



Livre

1983

Published version

Open Access

This is the published version of the publication, made available in accordance with the publisher's policy.

Géochimie des sédiments du Léman

Jaquet, Jean-Michel; Rapin, François; Davaud, Eric Jean; Vernet, Jean-Pierre

How to cite

JAQUET, Jean-Michel et al. Géochimie des sédiments du Léman. Berne : Kümmerly & Frey, 1983.
(Matériaux pour la géologie de la Suisse. Hydrologie)

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:151230>

Publiés par la Commission d'Hydrologie
de la Société Helvétique des Sciences Naturelles

GÉOCHIMIE DES SÉDIMENTS DU LÉMAN

par

Jean-Michel Jaquet, François Rapin, Eric Davaud et Jean-Pierre Vernet

Avec 11 figures, 9 tables et 4 planches

En commission chez Kümmerly & Frey, Geographischer Verlag, Berne
Imprimerie de la Section de Physique, Genève

Matériaux pour la géologie de la Suisse - Hydrologie

Déjà parus:

1. J. HUG und A. BEILIK. Die Grundwasserverhältnisse des Kantons Zürich, mit Karte der Grundwasserströme des Kantons Zürich. Herausgegeben gemeinsam mit der Baudirektion des Kantons Zürich. Mit XX + 328 Seiten, 146 Figuren und Karte 1:100000. 1934 20. —
2. E. EUGSTER. Schneestudien im Oberwallis und ihre Anwendung auf den Lawinenverbau. Mit VIII + 84 Seiten, 42 Textfiguren und 7 Tafeln. 1938 4. —
3. H. BADER, R. HAEFELI, E. BUCHER, J. NEHER, O. ECKEL, Chr. THAMS mit einer Einführung von P. NIGGLI. Der Schnee und seine Metamorphose. Erste Ergebnisse und Anwendungen einer systematischen Untersuchung der alpinen Winterschneedecke, durchgeführt von der Station Weissfluhjoch-Davos der Schweiz. Lawinenforschungskommission. 1934-1938. Mit XXIII + 340 Seiten, 18 Tafeln, 154 Figuren, 18 Tabellen. 1939 vergriffen
4. O. LUETSCHG-LOETSCHER. Zum Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges.
I. Band, 1. Teil, Erste Abteilung, Kapitel 1-3 (Mitarbeiter *Rudolf Böhner*): Heutiger Stand der Niederschlagsforschung. Heutiger Stand der Abflussforschung. Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abfluss. Mit Tabellenwerk: Ergebnisse der Niederschlagsforschungen. Mit VI + 60 Seiten, 9 Karten, 10 Textfiguren, 17 Tabellen. 1945 10. —
I. Band, 1. Teil, Zweite Abteilung (Kapitel 4, 5): Vorratsänderungen im Wasserhaushalt der Gletscher. Verhalten der verstossenen Obern Grindelwaldgletschers. Mit VII + 34 Seiten, 10 Tafeln, 21 Figuren und 6 Tabellen. 1944 6. —
I. Band, 1. Teil, Dritte Abteilung, Kapitel 6-8. (Mitarbeiter *Rudolf Böhner*): mit einem Beitrag von *Hans Burger*. Boden und Vegetation im Wasserhaushalt des Hochgebirges. Die Bedeutung des Schneetransportes durch den Wind. Die Bedeutung der Nebel-, Tau- und Reifbildungen. VIII + 68 Seiten, Textfiguren, 4 Fototafeln. 1949 8. —
I. Band, 2. Teil, Kapitel 9. (Mitarbeiter *Rudolf Böhner*): mit Beiträgen von *H. Huber, P. Huber, F. de Quervain*. Zur Hydrologie, Chemie und Geologie der winterlichen Gletscherabflüsse der Schweizer Alpen. VI + 121 Seiten, 26 Textfiguren, 6 Falztafeln. 1950 12. —
I. Band, 3. Teil, Kapitel 10. (Mitarbeiter: *Teophil Hauck, Rudolf Böhner*). Die Eis- und Schneesverhältnisse der Oberengadiner Seen, insbesondere des St. Moritzer Sees. Beitrag zur Gewässer- und Klimakunde des Oberengadins, 173 Seiten, 54 Textfiguren, 8 Tafeln. 1954 20. —
II. Band, 3. Teil. (Mit Beiträgen von *Rudolf Böhner* und *Walter Dietz*). Zur Hydrologie der Landschaft Davos. Mit XLIV + 490 Seiten, 2 Karten, 9 Tafeln, 146 Textfiguren, 173 Tabellen. 1944 50. —
III. Band, Forschungsgebiet Nr. 16 F. GYGAX. Niederschlag und Abfluss im Einzugsgebiet der Magliasina. 100 Seiten, zahlreiche Textfiguren und Tafeln. 1948 12. —
5. H.P. EUGSTER. Beitrag zur Gefügeanalyse des Schnees. 64 Seiten, 42 Textfiguren, 1 Falztafel, 1 Fototafel. 1952 10. —
6. EDWIN BUCHER. Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinenverbau. Herausgegeben gemeinsam mit der Schweizerischen Schnee- und Lawinenforschungskommission. 113 Seiten, 67 Textfiguren. 1948 16. —
7. F. HOFER. Über die Energieverhältnisse des Brienersees. 95 Seiten, 4 Textfiguren, 8 Tafeln, 3 Kunstdrucktafeln. 1952 12. —
8. E. HOECK. Der Einfluss der Strahlung und der Temperatur auf den Schmelzprozess der Schneedecke. 36 Seiten, 22 Tafeln, 22 Tabellen. 1952 12. —
9. P. NYDEGGER. Vergleichende limnologische Untersuchungen an sieben Schweizer Seen. 80 Seiten, 57 Figuren, 24 Tabellen. 1957 16. —
10. S. STEINEMANN. Experimentelle Untersuchungen zur Plastizität von Eis. 72 Seiten, 91 Textfiguren. 1958 16. —
11. M. REIST. Beiträge zur Morphologie und Hydrologie des Bavenatales. 65 Seiten, 44 Figuren. G. HIRSBRUNNER. Beiträge zur Morphologie und Hydrologie der Rovana-täler. 79 Seiten, 18 Figuren, 26 Fotografien. 1960 16. —

