0	1.4	103.5	0.1	145.4	5.3	41.1

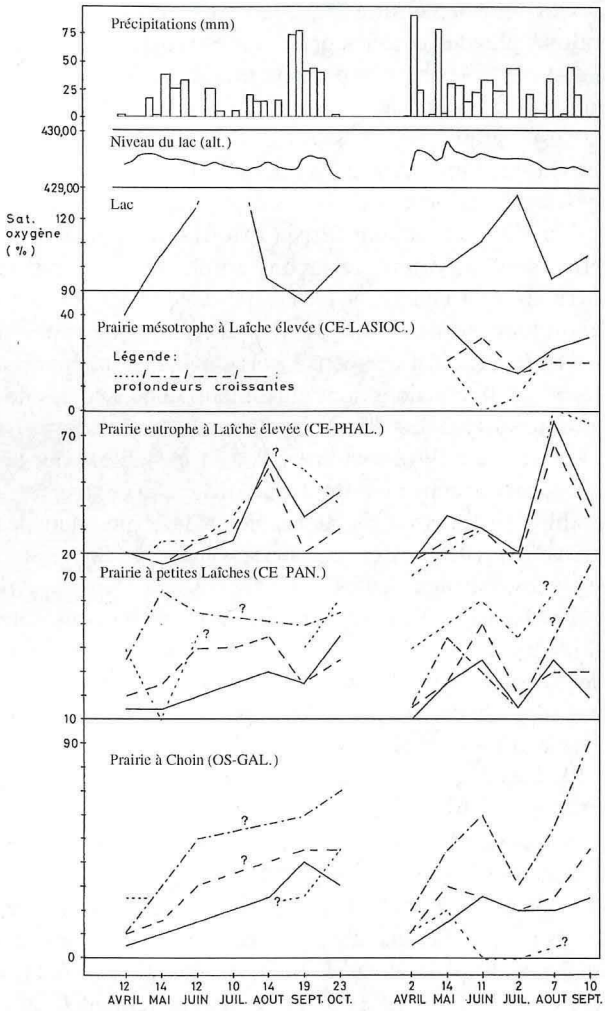


FIG. 4.– Courbes de variation de la saturation en oxygène dans l'eau des nappes (années 1984-85).

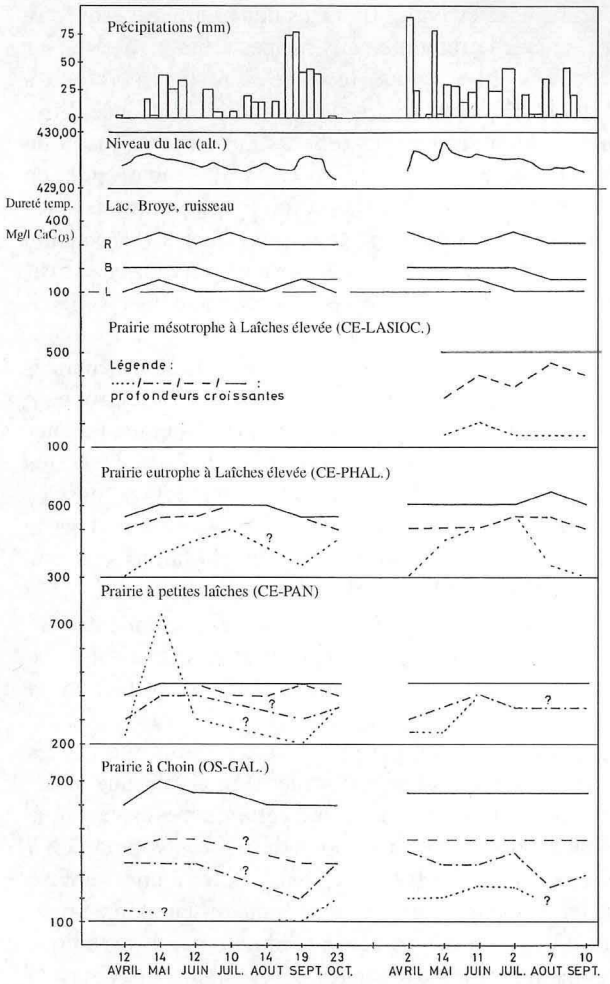


FIG. 5.– Courbes de variation de la dureté temporaire dans l'eau des nappes (année 1984-85).

