Zeitschrift: Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

Band: 102 (1979)

Artikel: Répartition de quelques éléments dans les sédiments de surface du lac de Neuchâtel, modèle sédimentologique et géochimique

Autor: Kübler, Bernard / Bétrix, Marc-Aurèle / Fauguel, Philippe

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-89144

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

INSTITUT DE GÉOLOGIE, UNIVERSITÉ DE NEUCHATEL

LABORATOIRE DE MINÉRALOGIE, PÉTROGRAPHIE ET GÉOCHIMIE

RÉPARTITION DE QUELQUES ÉLÉMENTS DANS LES SÉDIMENTS DE SURFACE DU LAC DE NEUCHATEL, MODÈLE SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOCHIMIQUE

par

BERNARD KÜBLER, MARC-AURÈLE BÉTRIX et PHILIPPE FAUGUEL

AVEC 10 FIGURES ET 5 TABLEAUX

Introduction

Avant l'étude plus approfondie des sédiments de l'ensemble du lac de Neuchâtel, deux campagnes préliminaires d'échantillonnage ont eu lieu en 1978, dans le but de déterminer les ordres de grandeur des teneurs et de leur variation.

Le plan d'échantillonnage décidé en commun avec Mme Podkorny et M. Mathey du Laboratoire cantonal, M. Stettler du Service des eaux de la ville de Neuchâtel, devait toucher les trois périmètres de sédimentation du bassin neuchâtelois, c'est-à-dire le plateau, le talus et la zone profonde.

Les résultats de la première campagne (18 échantillons) (juin 1978) sont très significatifs et confirment les modèles de réflexions élaborés il y a 20 ans à la suite d'une étude sommaire.

Nous présentons ici ces résultats complétés par quelques résultats des 27 échantillons de la seconde campagne.

Travaux antérieurs — Résultats acquis

En 1957-1958, 100 échantillons de sédiments pour 31 stations ont été prélevés par bennages et carottages légers (voir fig. 1). Cette étude, qui entrait dans le cadre des campagnes d'étude de l'état sanitaire du lac de Neuchâtel menées par le Laboratoire cantonal, avait pour but de dresser un constat sommaire de l'état des sédiments avant la mise en service des stations d'épuration.

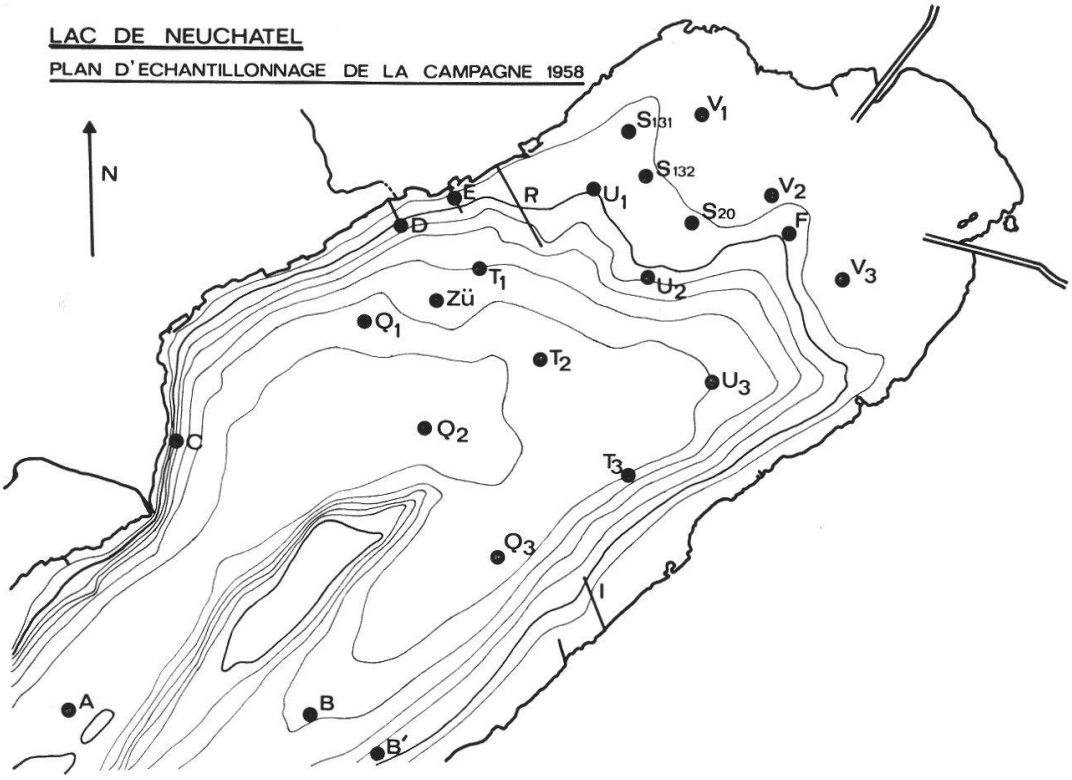

Fig. 1. Plan d'échantillonnage de la campagne 1958.

Les principales données mesurées étaient la granulométrie, le CO_2 carbonate, le résidu insoluble à l'HCl, le CO_2 organique, le phosphore total, l'H_2S, l'eau de porosité et quelques densités.

De cette étude relativement sommaire, il est ressorti les faits suivants.

La zone agitée soumise à l'action des vagues forme souvent un plateau dont la profondeur n'est pas la même partout, mais en tout cas au NE du lac elle va jusqu'à —20 m. Toutes les analyses granulométriques concordent : la médiane des tailles est supérieure ou égale à 200 μm. Les teneurs en carbonates restent inférieures à 50 %. En dehors des périmètres de pollution, les teneurs en C organique sont souvent inférieures à 0,8 % et celles en S^{2-} inférieures à 30 g/T.

Le raccord de cette zone à une zone plus profonde, celle qu'avait définie PORTNER (1951), est parfois compliqué, notamment sur le littoral SW entre Portalban et Cudrefin. Cependant au-dessous de 30 m la sédimentation fine prédomine, elle est à majorité carbonatée.

Le carbone organique, inférieur en général à 1 %, ne dépasse cette valeur que dans les périmètres pollués. L'augmentation générale, avec la profondeur, du soufre réduit est perturbée au droit des sources de pollution. La granulométrie de la phase soluble des sédiments suit une loi de décroissance avec la profondeur (cf. fig. 2). Celle du sédiment intact jusqu'à —40 m semble aussi générale mais avec des complications entre 15 et 20 m (cf. fig. 2). L'ensemble de ces faits résumés dans un rapport inédit (KUBLER 1959) a servi à élaborer un modèle sédimentologique et

TABLEAU I

Teneurs moyennes par station, campagnes 1957-1958

Stations	Prof. d'eau m	Bennes $CaCO_3$ moyen%	Carottes $CaCO_3$ moyen%	Bennes C.Organ. moyen%	Carottes C. Organ. moyen%	S^{-2} g/T
A	146	69,3	69,1	0,64	0,91	150
B	101	78,6	73,5	0,59	0,87	161
C	56	69,7	67,9	1,22	0,80	170
B′	48	74,7	73,8	0,61	0,47	70
D	47	64,8	66,7	1,15	0,86	150
F	19	49,1	50,8	0,81	0,79	92
E	16	47,7	46,9	3,41	2,71	94

géochimique qu'il s'agissait de tester par une analyse avec des moyens beaucoup plus évolués et des techniques beaucoup plus fidèles qu'en 1957-1959.

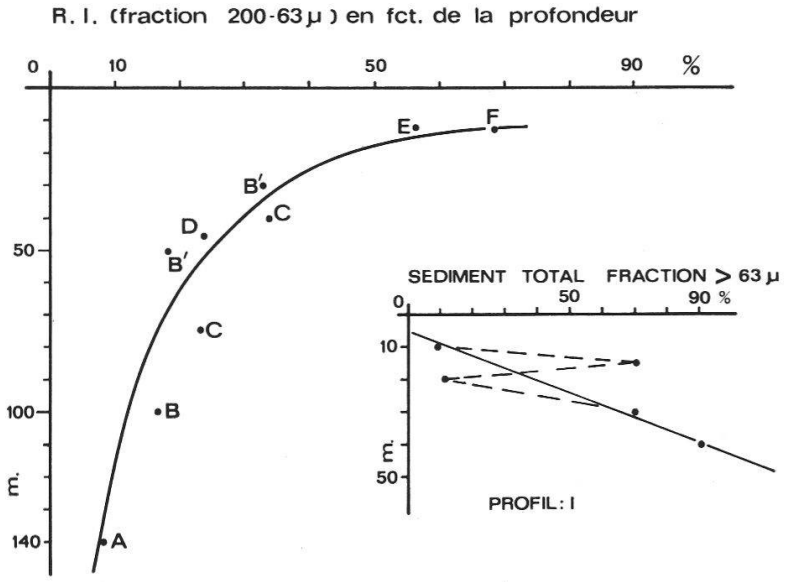

Fig. 2. Résidu insoluble (fraction 200-63 μm) en fonction de la profondeur.