Suite à la 3^e page de la couverture

MATÉRIAUX POUR LA GÉOLOGIE DE LA SUISSE - HYDROLOGIE

N° 30

**Publiés par la Commission d'Hydrologie
de la Société Helvétique des Sciences Naturelles**

GÉOCHIMIE DES SÉDIMENTS DU LÉMAN

par

Jean-Michel Jaquet, François Rapin, Eric Davaud et Jean-Pierre Vernet

Avec 11 figures, 9 tables et 4 planches

**En commission chez Kümmerly & Frey, Geographischer Verlag, Berne
Imprimerie de la Section de Physique, Genève**

V O R W O R T

Seen als komplexe und empfindliche Oekosystem widerspiegeln sehr deutlich Entwicklung und Zustand ihrer Einzugsgebiete. In der vorliegenden Arbeit haben Dr. J.M. JAQUET und seine Mitarbeiter* mit Erfolg versucht, diese Zusammenhänge am Beispiel der Verteilung verschiedener Spurenelemente in den Sedimenten des Genfersees aufzuzeigen. Das Resultat ist eine wertvolle Zusammenstellung neuer Sedimentdaten. Dabei werden nicht nur Resultate geochemischer Analysen aufgelistet, sondern es wird der wichtige Bezug zur Mineralogie/Geochemie des jeweils untersuchten Sedimenttyps im See bzw. Gesteintyps im Einzugsgebiet dargestellt.

Dies, sowie die Assoziierung verschiedener Schwermetalle zu bestimmten Trägersubstanzen wird dazu verwendet, die Einwirkungen anthropogener Belastung auf den Genfersee und seine Ablagerungen zu bestimmen. Die sich daraus ergebende Gewichtung der festgestellten Schwermetallkonzentrationen im Sediment stellt einen neuen Ansatz dar, Schadstoffbelastungen von Seen zu beurteilen und unterscheidet die vorgelegte Arbeit von anderen ähnlichen Untersuchungen.

Dr. J.M. JAQUET und seine Mitarbeiter haben mit dieser Arbeit einen wesentlichen Beitrag zur Sedimentologie des Genfersees geleistet. Die Hydrologische Kommission ist somit der Anfrage zur Aufnahme dieser Arbeit in die Reihe der "Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie" gerne nachgekommen und freut sich die vorliegende Arbeit zu veröffentlichen.

Der Präsident der
Hydrologischen Kommission:

Prof. Dr. D. Vischer

Der Sachbearbeiter der
Hydrologischen Kommission

Dr. M. Sturm

* Forschungsarbeit am Institut F.A. Forel in Versoix, bzw. im Département de Géologie et de Paléontologie der Universität Genf

A V A N T - P R O P O S D E S A U T E U R S

Les travaux dont cette publication est la synthèse ont été réalisés en partie sous l'égide de la Commission Internationale pour la Protection du Léman contre la Pollution (CIPEL), et dans le cadre de projets subventionnés par le Fonds National Suisse pour la Recherche scientifique. Nous remercions ces deux organismes de leur contribution.

L'équipe technique de l'Institut Forel a oeuvré avec diligence sur le terrain et au laboratoire pour permettre la réalisation de ce travail. A P.-Y Favarger, M. Chevalley, X. Brusi, J.-P. Jost, A. Parisod, ainsi qu'à M. Viel, vont nos sentiments d'amitié et de reconnaissance. Nous remercions aussi P. Zbinden, J. Fellmann et J. Jaquet pour la réalisation pratique du manuscrit.

T A B L E D E S M A T I E R E S

Résumé

Zusammenfassung

Riassunto

Abstract

1. INTRODUCTION

2. METHODOLOGIE

2.1. Prélèvements et analyses

2.2. Concepts de base

2.2.1. Le support sédimentaire

2.2.2. Granulométrie et composition chimique

2.2.3. Teneur naturelle et taux de contamination

2.2.4. Variabilité spatiale des associations géochimiques

3. CADRE LIMNOLOGIQUE ET SEDIMENTOLOGIQUE

4. RESULTATS

4.1. Faciès géochimiques

4.2. Composition minéralogique

4.2.1. Pourcentages d'oxydes

4.2.2. Rapports d'oxydes

4.2.3. Relation entre éléments majeurs et granulométrie

4.2.4. Information fournie par les rayons X

4.3. Eléments-trace

4.3.1. Relation avec les supports sédimentaires

4.3.1.1. Ensemble du lac

4.3.1.2. Faciès 1 (Petit Lac)

4.3.1.3. Faciès 2 (Moyen Lac)

4.3.1.4. Faciès 4 (Côte Nord, Grand Lac)

4.3.1.5. Faciès 5 (Delta du Rhône)

4.3.1.6. Faciès 3 (Delta de la Dranse)

4.3.1.7. Faciès 7 (Baie de Vidy)

4.3.1.8. Variabilité des relations supports-traces

4.3.2. Evaluation de la contamination par les métaux lourds

4.3.3. Répartition géographique des teneurs et origine des contaminations

4.3.3.1. Eléments argilophiles

4.3.3.2. Eléments organophiles

4.3.3.3. Index de pollution

5. CONCLUSIONS

REMERCIEMENTS

BIBLIOGRAPHIE

PLANCHES HORS-TEXTE

F I G U R E S D A N S L E T E X T E

- Fig. 1: Abaque pour l'estimation de la teneur naturelle d'un sédiment en éléments-trace, comme fonction de sa teneur en CaCO_3 .
- Fig. 2a: Pétrographie des roches dans le bassin versant du Léman.
- Fig. 2b: Granulométrie des sédiments superficiels, exprimée par le pourcentage de la fraction sableuse.
- Fig. 3: Répartition géographique des faciès géochimiques obtenus par l'analyse en mode-Q.
- Fig. 4: Variation, d'amont en aval, des rapports d'oxydes dans les sédiments superficiels.
- Fig. 5: Relation entre la granulométrie (% poids des canaux du Coulter) et les éléments majeurs exprimée par le coefficient de corrélation. Seules les valeurs positives sont considérées.
- Fig. 6: Expression bi-dimensionnelle des relations entre les supports sédimentaires et les éléments-trace pour les différents faciès (diagrammes d'ordination).
- Fig. 7: Relation entre la granulométrie et les éléments-trace organophiles, exprimée par les coefficients de corrélation (voir Fig. 5).
- Fig. 8: Relation entre la granulométrie et les éléments-trace argilophiles, exprimée par le coefficient de corrélation (voir Fig. 5).
- Fig. 9: Taux de contamination des éléments arrangés par ordre décroissant.
- Fig. 10: Valeur des Index de Pollution IP^{tot} , IP^{Hg} , IP^{org} et IP^{arg} pour les différents faciès.
- Fig. 11: Variation géographique des Index de pollution des sédiments superficiels.