composantes principales (printemps et automne), en prenant l'ensemble des stations. Le passage d'une saison à l'autre est marqué principalement par :

- un affaiblissement des corrélations positives conductivité-Ca, conductivité-dureté temporaire et Fe filtré-Ca,
- un renforcement des corrélations positives Eh-dureté permanente, SO_4-dureté permanente et Eh-O_2-pH-SO_4,
- un renforcement de l'opposition entre Eh et dureté temporaire, entre Eh et Ca, entre dureté permanente et Fe filtré, Fe non filtré, ainsi qu'entre le rapport Fe filtré/Fe non filtré et O_2, Eh, pH, SO_4.

Ces résultats montrent bien les conséquences de l'augmentation de l'activité biologique et de l'aération au cours de la saison estivale : le Ca est mobilisé partiellement par la matière organique (humates de calcium), tandis que les teneurs en NO_3 et surtout en SO_4 augmentent.

TENEURS MOYENNES ET COURBES DE VARIATION DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES

Saturation en oxygène (TAB. II et FIG. 4) :

Dans les nappes, les teneurs moyennes sont inférieures à 50 %, tandis que dans le lac, le canal de la Broye et le ruisseau, elles sont près de la saturation (l'eau du lac est souvent sursaturée, comme le remarque aussi SOLLBERGER, 1974). On constate que les courbes de variation sont différentes selon les stations. Dans la prairie mésotrophe à Laîche élevée les valeurs sont constamment très basses (données pour une année seulement), tandis que dans la prairie eutrophe à Laîche élevée les teneurs augmentent considérablement en même temps que la nappe chute durant l'été. Les pluies de fin août-septembre, qui provoquent la remontée généralisée des nappes, occasionnent une baisse immédiate de la teneur en oxygène.

En 1985 l'aération est plus marquée, en raison de la relative sécheresse estivale. Dans les deux autres stations, au sol plus aéré, la remontée des nappes a moins d'effet sur les teneurs en oxygène, lesquelles restent stables ou continuent d'augmenter jusqu'en octobre (présence d'hydromull). Dans le lac, les teneurs augmentent jusqu'en juillet et baissent dès août. On remarque encore que, de façon générale, les horizons profonds (gleys réduits) présentent des teneurs en oxygène plus faibles (les valeurs basses de certains horizons de surface doivent être attribuées à la mauvaise conservation de l'eau dans les piézomètres).

Eh (Tab. II) : Les potentiels moyens sont généralement négatifs pour les prairies mésotrophe et eutrophe à Laîche élevée, et positifs pour la prairie à petites Laîches et la prairie à Choin (ainsi que pour le lac). Dans les nappes, un gradient décroissant des potentiels se dessine généralement vers la profondeur. Les variations dans le temps sont, dans l'ensemble, relativement faibles, excepté pour les horizons profonds des gleys oxydés.

pH (Tab. II) : Les valeurs moyennes varient entre 6,5 et 6,9 pour les prairies mésotrophe et eutrophe à Laîche élevée, entre 7 et 7,3 dans les horizons de surface de la prairie à petites Laîches et la prairie à Choin. Le lac est plus basique avec un pH moyen plus grand que 8. Les courbes de variation (non présentées) montrent que le pH des nappes peut varier, dans une certaine mesure, conformément au pH des précipitations (lesquelles vont de 3,3 à 6,7). Yerly (1970) attribue ces fluctuations à un complexe de facteurs d'origine inorganique (pouvoir tampon, température du sol, teneur en eau, précipitations) et organique (produits acides libérés par les micro-organismes, surtout anaérobies).