Modèles de travail : sédimentologique, géochimique

Le lac de Neuchâtel conjugue heureusement des circonstances très favorables pour qu'à l'aide d'un nombre relativement restreint de données, un modèle sédimentologique raisonnable puisse être élaboré.

Parmi ces circonstances il faut citer :

1. le caractère basique des eaux conduisant à une précipitation de calcite que l'on appellera la sédimentation autochtone typique ;
2. la présence, sur presque toutes les rives, de sables ou limons terrigènes à base de grains détritiques provenant soit des macignos de la

molasse, soit de dépôts morainiques ou fluvio-glaciaires qui ne peuvent jamais être confondus avec les sédiments autochtones carbonatés ;

3. un faible apport allochtone, en terrigènes détritiques, dû à l'absence de rivière importante ;
4. une orientation du grand axe du lac parallèle à la direction des vents d'est et d'ouest dominants, une profondeur relativement faible (140 m env. pour la plus grande profondeur), un rapport volume surface favorable, une allure assez rectiligne des rives : ensemble de conditions qui favorisent une homogénéité de l'agitation en fonction de la bathymétrie.

Dans un premier temps, deux données cardinales suffisent à tester le modèle sédimentologique : ce sont la teneur en carbonates autochtones et la granulométrie.

Grâce à elles on peut distinguer trois grandes aires sédimentaires :

— un plateau continental, de 0 à 20 m, soumis à l'action des vagues, sur lequel la sédimentation carbonatée autochtone est hydrodynamiquement difficile à impossible, constitué principalement de sables et limons en partie fossiles ;

— un talus continental où l'agitation due à l'action des vagues ne se fait plus sentir et où la sédimentation carbonatée peut atteindre son maximum. Ce talus peut être le lieu d'éboulements subaquatiques ou de courants turbides ;

— une plaine bathyale plus profonde que 100 m en général.

Les particules grossières se sédimenteront ou se maintiendront sur le plateau continental, les fines sur le talus et les plus fines dans la plaine bathyale. En gros, ces particules sont de trois natures : minérales lithiques sur le plateau, carbonatées sur le talus, carbonatées et argileuses en zone bathyale. Elles sont accompagnées de particules d'origine organique qui se distribuent aussi d'après leur taille. Les particules originaires du plancton se sédimentent en zone bathyale. Sur le talus elles sont diluées par la sédimentation carbonatée. Sur le plateau, seuls les grands fragments d'origine xylo-herbacée seront susceptibles de se déposer.

Pour la distribution des éléments chimiques, on peut prévoir que les lithophiles majoritaires sur le plateau seront dilués par les carbonatophiles de la sédimentation autochtone sur le talus, alors que les lois d'adsorbtion par le complexe organo-argileux se feront le plus sentir en zone bathyale.

Pour le modèle géochimique, en condition d'équilibre naturel, les seuls éléments non lithophiles susceptibles de se maintenir sur le plateau continental sont ceux qui participent aux cycles de la vie bentique. Cependant comme le support minéral est grossier, leurs teneurs seront faibles.

Si des apports deviennent trop importants, l'équilibre naturel est rompu même sur le plateau continental et même sous l'action des vagues en zone oxygénée de l'épilimnium. De telles ruptures de l'équilibre se signaleront par des anomalies géochimiques, c'est-à-dire des concentrations anormales.

Cependant grâce au tri hydrodynamique exercé par les vagues, les courants de compensation et les courants côtiers ou de fond encore très mal connus, on peut prévoir un fractionnement de la matière organique : xylo-herbacée sur le plateau, les tendances « sapropéliques » seront plus marquées dans le talus et surtout dans les grands fonds.

Buts de l'étude et méthodes

Selon des profils, perpendiculaires aux rives, traversant le plateau, le talus et si possible aboutissant aux plaines bathyales, il s'agissait de contrôler d'abord, avec des bennages de surface, la réalité des *lois de variation avec la profondeur.*

— décroissance du grain moyen,
— accroissement de la calcite authigène et autochtone,
— covariation de quelques alcalino-terreux avec le Ca,
— covariation des chalcophiles Cu, Ni, Pb et Zn (pro parte),
— covariation des biophiles C.N.P.S.,
— répartition de Fe, Mn.

Dans ce but, 18 échantillons sur 7 profils ont été analysés (fig. 3, carte des profils).

Pour l'analyse granulométrique, les boues lacustres ont été agitées sans aucun traitement avec de l'eau à pH 8, puis tamisées jusqu'à 20 μm, les fractions inférieures ont été séparées par Atterberg jusqu'à 2 μm et par centrifugation au-dessous de cette taille.

Sur le sédiment séché à 110° C, le carbone total (organique et carbonate), le soufre total ont été dosés par le Carmomat Wostoff et par le Sulmomat Wostoff (du Laboratoire de pédologie EPF-L., professeur M. Pochon).

Pour l'azote et le phosphore total, une minéralisation préliminaire par la méthode Kjeldahl (H_2SO_4 conc., H_2O_2, K_2SO_4, catalyse au sélénium) est nécessaire ; l'azote total est alors dosé par colorimétrie (phénol en présence d'hypochlorite de Na) ainsi que le phosphore total (molybdate d'ammonium et réduction à l'acide ascorbique).

Le résidu insoluble : R. I. est obtenu par décarbonatation à chaud en agitant pendant 30 minutes avec HCl 1N. Sur le résidu lui-même est dosé le carbone organique insoluble par le Carmomat Wostoff. A partir de la solution filtrée sont dosés par absorbtion atomique (Perkin. Elmer 603) les cations solubles suivants : Na, K, Fe, Mn, Sr, Cu, Zn, Ni et Pb. Pour le Ca, on évite les interférences par ajout de 10% volume d'oxyde

de lanthane. Les nitrites sont dosés par colorimétrie avec le sulfanilamide en milieu acide, les nitrates par la même technique mais après réduction en nitrites sur le cadmium.

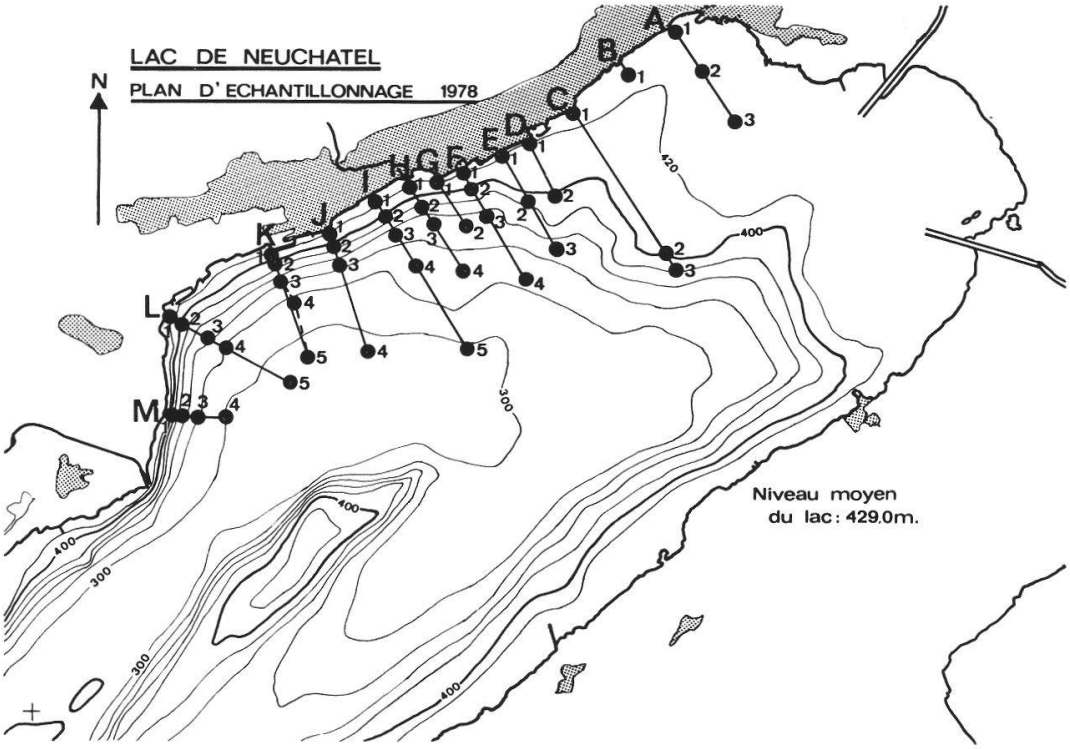

Fig. 3. Plan d'échantillonnage 1978.