P L A N C H E S H O R S - T E X T E

- Pl. 1: Variation géographique de la concentration de quelques éléments majeurs dans les sédiments superficiels (en % de la somme des oxydes majeurs).
- Pl. 2: Variation géographique du rapport $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ dans les sédiments superficiels.
- Pl. 3: Variation géographique de la concentration des éléments-trace argilophiles dans les sédiments superficiels (en ppm de la somme des oxydes majeurs).
- Pl. 4: Variation géographique du taux de contamination des sédiments superficiels en mercure et éléments-trace organophiles (en ppm de la somme des oxydes majeurs).

T A B L E S

- Tab. 1: Teneurs naturelles en éléments-traces de divers sédiments (ppm)
- Tab. 2: Caractéristiques physiques du Léman et de son bassin versant
- Tab. 3: Composition chimique moyenne de l'eau du Léman
- Tab. 4: Caractéristiques des faciès géochimiques
- Tab. 5: Valeur moyenne des éléments majeurs par faciès en 1978 (% ou ppm)
- Tab. 6: Valeur approximative des rapports d'oxydes pour les principaux minéraux
- Tab. 7: Valeur moyenne des éléments-traces par faciès en 1978 (ppm)
- Tab. 8: Valeur moyenne, par faciès, des taux de contamination en 1978
- Tab. 9: Index de pollution (IP) par faciès en 1978

R É S U M É

L'étude de la géochimie régionale des sédiments du Léman, ainsi que de l'impact des activités humaines sur le milieu sédimentaire, a été abordée par l'analyse statistique de données récoltées entre 1970 et 1978.

On présente et discute tout d'abord quelques concepts théoriques, qui sont: (1) la notion de support sédimentaire, (2) l'influence de la granulométrie sur la concentration en éléments-trace, (3) les notions de teneur naturelle et de taux de contamination et (4) la variabilité géographique des associations entre supports sédimentaires et éléments-trace.

Au moyen d'une méthode de classification automatique multivariée, on démontre que les sédiments peuvent être répartis en sept faciès géochimiques. Cette répartition est basée surtout sur le système CaCO_3 -quartz-silicates; elle est le fidèle reflet de la nature mixte de la sédimentation lémanique, gouvernée à la fois par la précipitation autochtone de CaCO_3 et par les apports silicatés des rivières alpines.

La minéralogie des sédiments a été établie, sur la base des éléments majeurs, par des méthodes statistiques, dont les résultats ont été vérifiés par diffraction X, microanalyse (EDAX) et analyse granulométrique.

Il existe des gradients significatifs dans la distribution des divers minéraux à travers le lac, provoqués par la variété pétrographique des bassins versants des principales rivières.

La variabilité spatiale existant dans les associations entre éléments majeurs et traces indique une variabilité égale dans la fixation des traces sur les supports sédimentaires. Ces derniers sont les silicates, les hydroxydes de Fe-Mn, les phosphates, la matière organique et accessoirement les carbonates allochtones.

Le calcul du taux de contamination (C) montre clairement que Hg est le contaminant métallique principal du Léman (C moyen = 22, C max. = 60). L'évolution de C^{Hg} entre 1970 et 1978 démontre un déplacement géographique des sources de contamination durant cette période. Cd et Ag ont des taux de contamination moyens variant entre 3 et 5, avec des maxima de 52 et 170 respectivement. Ces deux éléments, ainsi que Sn, Ba, Ni, Cr, Pb, Cu et Zn, proviennent principalement des affluents de la STEP de Vidy, qui traite les eaux de l'agglomération lausannoise.

Z U S A M M E N F A S S U N G

Geochemische Daten regionaler Oberflächensedimente des Genfersees der Jahre 1970-1978, sowie der antropogene Einfluss aus Schwermetallkonzentrationen wurden mit Hilfe statistischer Analysen ausgewertet.

Folgende theoretische Begriffe und Zusammenhänge werden vorgestellt und diskutiert:

- 1) Sedimentäre Trägersubstanzen.
- 2) Abhängigkeit der Spurenelementkonzentrationen von der Korngrösse des Sedimentes.
- 3) Höhe der natürlichen Konzentrationen und Anreicherungen.
- 4) Geographische Verteilung von Spurenelementassoziationen und Trägersubstanzen.

Eine automatische, multivariate statistische Analyse, die vorallem darf den drei Komponenten Kalzit, Quarz, Silica basiert, klassiert die Sedimente in 7 geochemische Fazien. Sie widerspiegeln die beiden wichtigsten Sedimentquellen authochtone Kalzitausfällung beziehungsweise detritische Quarz Zufluss.

Die Mineralogie der Sedimente wurde mit statistischer Mitteln aus der Hauptelementanalyse abgeleitet und mit Röntgendiffraktometer, EDAX und Korngrössenanalysen verifiziert. Zuflussbedingte Gradienten in der geographischer Verteilung verschiedener Mineralien existieren im ganzen Seebecken.

Geographische Variationen der Beziehungen zwischen Haupt- und Spurenelementassoziationen deuten auf einen wechselnden Grad von Fixation der letzteren auf folgenden Träger substanzen hin:

- 1) Kalzit, 2) Organisches Material, 3) Phosphate, 4) Silicate, 5) Eisenoxide und -hydroxide.

Berechnungen des Anreicherungs factors C zeigen klar, dass Quecksilber der Hauptverschmutzer der Genferseesediment ist. ($C_{\text{mittel}} = 22$, $C_{\text{max}} = 60$). Die Entwicklung der C Werte zwischen 1970 und 1978 zeigt geographische Verschiebungen der Verschmutzungsquellen.

Kadmium und Silber haben C_{mittel} -Werte zwischen 3 und 5 mit C_{max} von 52 resp. 170. Diese beiden Elemente, zusammen mit Sn, Ba, Ni, Cr, Pb, Cu und Zn haben ihren Ursprung in einer grossen Kläranlage an der nördlichen Küste des Sees.

A B S T R A C T

The regional geochemistry of lac Léman sediments, as well as the impact of human activities on heavy metal concentrations have been studied by means of a statistical analysis of data collected between 1970 and 1978.

A few theoretical concepts are first enunciated and discussed, viz. (1) the notion of carrier substance ("support sédimentaire"), (2) the influence of grain size on trace element concentrations, (3) the notions of base-line or natural concentration and enrichment factor, and (4) the spatial variability of geochemical associations between carrier substances and trace elements.