Conductivité (Tab. II) : Les valeurs moyennes sont généralement plus élevées dans les prairies mésotrophe et eutrophe à Laîche élevée, ainsi que dans l'horizon Gr2 de la prairie à Choin. Dans tous les cas, on observe un gradient d'augmentation vers la profondeur. La variation dans le temps est très faible. Le lac présente une conductivité moyenne plus faible que les nappes, mais également très stable dans le temps.

Dureté temporaire (Tab. II et Fig. 5) : Les valeurs moyennes augmentent systématiquement avec la profondeur (forte séparation des horizons pédologiques de la prairie mésotrophe à Laîche élevée et surtout de l'horizon Gr2 de la prairie à Choin), alors que les variations dans le temps sont faibles, excepté pour les horizons de surface (particulièrement celui de la prairie eutrophe à Laîches élevée) qui, après une progression plus ou moins marquée au cours du printemps et de l'été, accusent une baisse, probablement sous l'effet de la remontée des nappes. Les valeurs du ruisseau sont nettement supérieures à celles du lac ou du canal de la Broye, lesquelles restent faibles par rapport aux valeurs atteintes dans les nappes.

Carbone organique (Tab. II) : Les teneurs moyennes sont plus grandes pour les prairies mésotrophe et eutrophe à Laîche élevée (humus du type tourbe ou anmoor tourbeux), avec un gradient d'augmentation vers la surface. L'été est marqué par une augmentation sensible et généralisée des teneurs (activité biologique). Les valeurs du lac sont toujours faibles.

Fer filtré et fer non filtré (Tab. II) : Ces deux paramètres se comportent de façon semblable. Les valeurs moyennes sont nettement plus importantes dans les horizons minéraux des prairies mésotrophe et eutrophe à Laîche élevée, ainsi que dans l'horizon Gr2 de la prairie à Choin. Les fluctuations sont plus importantes dans les horizons de surface des stations à nappe élevée. Les rapports Fe filtré/Fe non filtré sont proches de 1 et stables pour les prairies mésotrophe et eutrophe à Laîche élevée, mais très variables en fonction des horizons et du temps pour les deux autres stations. Les teneurs dans le lac, la Broye et le ruisseau sont insignifiantes.

Potassium (Tab. II) : Les teneurs moyennes sont faibles partout, mais généralement un peu plus élevées dans les horizons de surface, spécialement dans les stations moins hydromorphes, où l'enracinement est profond (remontée biologique et lessivage de la litière - Tukey, 1970). Les valeurs moyennes du ruisseau et de la Broye sont à peine plus élevées.

Nitrates (Tab. II) : Teneurs moyennes très faibles dans les nappes, mais nettement plus importantes dans le lac, la Broye et surtout dans le ruisseau (avec de fortes variations temporelles et, en particulier, une chute des teneurs dans le lac, en plein été, phénomène également observé par Sollberger, 1974). Les teneurs étant tellement faibles dans les nappes, il est difficile de dégager des tendances dans la variabilité. On peut toutefois remarquer que les périodes d'inondation par le lac, qui affectent la prairie eutrophe à Laîche élevée et la prairie à petites Laîches, sont marquées par une légère augmentation du taux de nitrates dans les nappes, tandis que dans la prairie à Choin, plus sèche, l'augmentation des teneurs est plutôt liée à l'activité biologique de la saison estivale. Les teneurs plus importantes observées dans l'eau de pluie (jusqu' à 7 mg/l) n'ont pas de conséquences mesurables sur les nappes.

Phosphates (Tab. II) : Teneurs moyennes très faibles à nulles partout, excepté dans le ruisseau, lequel présente des valeurs un peu plus importantes.