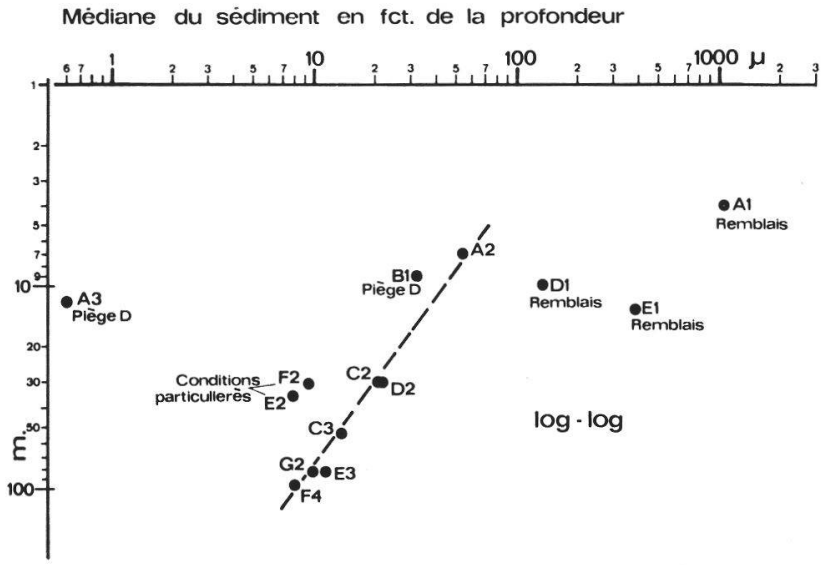

Fig. 4. Médiane du sédiment en fonction de la profondeur.

Quelques réflexions sur la signification géochimique des cations et anions solubles a l'acide chlorhydrique

Appliquant cette méthode à l'étude géochimique des roches carbonatées depuis 1963 dans les laboratoires de la SNPA et depuis 1967 à Neuchâtel, nous savons pertinemment que les cations dosés dans le « jus » de décarbonatation ne proviennent pas tous de la phase carbonatée. Ainsi, le Na, K, Fe^{2+} et Fe^{3+}, Mg, Al et Si peuvent provenir des smectites, illites, chlorites, des hydroxydes de fer ou d'alumine, de la silice amorphe, des sulfures cristallins ou hydratés ou des feldspaths altérés. Le moyen le plus élégant de retrouver la substance mère de ces cations et anions est de les comparer au résidu insoluble dont on a apprécié la composition ou minéralogie, d'en calculer les coefficients de corrélation, le plus souvent linéaires, ou de pratiquer l'analyse factorielle en mode R.

Le second moyen est de calculer les coefficients de corrélation entre éléments de même famille. Cette méthode semble particulièrement efficace pour les sédiments récents du lac.

Par exemple le strontium se trouve dans les sédiments carbonatés de préférence dans la maille de l'aragonite ou de la calcite. Pour la sédimentation crayeuse actuelle, seule la calcite intervient. La corrélation pour les 18 échantillons de cette étude est de 0,90, donc hautement significative. On en conclut que dans le lac de Neuchâtel la majorité du strontium est coprécipitée avec la calcite (fig. 5).

D'un autre côté les chalcophiles varient ensemble, du moins le Zn, le Cu et le Pb, et ils augmentent avec le carbone organique insoluble (tableau II).

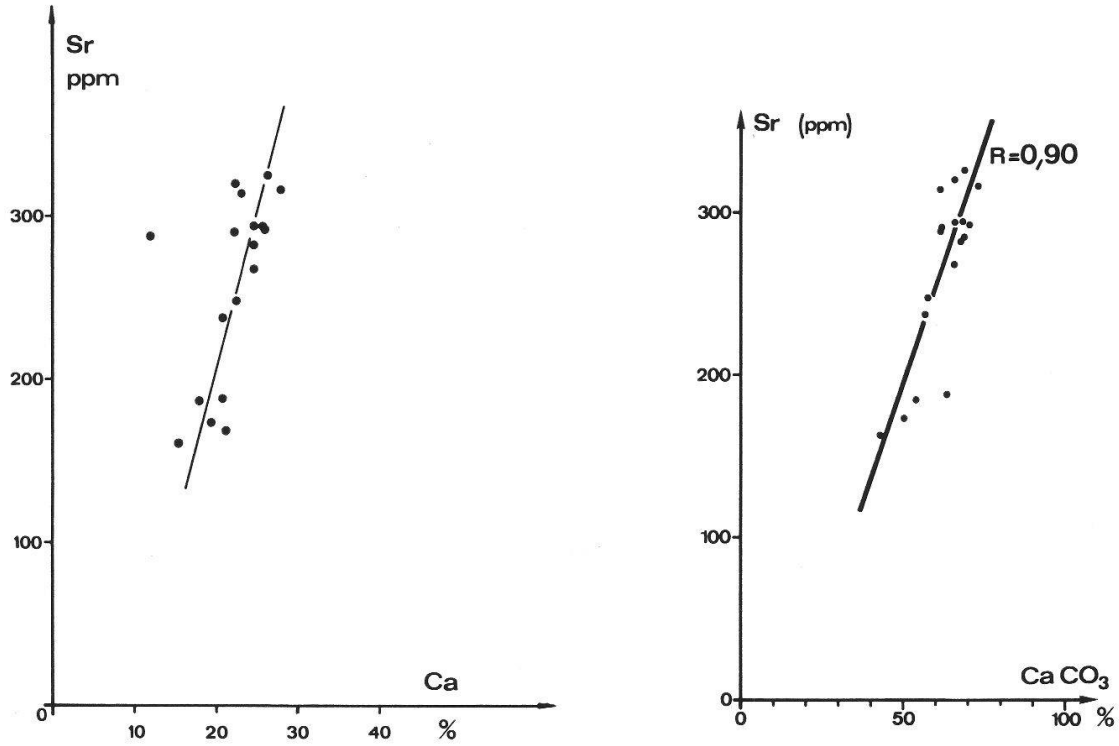

Fig. 5. Coefficients de corrélation simple entre le Sr et le Ca, le Sr et le $CaCO_3$.

TABLEAU II

Quelques coefficients de corrélation entre éléments

	R	Nombre de paires
Sr - $CaCO_3$	0,90	17
Zn - Cu	0,77	15
Zn - Cu	0,86	26
Zn - Pb	0,80	26
Cu - C. org. ins.	0,76	26
Pb - C. org. ins.	0,72	26
Zn - C. org. ins.	0,66	26
Fe - S. tot.	0,61	16
Fe - Mg	0,50	17
Fe - Mn	0,38	17
N tot - C. org. ins.	0,93	17

De telles corrélations sont d'excellents indicateurs de covariation, mais ne sont en aucun cas des preuves de cause à effet. L'augmentation du carbone insoluble peut être parallèle à celle d'une matière organique qui complexe précisément les chalcophiles. Elle peut aussi être parallèle au S^{2-} typique de milieu réducteur.

Par contre des coefficients de corrélation moyens, comme Fe et S tot. (tableau II), indiquent que le Fe ne vient pas entièrement des sulfures cristallins ou hydratés et que le soufre n'est pas entièrement sous sa forme réduite. De mauvais coefficients comme Fe-Mn sont le signe d'une grande indépendance entre les deux cations, due aux conditions de pH et Eh (Bouyer et *al.* 1978).