An automatic, multivariate statistical classification scheme has shown the sediments to be distributed into 7 geochemical facies, based mainly on the CaCO_3 -quartz-silicates system. This system expresses the dual nature of lac Léman sedimentation, influenced by a significant, autochthonous CaCO_3 precipitation, as well as silicate inputs from the alpine rivers.

The mineralogy of the sediments has been deciphered using statistical methods applied to major element analytical results, and confirmed by XRD, EDAX and grain size analyses. Significant gradients exist in the distribution of various minerals throughout the lake, pointing out to petrological differences between the zones of influence of the main tributaries.

Spatial variability of statistical associations between major and trace elements indicates a varying degree of fixation of the latter onto the carrier substances, which are: (1) CaCO_3 (minor), (2) Organic matter, (3) Phosphates, (4) Silicates, and (5) Fe oxides and hydroxides.

Computation of enrichment factors (C) clearly shows that mercury is the main contaminant of lac Léman sediments ($C_{\text{mean}} = 22$, $C_{\text{max}} = 60$). The evolution of C values between 1970 and 1978 points to a geographical change in contamination sources during this period. Cadmium and Ag have C_{mean} values varying between 3 and 5, with maxima of 52 and 170 respectively. These two elements, together with Sn, Ba, Ni, Cr, Pb, Cu and Zn originate mostly from the effluents of a major sewage treatment plant, located on the Northern coast of the lake.

1. INTRODUCTION

La géochimie des sédiments du Léman n'a pas, jusqu'à nos jours, fait l'objet d'une étude générale et synthétique. Seuls quelques aspects de ce problème ont été abordés: ROMIEUX (1930) a étudié la répartition géographique des carbonates; JOUKOWSKY et BUFFLE (1938) ont examiné l'évolution chronologique de la composition chimique des sédiments du Petit-Lac. Plus récemment, SERRUYA (1969) et MEYBECK (1970) ont présenté les premières analyses complètes de sédiments lémaniques, portant sur les éléments majeurs essentiellement.

Ce n'est qu'en 1972 que les premières données sur la teneur en mercure des sédiments du Grand et du Petit-Lac ont été publiées (VERNET et THOMAS 1972, VERNET et al. 1972), suivies par l'étude de JAQUET et al. (1975a) sur la définition de faciès géochimiques dans le Petit-Lac. Peu après, VERNET et al. (1975) présentaient les résultats de mesures de radioactivité α entreprises sur l'ensemble du lac.

Les relativement fortes concentrations en mercure mises en évidence dans les sédiments par VERNET et THOMAS (1972 a et b) ont poussé la "Commission internationale pour la Protection des Eaux du Léman contre la Pollution" (CIPEL) à étudier plus à fond la répartition des métaux lourds dans les sédiments de ce lac. Successivement, l'on a examiné les zones de rejets des stations d'épuration (STEP) (JAQUET et VERNET 1976, JAQUET 1978 et JAQUET et al. 1979), les zones côtières (DAVAUD et al., 1977) et l'ensemble des sédiments superficiels du lac (RAPIN et al., 1978).

Basé essentiellement sur l'analyse statistique des très nombreuses données récoltées sous l'égide du Fonds National et de la CIPEL, le présent travail a pour but d'esquisser les grandes lignes de la géochimie naturelle des sédiments du Léman, ainsi que les modifications apportées à celle-ci par l'activité humaine.

2. METHODOLOGIE

2.1. Prélèvements et analyses

- Prélèvements: les sédiments sont prélevés à la benne Shipek; seule la couche superficielle (environ 0,5 cm) est conservée pour l'analyse. Cette épaisseur représente un temps de dépôt entre 6 mois et 5 ans (FAVARGER et VERNET, 1979). Les campagnes ont eu lieu en 1970-1971 et 1978 sur une grille régulière de 1. puis 1,4 km de côté (295 échantillons). Pour des raisons d'uniformité dans les prélèvements et les analyses, il a surtout été tenu compte de la campagne 1978.
- Fractionnement granulométrique: le sédiment humide est tamisé au-dessus de 63 μ m et analysé au compteur Coulter au-dessous de cette limite. Afin de minimiser l'influence de la granulométrie et de travailler dans un domaine de concentration plus éloigné des seuils de détection, les analyses chimiques sont faites sur la fraction inférieure à 63 μ m. Tous les résultats reportés ci-après se rapportent donc à cette fraction.

- Analyses chimiques:

Eléments majeurs et éléments-traces (sauf exception): dosage par spectrométrie d'émission sur poudre granulométrée après élimination de H_2O , CO_2 et matière organique. Les résultats des traces sont rapportés à la somme, ramenée à 100, des oxydes majeurs.

Les échantillons-types de chaque faciès géochimique ont été en outre analysés semi-quantitativement par microsonde dispersive en énergie (EDAX, modèle 9100/60).

Mercure: dosage par spectrophotomètre d'absorption atomique (AA) en vapeur froide, après digestion du sédiment dans un mélange chloronitrique concentré.

Cadmium: dosé, sur la même liqueur d'attaque, par AA (four graphite).

Carbone inorganique: mesuré au calcimètre type Bernard sous forme de $CaCO_3$ (JAQUET et al., 1971).

Azote: dosage par Kjeldahl des formes organiques réduites et de l'azote ammoniacal.

Phosphore total: dosage selon la méthode de WILLIAMS (WILLIAMS et al., 1976; WILLIAMS et al., 1978).

- Traitement informatique et statistique: il a été effectué sur l'ordinateur UNIVAC 1100 de l'Université de Genève, à l'aide de la bibliothèque de programmes du Département de Géologie. Les données brutes utilisées dans ce travail se trouvent dans la banque de données de la CFS, gérée au moyen d'un ensemble de programmes décrits par DAVAUD et JAQUET (1977).

2.2. Concepts de base

Un certain nombre de notions fondamentales ont servi de cadre méthodologique à cette étude. Comme elles sont définies et décrites en détail dans une autre publication (JAQUET et al., 1982a), on n'en trouvera ici qu'un résumé succinct.

2.2.1. Le support sédimentaire

Les éléments-trace peuvent être liés à la phase principale du sédiment (minéraux) de plusieurs manières différentes. Ces liens gouvernent de façon critique la mobilité géochimique des métaux, et par voie de conséquence, également leur toxicité potentielle. Il est donc important de pouvoir mettre en évidence le type de relation existant entre support et trace. Dans un premier temps, l'on a eu recours à l'analyse statistique par ordination (DAVAUD, 1976a, p. 111), qui a fourni les diagrammes de la fig. 6. Les liens mis ainsi en évidence ont été occasionnellement vérifiés par microsonde (JAQUET, 1983) et par spéciation chimique (TESSIER et al., 1979; GARCIA et LORIS, 1978).