Sulfates (Tab. II) : Les teneurs moyennes sont importantes dans les horizons de surface, excepté dans la prairie mésotrophe à Laîche élevée (tourbe). Les variations dans le temps sont considérables et traduisent, surtout pour les stations les plus sèches, une augmentation des teneurs liée à la saison estivale. Lac, Broye et ruisseau présentent également des teneurs moyennes importantes (même ordre de grandeur que dans les horizons de surface), mais les fluctuations sont minimes.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

RELATIONS ENTRE LE CHIMISME DES NAPPES ET LES SOLS

Le chimisme des nappes confirme parfaitement, pour les stations étudiées, l'intensité des caractères d'hydromorphie mis en évidence par l'étude des sols et des types d'humus en particulier (BUTTLER, 1987 ; BUTTLER & GOBAT, 1991). Ainsi, la prairie mésotrophe à Laîche élevée avec tourbe eutrophe sur anmoor et la prairie eutrophe à Laîche élevée avec gley réduit à anmoor tourbeux sont nettement marquées par des caractères physico-chimiques anaérobies (Eh négatifs, teneurs importantes en carbone organique et fer filtré). Mais dans le cas du gley réduit à anmoor tourbeux, l'assèchement estival a pour effet une modification des caractères de l'horizon de surface, qui acquiert ainsi des propriétés aérobies (en particulier plus d'oxygène et de sulfates). Dans le cas de la prairie à petites Laîches avec gley oxydé humifère à anmoor-hydromull et la prairie à Choin avec gley oxydé humifère à hydromull, les caractères physico-chimiques aérobies sont marqués non seulement dans les horizons organo-minéraux, mais également dans les horizons Go sous-jacents.

Quant aux deux stations sur molasse avec des sols du type pseudogleys (stations CM et OS sur les FIG. 2 et 3), on constate qu'elles sont marquées par des caractères physico-chimiques aérobies, ce qui confirme l'origine pluviale et le caractère temporaire de la nappe perchée.

L'importance relative du magnésium, du potassium et du sodium pour les pseudogleys sur molasse, constatée lors de l'étude pédologique (BUTTLER & GOBAT, 1991) est confirmée ici. Le tableau des valeurs (TAB. II) montre en effet que les teneurs de ces éléments sont plus importantes dans le cas des deux stations sur molasse (OS et CM). Mais on voit, en outre, que les sols sur sédiments lacustres (stations CE-lasioc. et OS-Gal.) présentent aussi des teneurs élevées, ce qui met bien en évidence l'origine molassique des sédiments de la beine. Cette situation explique la corrélation entre le magnésium et le sodium, mise en évidence sur les FIG. 2 et 3, ainsi que dans le tableau I.

RELATIONS ENTRE LE CHIMISME DES NAPPES ET LA VÉGÉTATION

Si l'étude géochimique des nappes permet de bien distinguer les milieux étudiés, c'est spécialement par l'action des équilibres thermodynamiques (faisant intervenir le CO_2, le fer, l'oxygène et le Eh notamment) et moins par celle des équilibres biologiques (faisant intervenir les nitrates et les phosphates p. ex.). En effet, le niveau de fertilité des sols, si l'on considère les facteurs biocénotiques comme les nitrates, les phosphates et le potassium, ne discrimine que médiocrement nos différentes prairies, puisque les teneurs sont généralement très faibles partout (TAB. II), bien que certaines d'entres elles soient inondées par l'eau du lac plus riche en nitrates. On sait, en effet, que l'azote mis à disposition dans les sols par la minéralisation nette est immédiatement absorbé par les végétaux, ce qui fait que les teneurs mesurables dans les sols et les nappes sont la plupart du temps insignifiantes et surtout sans rapport avec la productivité (ELLENBERG, 1977). La même remarque est faite par SOLLBERGER (1974) pour le phosphore de l'eau des lacs. BAYLEY *et al.* (1985) constatent également, en milieu marécageux, qu'avec un apport de phosphore et d'azote, on augmente surtout les teneurs de ces éléments dans la minéralomasse de la végétation, alors qu'aucun changement n'apparaît dans le sol. C'est la raison pour laquelle certains auteurs ont abordé la fertilité des sols par la méthode de l'incubation *in vitro* et *in situ*. En milieu aquatique, ULEHLOVA & PRIBIL (1978) ont étudié le phosphore et l'azote de l'eau en distinguant différentes fractions (éléments totaux, minéraux et organiques sur des échantillons filtrés à 45 et 0,4 microns) permettant de mieux cerner le niveau de fertilité potentielle du milieu. BUTTLER (1987) a considéré ce problème de la fertilité en étudiant la minéralomasse de la végétation puisque, comme le remarquent également DYKYJOVA & ULEHLOVA (1978), celle-ci reflète le niveau de fertilité du sol et de l'eau, tout en caractérisant le « feedback » de l'enrichissement du milieu par la végétation (FIG. 6).