L'analyse des corrélations entre phase soluble - phase insoluble, phase carbonatée, phase organique, phase amorphe ou phase silico-aluminée peut certes aider à la compréhension de la distribution des éléments, retrouver les grandes lois de la cristallochimie ; elle est manifestement insuffisante pour retrouver les lois des causes à effet dans l'adsorption, l'absorption, la complexation ou la coprécipitation.

Cependant, pour la phase carbonatée, la balance des carbones (carbonates et organiques) et des cations liés à la phase carbonatée peut être instructrice.

Balance de l'anion carbonate et des cations libérés par attaque HCl

L'ion carbonate est calculé par différence entre le carbone dosé sur la roche totale après décarbonatation à HCl. Si cette différence représente bien le carbone carbonate, la somme des cations Ca, Mg, Fe, Mn, Na et K calculés en milliéquivalents, gramme par gramme, devrait toujours être supérieure au CO_3 exprimé en milliéquivalent gramme par gramme.

En effet, une partie du fer, du manganèse, la majorité des alcalins, ne se trouvent pas associés aux ions carbonates. Or, pour les sédiments du lac de Neuchâtel en tout cas, on constate toujours un excès d'ions carbonates, alors que l'on devrait constater un déficit (cf. tableau IV). Cela ne peut s'exprimer que par une perte de carbone entre le carbone total et le carbone de résidu. Cette perte vient de la mise en solution d'une partie de la matière organique. Ce qui amène à la distinction, dans le carbone organique en général, d'un carbone soluble, d'un carbone insoluble (celui du résidu insoluble) qui, ensemble, forment le carbone organique total (tableau III).

TABLEAU III

Carbones organiques : total, soluble et insoluble à HCl

Prof. m	Ech.	Carbones organiques rapportés à la roche totale *solubles %	insolubles %	total %	sol/tot. %
7	H-1	0.184	.775	0.959	19.2
45	H-2	0.955	2.727	3.682	25.9
84	H-3	0.566	1.731	2.297	24.6
104	H-4	0.526	1.288	1.814	29.0
5**	I-1	0.492	0.860	1.352	36.4
37	I-2	0.428	1.409	1.837	23.3
81	I-3	0.173	0.617	0.790	21.9
130	I-5	0.888	1.096	1.984	44.8

* Analyste M. Nguyen, Laboratoire cantonal Neuchâtel (T.O.C. 915 A. Beckmann).
** Herbier.

Le carbone soluble qui peut former jusqu'à 45 % du carbone total, explique l'erreur commise sur le calcul du ion carbonate mais surtout, comme on s'en rend compte au tableau IV, devient une donnée géochimique importante, en tout cas dans les sédiments récents. La matière organique soluble trouve son maximum dans les grands fonds (cf. I-5 130 m) et dans les pièges à sédiments constitués par les herbiers (cf. I-1 5 m) (tableau III).

Les données de la granulométrie

Les sédiments frais ont été divisés en 12 classes selon les limites suivantes 6,2 et 1,2 mm, 630, 200, 63, 40, 20, 10, 2 et 0,6. La médiane a été établie d'après les courbes cumulatives rapportées sur abcisses logarithmiques et ordonnées gaussiennes.

TABLEAU IV

Sédiments récents du lac de Neuchâtel (campagne de juin 1978) campagne N° 1

PROFIL/ECHT. EQUIVALENCE	A-1 4	A-2 5	A-3 6	B-1 7	C-1 10	C-2 9	C-3 8	D-1 11	D-2 12	E-1 13	E-2 14	E-3 15	F-1 16	F-2 17	F-3 18	F-4 19	G-1 20	G-2 21
PROFONDEUR m	3,8	6	12	9	16	30	52	10	30	6	33	81	8	30	73	95	7	81
ETAT D'OXYDATION	O	O	O	O	O	O+R	O+R	N	O	O	O+R	R	O	O+R	O+R	R	O	R
CARBONE TOTAL %	4,6	8,9	10,3	5,7	9,9	9,2	9,0	8	9,3	6,9	9,4	9,8	6,9	9,5	10,4	9,3	6,5	9,9
RESIDU INSOL. %	64,9	37,8	41,3	55,5	26,6	32,4	34,5	44,9	31,5	40,4	31,4	29,7	47,0	35,7	28,3	32,0	44,2	29,1
CARBONNE ORG. %	0,6	1,5	3,3	0,55	1,0	1,2	1,5	1,5	1,4	0,29	1,2	1,5	0,9	2,0	2,14	1,3	0,3	1,4
CARBONE MIN. %	4	7,5	7,0	5,14	8,8	8,0	7,5	6,5	7,9	6,9	8,2	8,3	6,0	7,5	8,26	8,0	6,4	8,5
AZOTE TOT. %	0,07	0,23	0,21	0,13	0,16	0,17	0,16	0,22	0,21	0,06	0,22	0,24	0,13	0,26	0,29	0,17	0,05	0,11
PHOSPHORE TOT. PPM	320	670	590	466	390	450	448	4100	580	460	540	760	820	646	750	710	346	320
SOUFRE TOT. %	0,08	0,12	0,11	0,06	0,04	0,15	0,1	0,10	0,07	0,04	0,07	0,21	0,09	0,08	0,10	0.15	0,05	0,11
CALCIUM %	12,0	22,6	21,2	15,4	28,0	24,6	23,2	18,0	24,6	20,8	24,6	26,4	19,4	22,8	25,8	24,60	20,8	26,0
MAGNESIUM %	0,17	0,57	0,43	0,24	0,37	0,50	0,78	0,26	0,48	0,22	0,46	0,43	0,25	0,5	0,42	0,50	0,33	0,44
FER %	0,28	0,47	0,52	0,23	0,37	0,43	0,64	1,32	0,45	0,3	0,50	0,47	0,28	0,46	0,45	0,66	0,27	0,50
MANGANESE PPM	80	155	225	140	165	212	232	190	205	165	198	260	175	192	185	265	167	230
SODIUM PPM	118	134	118	119	113	124	108	126	101	91	95	103	113	112	102	96	110	119
POTASSIUM PPM	159	298	208	169	175	214	355	211	259	129	289	293	204	366	354	346	160	349
STRONTIUM PPM	-	288	248	162	317	268	314	186	294	238	282	325	173	290	294	320	188	292
CUIVRE PPM	11	45	21	46	21	24	29	57	32	11	28	31	42	41	40	35	18	36
PLOMB PPM	50	86	75	75	75	75	75	175	100	75	100	100	150	100	100	85	100	100
ZINC PPM	23	96	48	62	40	52	67	322	75	36	65	73	166	98	344	82	37	89
NICKEL PPM	27	38	46	30	39	46	23	46	46	38	46	42	30	54	69	54	46	54
$CaCO_3$calc. %	34	62	58,2	42,8	73,6	66,3	62,3	54,5	66	57,6	68,3	69,3	50,1	62,5	68,8	66,4	53,4	70,8
Méqt.-gr.CATIONS	6,349	11,95	11,25	7,99	14,44	12,88	12,49	9,66	12,87	10,69	12,87	13,74	10,018	11,99	13,42	12,97	10,78	13,58
Méqt.-gr.ANIONS	6,79	12,41	11,65	8,56	14,71	13,26	12,46	10,90	13,21	11,52	13,66	13,86	10,03	15,50	13,76	13,27	10,68	14,16

TABLEAU V

Médianes en fonction de la profondeur. Echantillons naturels non traités

Echant.	Prof. m	Médianes en μm
A-2	6,5	54
A-3	12	0,6
C-2	30	26,8
C-3	52	13,3
D-2	30	21,2
E-3	81	11,1
F-2	95	9,4
F-4	95	7,8
G-2	81	9,6

Comme on le constate à la figure 4 et au tableau V, la décroissance linéaire de la taille en fonction de la profondeur est confirmée, en tout cas de 6,5 à 95 m. Dans l'état actuel des recherches, on ne constate pas de rupture au passage du plateau, au talus ni au pied du talus. Cela signifie que le modèle sédimentologique est valable mais qu'il doit être complété. On ne peut, en effet, pas expliquer par l'effet des vagues qui cesse, on l'a vu, à 20 m, la décroissance continue du grain moyen de 30 à 95 m. On ne peut que constater un affinement du grain moyen des sédiments avec la profondeur.