2.2.2. Granulométrie et composition chimique

L'existence d'une relation entre la granulométrie d'un sédiment et sa composition minéralogique est un fait maintenant bien établi (DAVAUD, 1976a). Le plus souvent, la granulométrie d'un sédiment est exprimée par son grain moyen et l'on calcule le coefficient de corrélation de ce dernier paramètre avec les variables géochimiques. Cette manière de faire donne en général des résultats décevants, le grain moyen n'exprimant qu'une fraction de l'information contenue dans tout le spectre granulométrique.

Il existe une méthode plus efficace, mise au point par RAPIN (1980) et utilisée dans ce travail: la granulométrie du sédiment est exprimée par les pourcents-poids des 17 fractions granulométriques déterminées au compteur Coulter, dont on calcule le coefficient de corrélation avec les variables géochimiques. Les "profils" établis sur la base de ces résultats (fig. 7-8) montrent clairement dans quelle fraction du sédiment tel élément tend à être le plus abondant.

Il en résulte que lorsque deux ou plusieurs éléments sont associés aux mêmes fractions granulométriques, on peut raisonnablement penser qu'ils sont constitutifs des mêmes minéraux. En outre, ces derniers peuvent être considérés comme support d'une trace, si elle est corrélée aux mêmes fractions. Enfin, l'on peut postuler que lorsqu'un élément est associé aux fractions supérieures à 10 μm , il est probablement constitutif des micas, feldspaths et matière organique, alors qu'en dessous de cette limite, il l'est plutôt des argiles (fig. 7b).

Table 1 - Teneurs naturelles en éléments traces de divers sédiments (ppm).

Eléments	Pélites		Carbonates marins ¹⁾	Coefficient α 2)
	Shale ¹⁾ standard	Léman ²⁾ (T _{pél.})		
Ag	---	300	---	3,0
B	100	80	20	0,8
Ba	580	400	10	4,0
Cd	0,3	3	0,04	0,03
Cr	90	90	11	0,9
Cu	45	50	4	0,5
Hg	0,4	0,05	0,04	0,0005
Mn	850	850	1100	8,5
Ni	68	60	20	0,6
Pb	20	50	9	0,5
Sn	6	10	---	0,1
V	130	110	20	1,1
Zn	95	100	20	1,0

1) d'après TUREKIAN et WEDEPOHL (1961)

2) coefficients de l'équation $T^m = T_{pél.}^m - \alpha \text{CaCO}_3$ (voir 2.2.3.)

2.2.3. Teneur naturelle et taux de contamination

La détermination du degré de contamination d'un sédiment nécessite la connaissance de sa teneur naturelle en diverses traces, laquelle dépend directement de sa composition minéralogique. Sur la base des données de TUREKIAN et WEDEPOHL (1961), FAVARGER et VERNET (1979), RIBORDY (1974), JAQUET et al. (1978) expriment (fig. 1) la teneur naturelle T^m d'un sédiment en un métal donné m par:

$$T^m = T_{\text{pélite}}^m - \alpha \cdot \text{CaCO}_3 \quad (T^m \leq T_{\text{pélite}}^m)$$

ou $T_{\text{pélite}}^m$ et α sont données dans la Table 1. Cette formule est basée sur les hypothèses simplificatrices suivantes: (a) les carbonates précipités lacustres ont une teneur en traces inférieure au ppm (donc pratiquement nulle). (b) Les teneurs naturelles maximales sont celles des argiles ou pélites (Table 1). (c) Les sédiments du Léman sont constitués à plus de 90% d'un mélange de carbonate et de quartz, dont les teneurs naturelles sont nulles, et d'argiles. En l'absence de données quantitatives sur le quartz, on les a considérés comme un mélange binaire d'argiles et de carbonates; ce faisant, on a tendance à minimiser la contamination.

A partir de ces teneurs naturelles et des résultats analytiques obtenus sur un sédiment et pour un métal (m) donnés, on estime son taux de contamination par:

$$C^m = \frac{\text{Teneur mesurée}}{\text{Teneur naturelle}} \quad (C^m \geq 1),$$

ce paramètre pouvant être aussi calculé sur une base régionale ($C_{\text{rég.}}^m$) ou sur le lac dans son ensemble (C_T^m).

Pour estimer l'ordre de grandeur d'une contamination polymétallique dans un sédiment, JAQUET et al. (1978) ont proposé les index de pollution (IP) suivants:

- pour le mercure:

$$IP^{\text{Hg}} = C^{\text{Hg}}$$

- pour les éléments à tendances organophiles:

$$IP^{\text{org}} = \frac{C^{\text{Pb}} + C^{\text{Cu}} + C^{\text{Zn}} + C^{\text{Cr}} + C^{\text{Cd}} + C^{\text{Sn}} + C^{\text{Ba}} + C^{\text{Ag}}}{8}$$

- pour les éléments à tendances argilophiles:

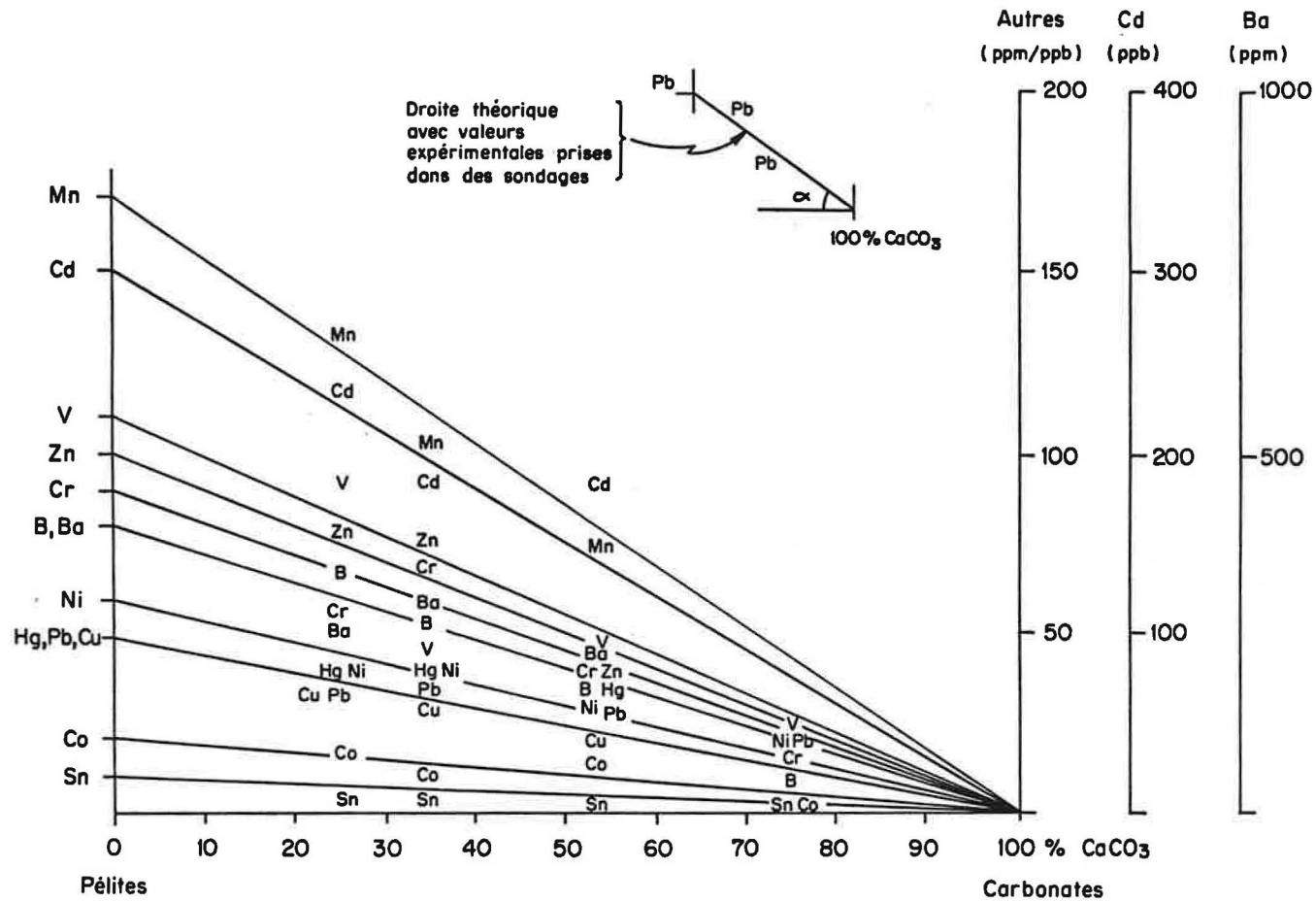
$$IP^{\text{arg}} = \frac{C^{\text{Mn}} + C^{\text{Ni}} + C^{\text{Co}} + C^{\text{V}} + C^{\text{B}}}{5}$$

- pour l'ensemble:

$$IP^{\text{tot}} = \frac{IP^{\text{Hg}} + 8 \cdot IP^{\text{org}} + 5 \cdot IP^{\text{arg}}}{14}$$

L'existence de quatre index se justifie par les affinités géochimiques entre éléments, mise en évidence au cours d'études antérieures (JAQUET et al., 1978; DAVAUD et al., 1977).

Figure 1 - Abaque pour l'estimation de la teneur naturelle des sédiments en éléments-trace,
en fonction de la teneur en CaCO_3 .



2.2.4. Variabilité spatiale des associations géochimiques

Dans un milieu sédimentaire aussi hétérogène que le Léman, soumis à des influences anthropiques variées, il n'y a pas de raison pour qu'un élément-trace donné soit associé partout au même support sédimentaire. Cette règle va s'exprimer statistiquement par une hétérogénéité des lois de covariation existant entre éléments majeurs et traces, qui sera fonction de la position géographique. DAVAUD et al. (1977) ont ainsi déjà mis en évidence plusieurs "populations sédimentaires" caractérisées par des lois de covariation différentes.

Dans le but de séparer et d'identifier ces populations de manière objective, les 295 échantillons décrits par 29 variables ont été soumis à une analyse en mode Q, au moyen d'un algorithme agglomératif non hiérarchique dû à FROIDEVAUX et al. (1976). On a obtenu ainsi plusieurs faciès géochimiques analogues à ceux mis en évidence dans le Petit-lac par une méthode différente (JAQUET et al., 1975a).

Cette opération classificatoire a été faite en début d'étude et toutes les analyses statistiques destinées à déchiffrer les relations entre substrats et éléments-trace ont été faites sur les faciès pris séparément.

3. C A D R E L I M N O L O G I Q U E E T S E D I M E N T O L O G I Q U E

Les caractéristiques physiques du Léman et de son bassin versant sont reportées dans la Table 2, la composition chimique moyenne de l'eau dans la Table 3 et la pétrographie des roches du bassin versant résumée sur la fig. 2a. Pour plus de détails, on consultera avec profit SERRUYA (1969), MEYBECK (1970) et VERNET et al. (1971).

Près des neuf dixièmes du bassin versant sont en zone alpine (Valais et Châblais), drainés par le Rhône et la Dranse. Ces deux cours d'eau fournissent au lac les 85% des apports hydriques et les 90% des apports sédimentaires allochtones. Leur influence sur la sédimentation est donc très importante.

En ce qui concerne la population et les industries de la région lémanique, elles sont concentrées dans la vallée du Rhône (Valais) et sur la rive Nord du lac (Vaud et Genève).

Le Léman (Table 2) est un lac profond, où les eaux séjournent en moyenne 10 ans (HUBERT, 1971). Il est du type monomictique chaud de premier ordre (DUSSART, 1966).

Du point de vue chimique, les eaux du Léman sont bicarbonatées calciques et peu chargées en sel dissous (Table 3). En 1978, la concentration moyenne en phosphore total était de $0,087 \text{ mg l}^{-1}$ (MONOD, 1978), et la productivité primaire annuelle nette de 157 g Cm^{-2} , ce qui place le Léman dans la catégorie des lacs mésotrophes à eutrophes (PELLETIER, 1978).