RELATIONS ENTRE LE CHIMISME DES NAPPES ET CELUI DU LAC

L'intérêt de la relation des marais avec le lac réside surtout dans l'éventuel enrichissement des milieux en éléments nutritifs, particulièrement lorsqu'il y a inondation directe par le lac, comme c'est le cas pour la prairie eutrophe à Laîche élevée et, dans une moindre mesure, pour la prairie à petites Laîches. Or parmi les éléments nutritifs majeurs, on peut constater, d'une façon générale (TAB. II), que seuls les nitrates sont présents en quantités plus importantes dans l'eau du lac. Pourtant, à cet égard, l'effet des inondations est à peine perceptible. Comme indiqué précédemment, c'est l'absorption immédiate par la végétation (ainsi que par les micro-organismes du sol) de tout excès en nitrates qui explique cette situation. Le mécanisme est identique pour les phosphates. Pourtant, la productivité de la végétation ne laisse aucun doute sur le niveau élevé de fertilité dans cette prairie eutrophe (BUTTLER 1987), surtout si on la compare à la prairie mésotrophe de la même association. La figure 6 illustre la répartition, par unité de surface, des teneurs en azote, phosphore et potassium dans la végétation des quatre types de prairies. La plus grande fertilité des sols inondés par le lac apparaît ainsi très clairement.

Comme le suggère ARREGUIT (1990), la présence, dans la rhizosphère du roseau notamment, de bactéries aérobies fixatrices d'azote se développant dans des microsites aérés du gley réduit, peut aussi influencer le cycle de l'azote dans certains milieux.