On est donc enclin à penser que la remise en suspension par les vagues et les tempêtes intéresse une large gamme des tailles. Les plus grossières se sédimentent sur le plateau et le haut du talus. Les courants ne sont pas assez forts pour entraîner les suspensions au large du plateau et les redistribuer en une aire étendue. Il se produit dans celles-ci un tri qui est fonction de l'éloignement du plateau et non des rives.

La distribution des particules selon leur taille dépend donc de la remise en suspensions par les vagues issues des tempêtes et par l'incapacité des courants, vu leur faible compétence, de répartir les tailles grossières à moyennes au large. Le gradient de tri bathymétrique serait la conséquence du gradient de tri dû à l'éloignement du plateau.

Une des meilleures preuves de cette explication est fournie par l'échantillon A-3. Il a, en effet, été tiré d'un « trou de dragage » dont l'existence a été démontrée par les profils d'écho-sondage. Ce trou fonctionne comme une trappe à sédiments ; sa granulométrie présente un bimodalisme dont un des modes correspond à la granulométrie normale pour le plateau, et l'autre est inférieur à 0,6 μm.

Un fait semblable avait déjà été observé en 1958 dans le port de Neuchâtel, où la sédimentation fine, à l'abri des vagues, était beaucoup plus importante qu'immédiatement au large du port.

La granulométrie est très sensible, sur le plateau, aux remblayages artificiels qui ont pour conséquence d'augmenter les tailles (échantillons Al, El, Dl, fig. 4).

On constatera pour terminer que la dispersion des médianes est relativement importante et obéit à trois facteurs :

— apport artificiel par remblayage : augmentation des tailles ;

— création artificielle d'abri ou de protection des vagues (mole, port, sillons ou trous de dragage) : diminution des tailles ;

— « trappes » naturelles à sédiments (herbiers, plantes aquatiques) : diminution des tailles.

Sur le talus et à son pied, des éboulements subaquatiques ou des courants turbides amènent en profondeur des sédiments du sommet du talus et du bord du plateau. De telles zones de resédimentation n'ont pas été touchées par cette étude. Elles avaient été échantillonnées en 1958 (station T3, cf. fig. 1) et contrôlées par écho-sondeur. Dans de tels resédiments les courbes granulométriques et leurs médianes sont aberrantes par augmentation des tailles (présence de tests de mollusques qui ne vivent pas à ces profondeurs).

Distributions des éléments

Les distributions des éléments obéissent à des lois complexes et présentent des cas particuliers aberrants mais hautement significatifs.

Comme pour la granulométrie, la profondeur s'est révélée la variable cardinale pour l'étude des distributions.

Jusqu'à une profondeur de 20 m (fig. 6), on constate une décroissance des médianes du résidu insoluble et une croissance symétrique du Ca, donc de la calcite ($CaCO_3$) et du Sr. A titre indicatif les coefficients de corrélation sont de 0,55 pour le Sr, de 0,67 pour le $CaCO_3$ et de —0,65 pour le RI, avec des pentes relativement fortes indiquant des enrichissements ou un apauvrissement important avec une faible variation de la profondeur.

Au-dessous de 20 m, donc dans l'aire de sédimentation fine à majorité carbonatée, les coefficients sont du même ordre de grandeur : 0,68 pour le Sr, 0,67 pour le $CaCO_3$ et —0,72 pour le RI ; cependant les variations sont beaucoup plus faibles avec la profondeur, comme pour les médianes.

Ces deux lois de répartition ne sont pas aussi claires pour les autres éléments. On remarquera toutefois que les plus faibles valeurs en Cu, Zn, Fe, Mg, Mn, C. org. ins., S total et P total sont toutes localisées dans les plus faibles profondeurs (10 premiers mètres), les plus fortes variations dans les 20 premiers mètres pour le C. org. ins., Cu, Zn, P tot et Fe.

Pour le S total, les valeurs croissent très fortement avec la profondeur, selon une loi linéaire sans inflexion à la profondeur de 20 m comme pour les autres éléments.

Le Fe et le Mg présentent pour le moment un cas particulier, les valeurs minimales sont groupées selon une première droite jusqu'à 50 m

de profondeur et une seconde droite au-dessous de cette cote. Cette seconde droite reste par ailleurs hypothétique ; elle n'est calculée que sur 4 échantillons et il se pourrait fort bien qu'il ne s'agisse là que d'un cas particulier.

Dans les alcalins, le sodium reste parfaitement insensible à la bathymétrie aussi bien au-dessus qu'au-dessous de 20 m ; pour le potassium, la loi de croissance avec la profondeur est réelle, elle se rapprocherait de celle du Fe et du Mg jusqu'à 50 m. Au-dessous de cette cote toutefois, les valeurs ont une légère tendance à décroître, ce qui reste à vérifier avec d'autres échantillons.

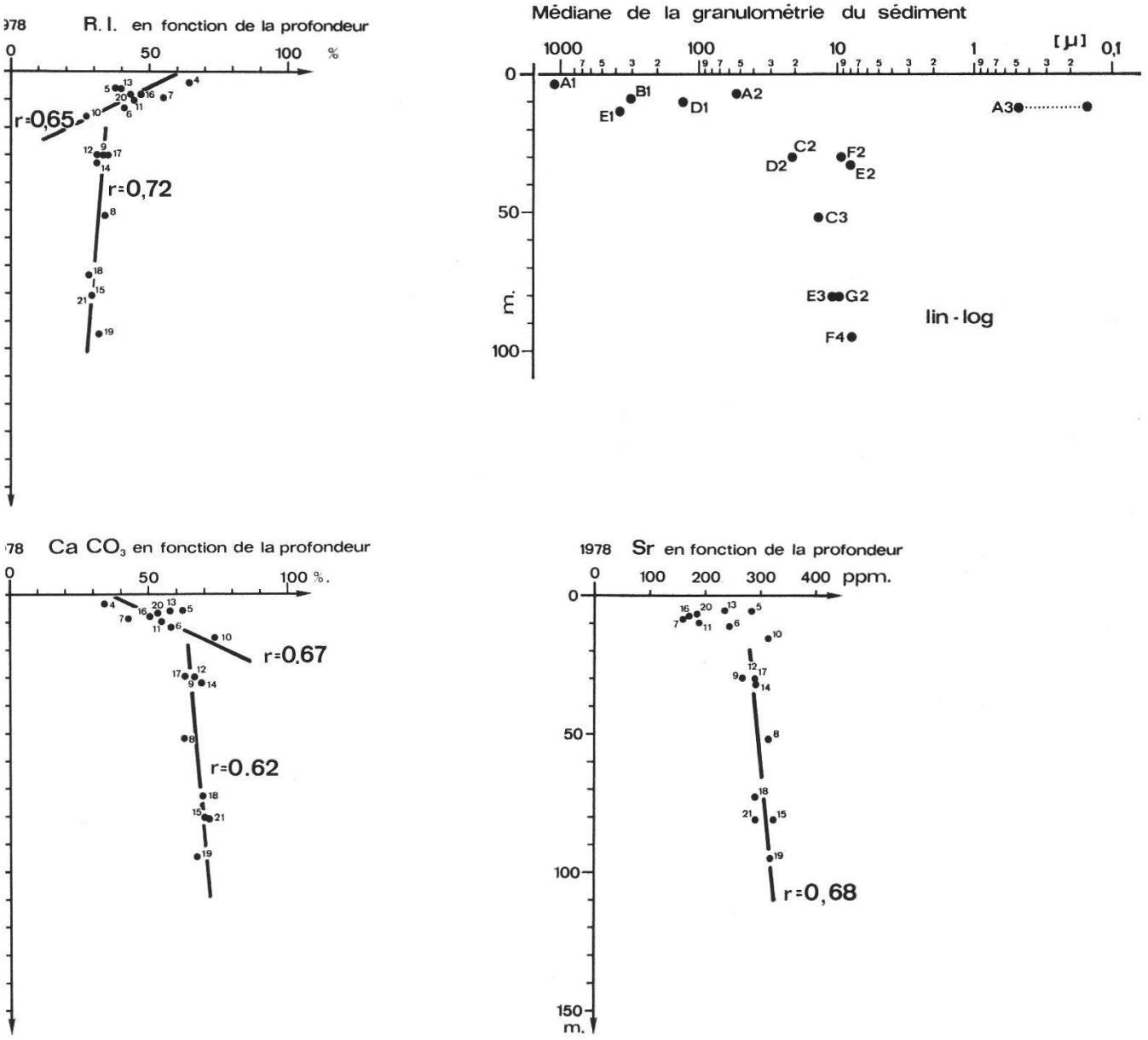

Fig. 6. Résidu insoluble, médiane $CaCO_3$ et Sr en fonction de la profondeur.