Figure 2a - Pétrographie des roches dans le bassin versant du Léman
(d'après SERRUYA (1969), simplifié)

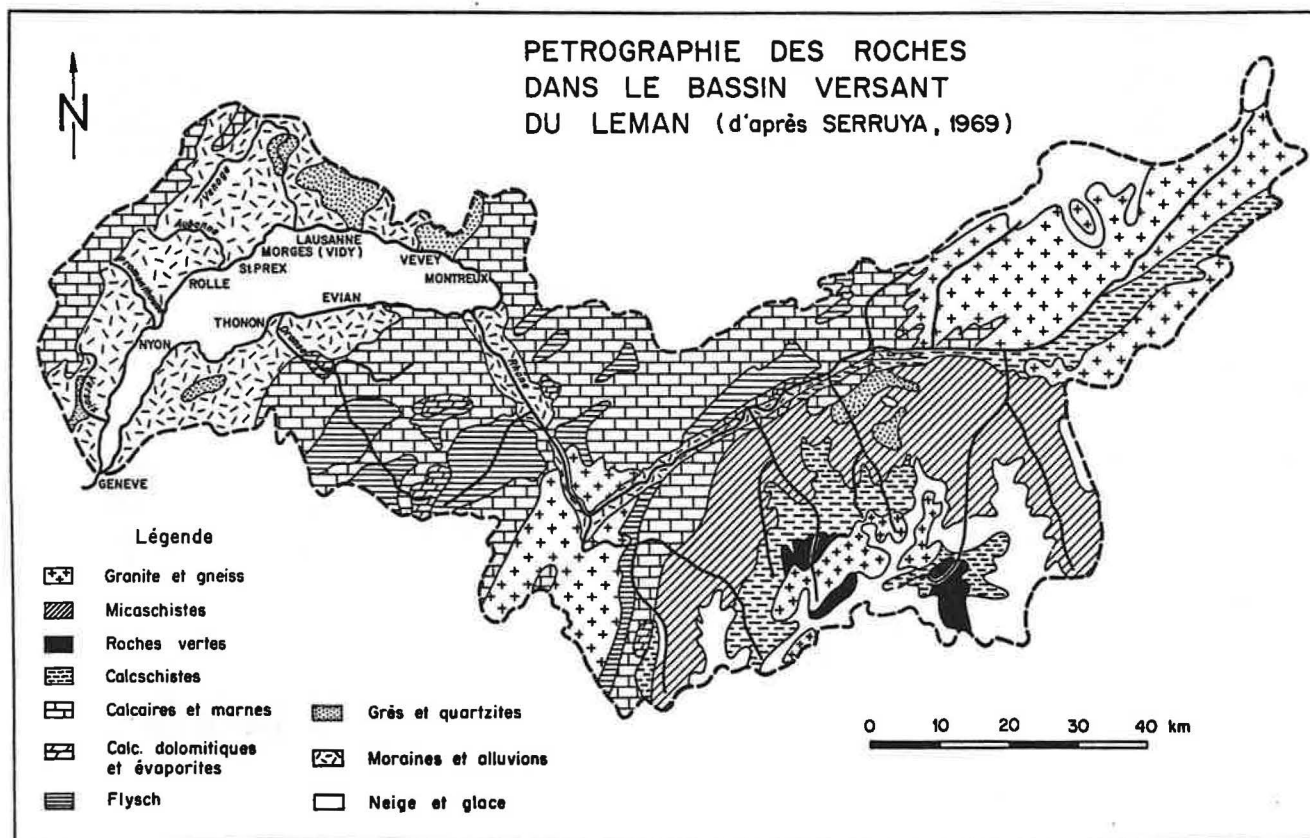
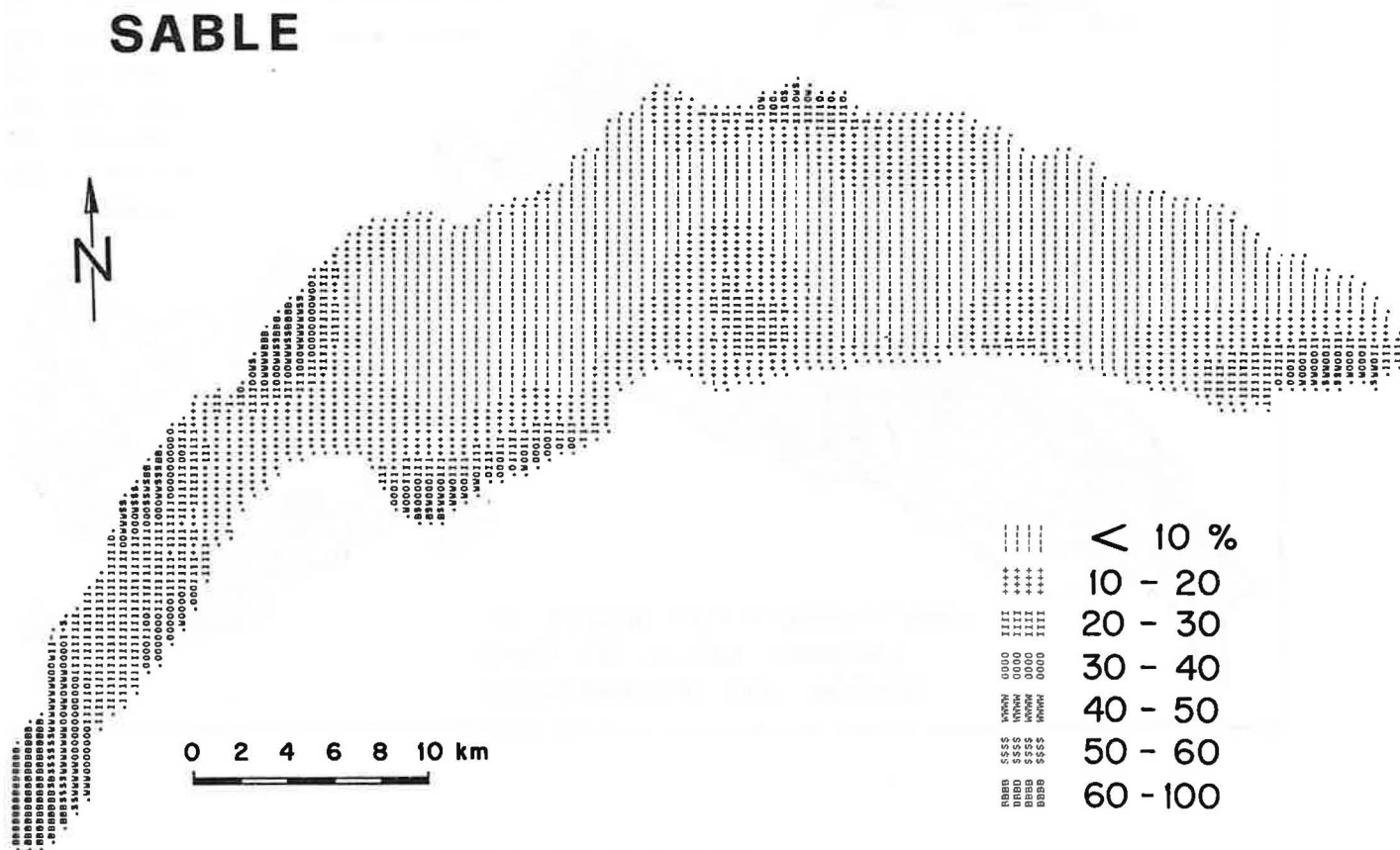