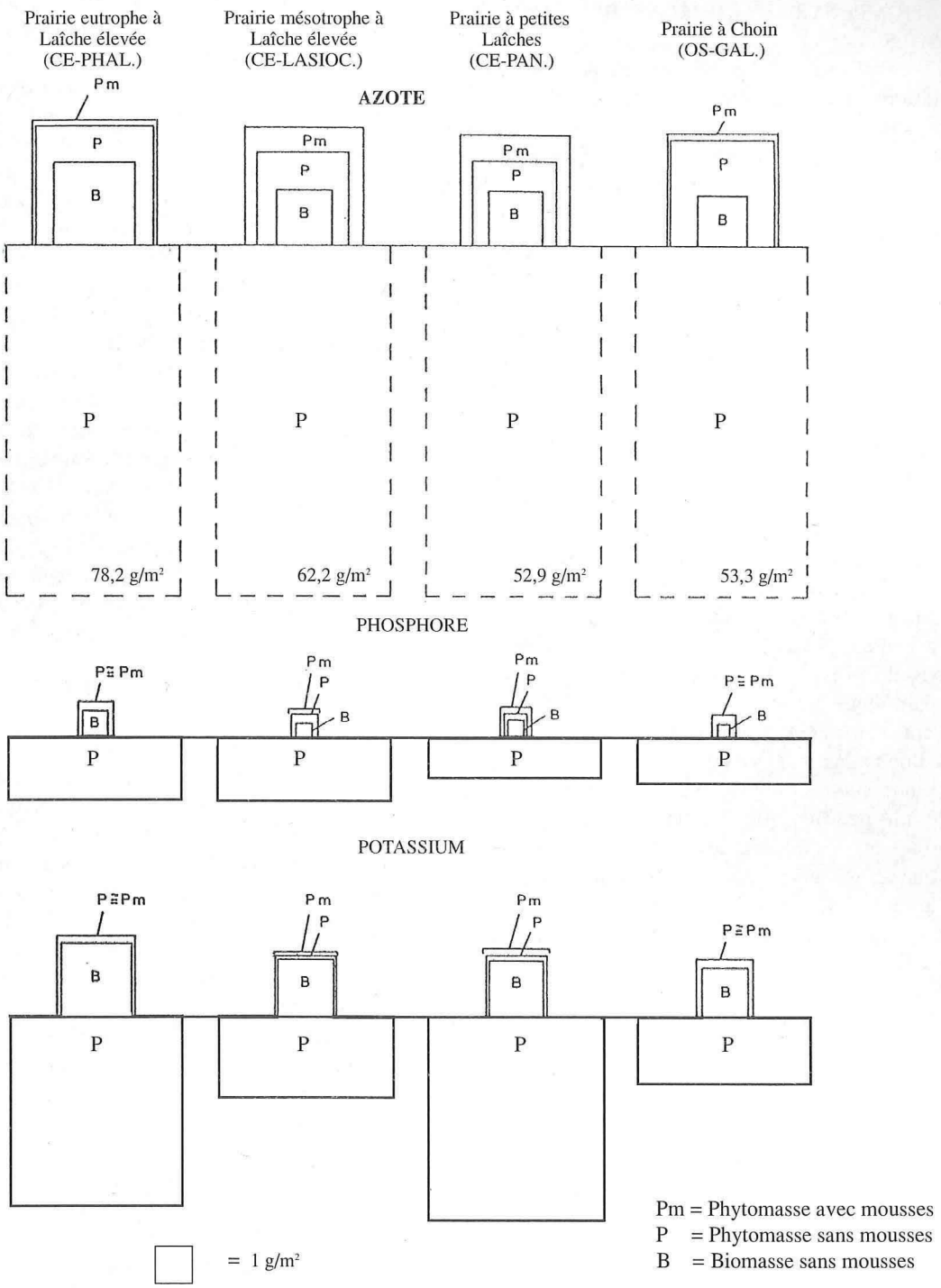


FIG. 6.– Répartition des principaux éléments minéraux dans les parties aériennes et souterraines de la végétation (la surface des carrés est proportionnelle aux quantités en g/m², sauf pour les valeurs dépassant 50 g/m², indiquées avec un carré en traits interrompus).

CONSÉQUENCES POUR LA GESTION DES MARAIS

La simple définition d'une association végétale n'est pas toujours suffisante pour caractériser valablement le milieu du point de vue de l'écologie végétale et pour permettre une gestion intégrée. Le cas des prairies humides de la rive sud du lac de Neuchâtel illustre bien ce propos, puisque pour les deux associations végétales décrites ici (*Caricetum elatae* et *Orchio-Schœnetum nigricantis*), il existe une certaine diversité de sols et de nappe dont il faut tenir compte lors de l'entretien. Une connaissance plus approfondie de la végétation (variantes d'association), des types de sols, de l'hydrodynamique, de l'hydrochimie et des cycles biogéochimiques a permis de mieux comprendre l'évolution de ces prairies et d'orienter les mesures d'entretien (BUTTLER, 1987). Le fauchage des marais, en particulier, se pose en termes différents selon les types de milieux :

Dans le cas des associations végétales humides et régulièrement inondées par le lac (p. ex. prairie eutrophe à Laîche élevée sur gley réduit à anmoor tourbeux ou roselière), le fauchage doit se faire principalement dans un but d'épuration des eaux du lac. Cela veut dire qu'il faut faucher pour exporter les éléments nutritifs apportés par le lac, ce qui empêche leur remise en circulation lors de la décomposition des litières. Par le fauchage de cette végétation on évite aussi, à terme (et surtout dans les milieux faiblement inondés par le lac), l'évolution vers la pseudo-roselière.