Lois naturelles

L'examen de la distribution des éléments confirmant la distinction de deux aires très différentes de sédimentation, les lois naturelles de répartition seront différentes suivant que l'on considère la zone d'agitation ou celle de tranquillité.

Dans la zone d'agitation, c'est-à-dire plages immergées, beines et plateau, tous les éléments extraits par HCl (selon nos méthodes) montrent un fort gradient d'augmentation avec une faible augmentation de profondeur. Comme les carbonates présentent le même gradient et que le résidu insoluble diminue d'autant, on peut affirmer que la croissance des éléments est parallèle à la croissance de la phase carbonatée, sans que cela constitue une preuve de leur appartenance à cette phase. Comme le C. org. insoluble, le S total et le P total, parfaitement

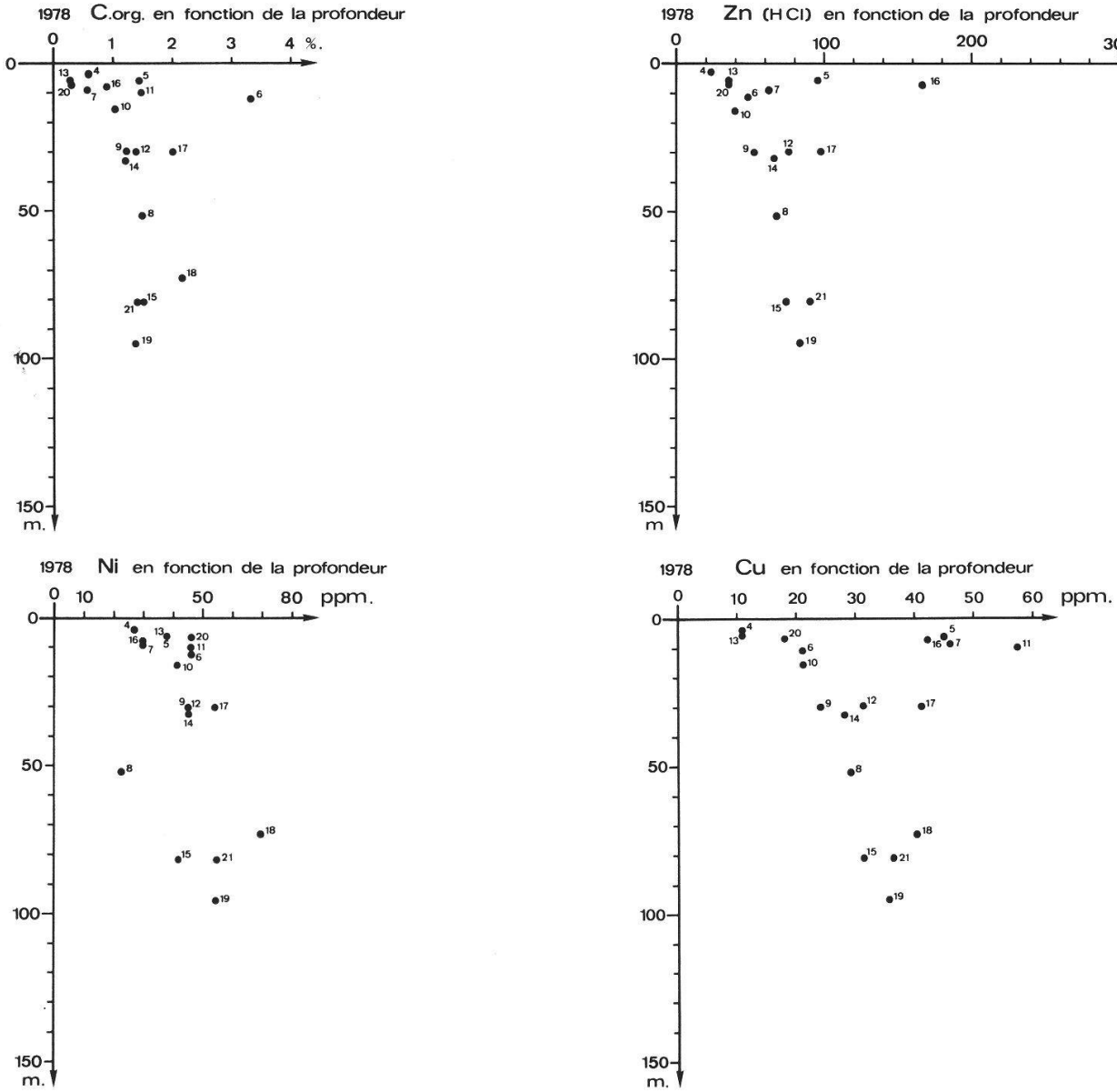

Fig. 7. Carbone organique insoluble, Cu, Ni et Zn (solubles dans HCl) en fonction de la profondeur.

étrangers à cette phase, augmentent de la même façon et parallèlement aux médianes, on en conclut qu'une seule et même loi naturelle régit la distribution de ces éléments : *les conditions d'agitation.*

En milieu naturel celles-ci s'exercent de trois façons :

— les particules fines ne peuvent sédimenter ou si, en périodes calmes, elles ont pu atteindre la surface du sédiment, elles ne peuvent s'y maintenir ;

— le brassage de ces particules en suspension ou remises en suspension favorise leur oxydation vigoureuse ;

— le sédiment stable, grossier, qui peut se maintenir présente une beaucoup plus grande perméabilité favorisant la pénétration de l'oxygène. En effet, la « microcouche » oxydée est plus épaisse pour les sables que dans les limons fins ou les boues.

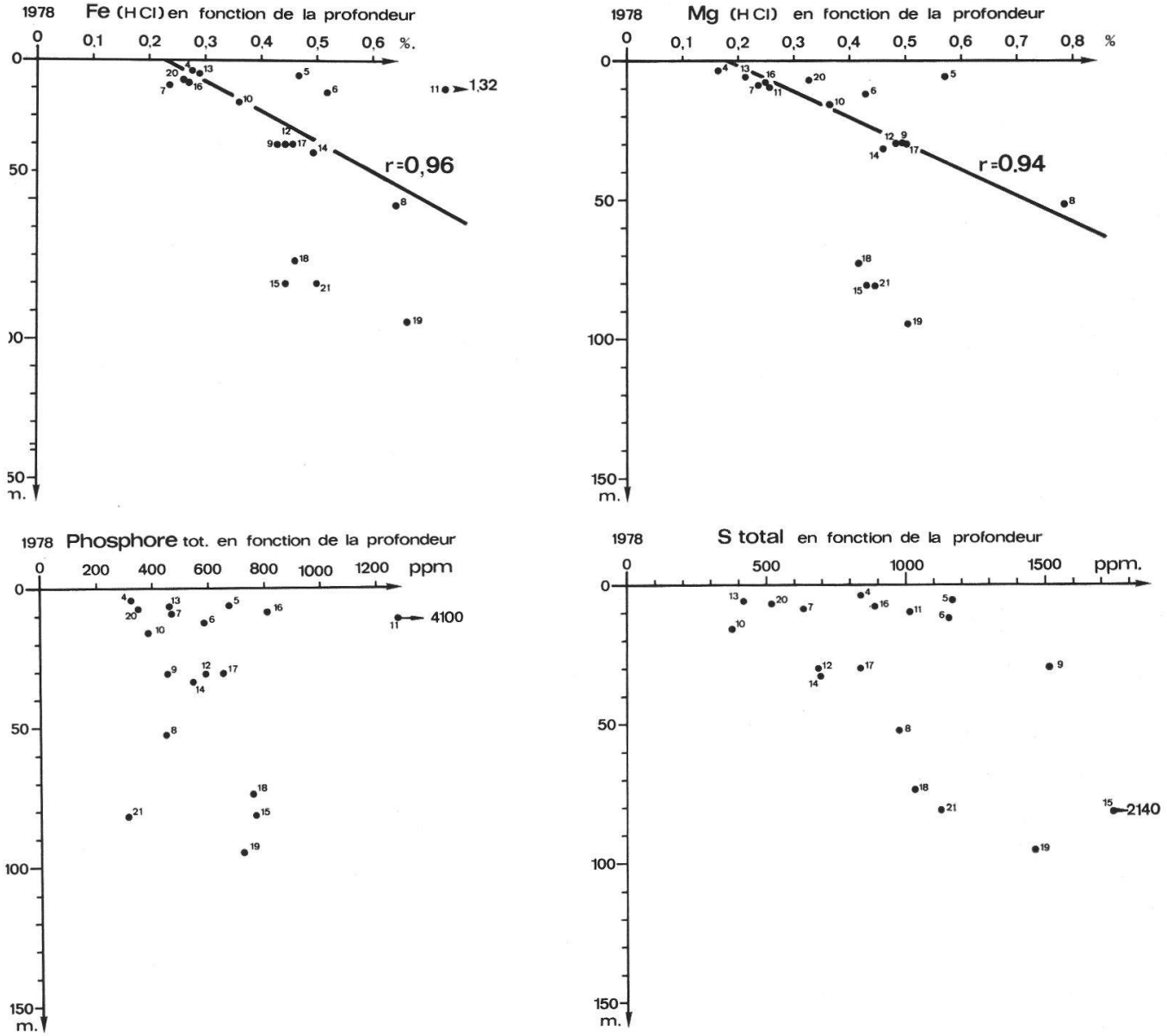

Fig. 8. Fe et Mg (solubles dans HCl) phosphore et soufre total en fonction de la profondeur.

L'existence de ces suspensions fines au-dessus du plateau est prouvée par les analyses granulométriques du port de Neuchâtel (fraction inf. à 63 μm : 55 % de l'échantillon) et par celle de l'échantillon A3 dans un « trou » de drague au large de Saint-Blaise (fraction inf. à 0,6 μm : 68 %).

On sait que ces suspensions fines sont plus riches en matières organiques (tableau IV et fig. 7), éventuellement plus riches en S, Fe et Mg. Les autres teneurs obéissant aux mêmes lois que pour les autres échantillons, on en déduit que pour les carbonates et les non-carbonates, elles appartiennent aux mêmes stocks détritique et autochtone.

Sur le talus, du moins de 20 à 90 m de profondeur, les gradients d'augmentation des teneurs et de diminution du RI et des tailles médianes sont beaucoup plus faibles. En milieu naturel et en milieu non perturbé (éboulements subaquatiques), c'est encore au classement hydrodynamique que nous devons attribuer ces distributions. Les particules les plus fines : carbonatées, organiques et argileuses seront seules capables d'atteindre les régions centrales du lac. Nous attribuons donc ces gradients teneurs-profondeurs à un gradient teneurs-distance du talus. Les sédiments devenant plus fins, la perméabilité plus faible, l'oxygénation permanente moins forte, le milieu réducteur se développe plus vite et la microcouche oxydée est moins épaisse (quelques millimètres). Les relations C. org., même insoluble, N tot. (fig. 10) ou même C. org., P, N, S, Cu, Zn, Ni, Pb et Fe peuvent être alors expliquées par les relations géochimiques qui relient, par exemple, le Sr et le Ca, les chalcophiles au S, au Fe^{2+} et à la matière organique d'origine algaire, planctonique ou bactérienne.

Il nous apparaît donc que pour les sédiments du bassin neuchâtelois du lac de Neuchâtel, l'hydrodynamisme conditionne le cadre dans lequel les lois naturelles, principalement biogéochimiques, vont pouvoir se développer.

Perturbations par la pollution anthropique

Nous négligerons la pollution mécanique, remblais ou déchets organiques. Du reste ces derniers ne parviennent plus que rarement au lac, du moins les grossiers, depuis la mise en service des stations d'épuration.

Dans l'état actuel des analyses, le déversement des eaux usées, traitées ou non, n'a aucune influence sur le RI, le $CaCO_3$, Sr, Na, K et Mg.

Par contre, même dans la zone d'agitation, l'échantillon Dl, au droit de la station d'épuration de Neuchâtel, présente des teneurs tout à fait anormales, même jusqu'à 10 fois plus fortes que la normale en P total, Fe et Zn. L'origine du P total est à attribuer aux phosphates de l'affluent de la STEP, le Fe au chlorure de fer utilisé pour la précipitation des phosphates. Quant au Zn et au Cu, qui montrent aussi une tendance à l'enrichissement, leur origine vient de l'activité industrielle.

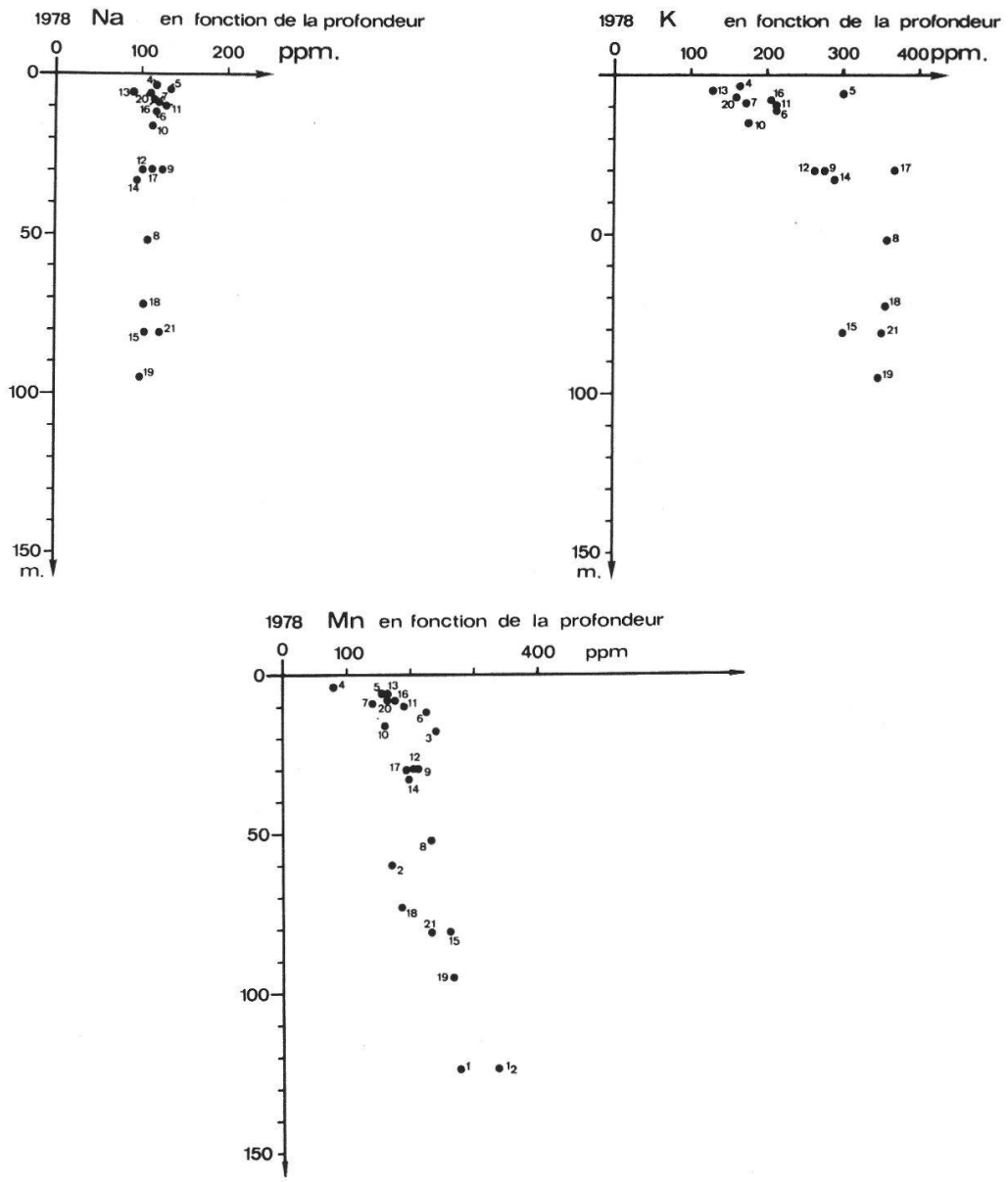

Fig. 9. Na, K et Mn (solubles dans HCl) en fonction de la profondeur.

Sur le talus, au droit des égoûts de Neuchâtel, on note aussi des teneurs trop élevées en S (E3), en Zn (F3), éventuellement en Cu, Ni et C. org. (même échantillon F3).