Dans le cas des milieux plus secs non inondés par le lac (par exemple la prairie à Choin sur gley oxydé humifère à hydromull), le fauchage doit empêcher à la fois l'embroussaillement et l'autofumure qui pourraient entraîner, à plus ou moins brève échéance, un changement de composition floristique.

Dans les milieux à nappe élevée et stable où se forme de la tourbe, le fauchage ne constitue pas une priorité. L'accumulation de matière organique étant principalement souterraine, l'entretien devrait plutôt s'orienter vers le rajeunissement des sols par le creusage d'étangs. L'action très sélective de l'hydromorphie limite considérablement l'embroussaillement.

De même, le rythme et la période de fauchage peuvent avoir des effets différents sur la composition floristique et sur la physionomie selon les types de prairies (BUTTLER, 1987, 1992).

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier de leur collaboration MM. J.-M. GOBAT, J.-C. VEDY, professeurs, ainsi que MM. PH. CORNALI, M. BUECHE, Y. BOUYER, J.-P. DUBOIS, J.-D. TEUSCHER, Y. LAVANCHY, et Mlles C. CACCIA et M. GAFNER. Ce travail a été partiellement subventionné par le Fonds national suisse de la recherche scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

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

BAYLEY, S.E., ZOLTEK, J., HERMANN, A.J., DOLAN, T.J. & TORTORA, L., (1985).– Experimental manipulation of nutrients and water in a freshwater marsh : effects on biomass, decomposition and nutrient accumulation. *Limnol. Oceanogr.*, 30 (3) : 500-512.

BOUYER, Y. & KUBLER, B., (1981).– Hétérogénéité chimique et hydrologique des eaux souterraines d'un karst du Haut-Jura neuchâtelois, Suisse. *Journal of Hydrology*, 54 : 315-339.

BOUYER, Y. & POCHON M., (1980).– La migration du fer en milieu marécageux dans le Haut-Jura et dans le plateau molassique suisse. *Bull. BGS*, 4 : 42-48.

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

BUTTLER, A., BUECHE, M., CORNALI, Ph. & GOBAT J.-M., (1985).– Historischer und ökologischer Ueberblicküber 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 influ ence du fauchage sur la végétation*. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel : 284 p.

BUTTLER, A. & GALLANDAT, J.-D., (1990).– Phytosociologie des prairies humides de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse) et modèle de succession autogène. *Phytoc œnologia*, 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.

BUTTLER, A., (1992).– Permanent plot research in wet meadows and cutting experiment. *Vegetatio* (sous presse).

DYKYJOVA, D. & ULEHLOVA, B., (1978).– Structure and chemistry of the fishpond bottom. *In* : DYKYJOVA, D., *et al.*, (1978). Pond littoral ecosystems. *Ecological Studies*, 28 : 141-156. Springer Verlag, Berlin.

EGLOFF, Th., (1983).– Der Phosphor als primär limitierender Nährstoff in Streuwiesen (Molinion), Düngungsexperiment im unteren Reusstal. *Ber. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich*, 50 : 119-148.

ELLENBERG, H., (1977).– Stickstoff als Standortsfaktor, insbesondere für mittel-europäische Pflanzengesellschaften. *Œcol. Plant.*, 12 (1) : 1-22.

MISEREZ, J.-J., 1973.– *Géochimie des eaux du karst jurassien*. Thèse Univ. Neuchâtel, 313 p.

SOLLBERGER, H., (1974).– *Le lac de Neuchâtel (Suisse)*. Thèse, Univ. de Neuchâtel, 434 p.

TUKEY, H.B., (1970).– The leaching of substances from plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 21: 305-324.

ULEHLOVA, B. & PRIBIL S., (1978).– Water chemistry in the fishpond littorals. *In* : DYKYJOVA, D., *et al.*, (1978). Pond littoral ecosystems. *Ecological Studies*, 28 : 126-140. Springer Verlag, Berlin.

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.