L'origine anthropique de ces teneurs trop élevées par rapport à une teneur moyenne à la bathymétrie considérée, est soulignée par le fait qu'elle s'écarte considérablement des droites de régression, comme par exemple le Zn aux échantillons Dl et F3 (fig. 10 et tableau IV).

La pollution anthropique se traduit donc de deux manières. Elle enrichit des teneurs d'une façon isolée et directement comme par exemple le P, Zn et Fe. Elle contribue à enrichir les métaux par le jeu des associations biogéochimiques, par exemple le C. org., Ni, Cu, une partie de Zn (éch. F3).

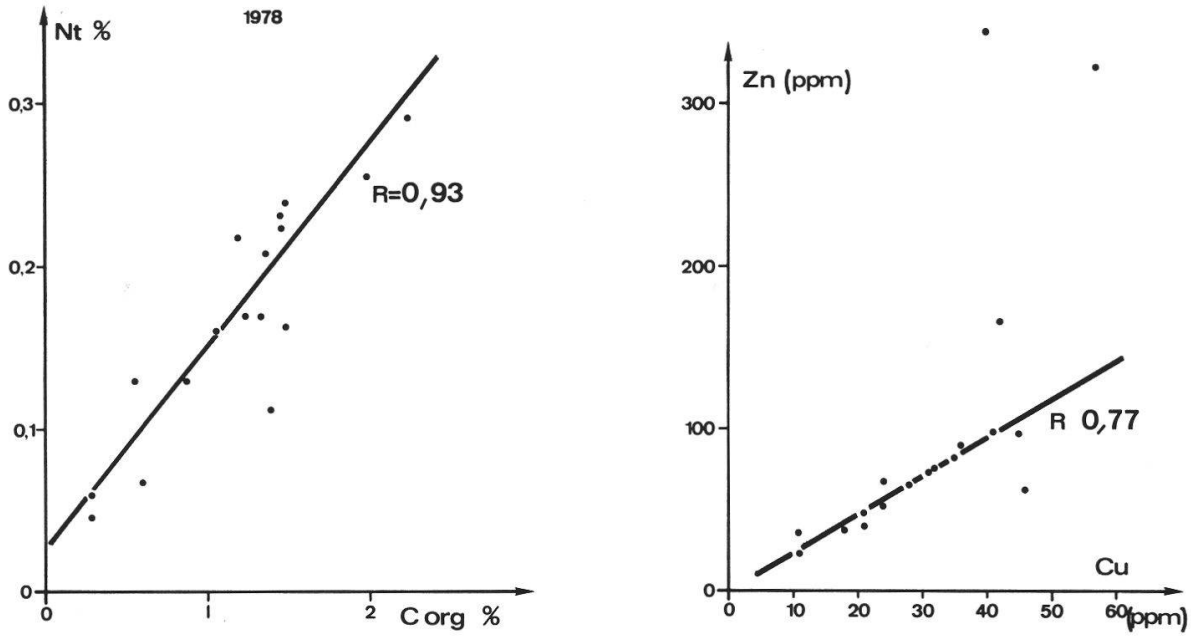

Fig. 10. Coefficients de corrélation simple entre l'azote total et le carbone organique insoluble, le zinc et le cuivre (solubles dans HCl).

De ces faits il ressort que l'intensité de pollution des fonds du lac peut être mesurée par l'écart entre les teneurs mesurées et les lois de distribution naturelles, aussi bien dans la zone agitée que dans la zone calme.

Conclusions

En combinant les données de l'analyse granulométrique, les teneurs en éléments biophiles : C. total insoluble, P total, N total et S total, le résidu insoluble et les teneurs en éléments solubles à HCl, on peut mettre en évidence des lois naturelles de distribution des éléments. Elles sont de deux types : fort gradient teneurs-profondeurs dans la zone agitée, faible gradient dans la zone calme.

L'agitation due aux vagues semble être la loi causale principale. Elle s'exerce directement par le tri granulométrique qu'elle impose à la sédimentation, par le brassage des suspensions dans l'épilimnium, favorisant ainsi une oxydation vigoureuse et indirectement par la perméabilité, notamment à l'oxygène des sédiments déposés.

Les atteintes de la pollution peuvent être mesurées par l'écart des teneurs à celles prévues par les lois naturelles, compte tenu de la profondeur et de l'aire de sédimentation, et par l'écart aux régressions normales entre éléments de mêmes affinités. Les éléments les plus caractéristiques de la pollution sont le P, Fe (HCl), Zn (HCl), éventuellement le Cu (HCl) et le C. org. ins.

Il s'est avéré enfin que le carbone organique soluble parfaitement négligé dans les analyses de routine des sédiments anciens pouvait représenter jusqu'à 45 % du carbone organique total. Ce carbone soluble se révèle une donnée géochimique importante pour les problèmes de caractérisation grossière mais simple de la matière organique et pour tous ceux d'adsorbtion et de chélation.

Les modèles sédimentologiques et géochimiques prévus d'après les résultats des premières campagnes de 1957-1958 s'en trouvent confirmés et améliorés.

Remerciements

Cette étude n'a été possible que par la mise en commun du matériel de plusieurs laboratoires de l'Etat de Neuchâtel. Nos remerciements vont à MM. les conseillers d'Etat F. Jeanneret, J. Béguin et A. Brandt, qui ont favorisé cette opération concertée. Ils vont aux pilotes du bateau, MM. Colliard et Varnier, à M. N'Guyen pour les analyses du carbone soluble, à MM. Pochon et Dubois du Laboratoire de pédologie de l'EPF-L, et au Fonds national suisse pour la Recherche scientifique, qui a subventionné cette recherche dans le cadre du crédit 2.768.77.

Résumé

Dans les sédiments de surface du lac de Neuchâtel, la distribution des éléments majeurs et mineurs obéit à deux types de lois de variation avec la profondeur d'eau, qui se distinguent d'après leur gradient : fort dans la zone agitée, faible au-dessous de celle-ci. L'écart entre les teneurs mesurées et celles que l'on peut prévoir d'après ces lois est attribué à la pollution anthropique. L'agitation par les vagues est le facteur causal de ces lois : elle trie les tailles granulométriques, favorise l'oxydation des suspensions et la perméabilité des sédiments. Le carbone organique soluble à HCl se révèle une donnée géochimique importante.

Zusammenfassung

In den Sedimenten des Lac de Neuchâtel gehorcht die Verteilung der Haupt- und Neben-Elemente mit zunehmender Tiefe zwei verschiedenen Gesetzen : starke Zunahme in der bewegten Zone und nur schwache Zunahme in der ruhigen Zone unterhalb 20 m. Der Unterschied zwischen den gemessenen Werten und denjenigen, welche sich auf Grund dieser Gesetze voraussagen lassen, wird auf die Verschmutzung zurückgeführt. Das Aufwirbeln durch die Wellen ist der grundlegende Faktor dieser Gesetze, davon hängen die Korngrösse, die Oxydation der

Suspension und die Permeabilität der Sedimente ab. Der durch HCl lösliche organische Kohlenstoff erweist sich, wenigstens in rezenten Sedimenten, als wichtiger geochemischer Wert.

Summary

In the surface sediments of the bottom of the lake of Neuchâtel, the distribution of major and some minor elements are of two types : in the agitation zone a sharp increase with the depth ; in calm zone, below 20 m, a small increase with the depth. The difference between the values predicted by the law of the increase with depth and the actual values is attributed to the pollution. The agitation controls the grain size, the oxidation of the suspension and the permeability of the sediment. The organic carbon soluble with HCl becomes, at least in the recent sediments, a very important geochemical data.

BIBLIOGRAPHIE

PORTNER, Cl. — (1951). La formation du sédiment calcaire du lac de Neuchâtel. Thèse Sc., Université de Neuchâtel. *Bâle* (Birkhäuser), 94 pp.

KÜBLER, B. — (1959). Les sédiments du lac de Neuchâtel et la pollution. Inédit, Laboratoire cantonal Neuchâtel, 19 pp.

BOUYER, Y., MISEREZ, J.-J. et POCHON, M. — (1978). Inventaire géochimique et bilan du fer dans le sol et les eaux du karst jurassien : état, importance, déplacements. *Ped.* 1, E.P.F. Lausanne, 94 pp.

Adresse des auteurs : Institut de Géologie, Université, CH - 2000 Neuchâtel 7.