Figure 2b - Granulométrie des sédiments superficiels du Léman, exprimée en pourcents de fraction sableuse ($> 63 \mu\text{m}$)



Les travaux de VERNET et al. (1972a) et JAQUET et al. (1975b) sur la granulométrie des sédiments lémaniques ont permis leur subdivision en plusieurs faciès. Ils reflètent le mélange en proportions variées d'une sédimentation autochtone (calcite, opale et matière organique) et d'apports allochtones provenant des rivières. Ces derniers prédominent dans le Haut-Lac et le Grand-Lac, et diminuent d'importance en direction du Petit-Lac, où la sédimentation carbonatée prédomine nettement. La répartition spatiale de la fraction sableuse (fig. 2b) exprime bien cette influence conjuguée de la bathymétrie et des apports fluviaux.

Table 2 - Caractéristiques physiques du Léman et de son bassin-versant

BASSIN VERSANT (b.v.)		
Superficie	7 975	km ²
Altitude moyenne	1 670	m
Surface du lac } Surface du b.v. }	13,7	%
% du b.v. recouvert de glaciers	11	%
Apports hydriques ^a	7,1	km ³ an ⁻¹
Apports solides ^b	7	10 ⁶ t an ⁻¹
Population	760 000	habitants
LAC		
Altitude	372	m
Volume	89	km ³
Surface	582	km ²
Profondeur max.	309	m
Profondeur moy.	152	m
Temps de séjour théorique moyen	12,5	années
Taux de sédimentation théorique moyen ^b	1,4	g cm ⁻² an ⁻¹
Taux de sédimentation plaine centrale ^c	0,07	g cm ⁻² an ⁻¹

a norme 1964-1977 (BURKARD 1978)

b MEYBECK (1970)

c KRISHNASWAMY et al. (1971); JAQUET et al. (1983)

Table 3 - Composition chimique moyenne de l'eau
du Léman¹

Ion	Concentration		Tonnage (t)
	(mg l ⁻¹)	(μ M)	
HCO ₃ ⁻	110	1800	9 800 000
SO ₄ ⁻⁻	50	500	4 450 000
Ca ⁺⁺	46	1200	4 100 000
Mg ⁺⁺	6,1	250	540 000
Cl ⁻	2,9	80	260 000
Na ⁺	2,8	120	250 000
SiO ₂	1,9	60	169 000
NO ₃	1,73	30	154 000
K ⁺	1,35	30	120 000
PO ₄ ⁻⁻⁻ (tot.)	0,22	2,3	20 000
NH ₄ ⁺	0,02	1,2	1 800
NO ₂ ⁻	0,01	0,2	900
Fe	0,01	0,2	900
Mn	0,003	0,05	300
Total	223	4074	19 870 000

Bilan ionique

Anions		Cations	
Unité	mé/l	Unité	mé/l
HCO ₃ ⁻	1,80	Ca ⁺⁺	2,30
SO ₄	1,04	Mg ⁺⁺	0,50
Cl ⁻	0,082	Na ⁺	0,122
NO ₃ ⁻	0,028	K ⁺	0,035
PO ₄ ⁻⁻	0,005	NH ₄ ⁺	0,001
NO ₂ ⁻	0,0001	Fe ⁺⁺	0,0003
	2,955		2,958

1 d'après MONOD (1972) et JAQUET et al. (1983)

4. R E S U L T A T S

4.1. Faciès géochimiques

La classification automatique multivariée des sédiments a mis en évidence sept groupes, ou faciès géochimiques qui sont reportés sur la fig. 3. Mentionnons que cette classification est stable, à quelques détails près, quelles que soient les options utilisées par l'algorithme (coefficient de Pearson ou tau de Kendall, rotation ou non de la matrice des composantes principales, etc.).

L'analyse en composantes principales, dont les résultats ont servi de base à la procédure de classification, révèle que le premier vecteur (38% de la variance totale) dépend fortement du système CaCO_3 - quartz - silicates et éléments-trace argilo-philés. Le second vecteur (19%) représente la matière organique et les éléments-trace organophiles; le troisième (9%), le phosphore et la granulométrie, et le quatrième (5%), le manganèse. Une estimation du pouvoir classificatoire des variables, faite selon la méthode donnée par JAQUET et al. (1975a), montre que les faciès sont établis principalement sur la base des variables CaCO_3 , TiO_2 , SiO_2 , K_2O et V. Les faciès 1 à 6 dépendent donc essentiellement du système carbonate-silicates. Leurs caractéristiques sont résumées dans la Table 4 et présentées en détail dans les Tables 5 à 9.

Ces données, ainsi que la forme des limites entre les faciès (fig. 3), montrent clairement que le Léman est le théâtre de deux types de sédimentation qui s'opposent. D'une part, on a la déposition de CaCO_3 autochtone produit en été dans l'épilimnion (Faciès 1), ainsi que celle du manganèse précipité dans la zone profonde (fig. 6) par la "mangano-bactérie" Metallogenium (JAQUET et al. 1982b). D'autre part, on a les apports allochtones silicatés du Rhône (F5) et ceux à tendance dolomitique de la Dranse (F3), qui se superposent à la sédimentation autochtone et la "diluent". Le faciès 4 représente la partie distale de la sédimentation rhodanienne et le faciès 2 une zone de transition entre F1 et F4.

Le faciès 7, localisé dans la baie de Vidy, à l'Ouest de Lausanne (fig. 3), est le seul que la classification automatique ait produit sur la base des éléments-trace, tant les teneurs en sont élevées ($\text{IP}^{\text{tot}} = 10,3$, Table 9). Les faciès 2, 4 et 6 sont moyennement enrichis en métaux trace (IP^{tot} entre 3,3 et 4,4), et les zones du Rhône, de la Dranse et du Petit-Lac le sont faiblement ($\text{IP}^{\text{tot}} \approx 2,8$).

Etant donné que F7 n'était représenté que par un seul échantillon, on a remplacé ce dernier par 12 autres, provenant d'une campagne d'échantillonnage plus serré, faite en 1979 (JAQUET et al., 1979).

Figure 3 - Répartition géographique des faciès géochimiques obtenus par l'analyse en mode Q

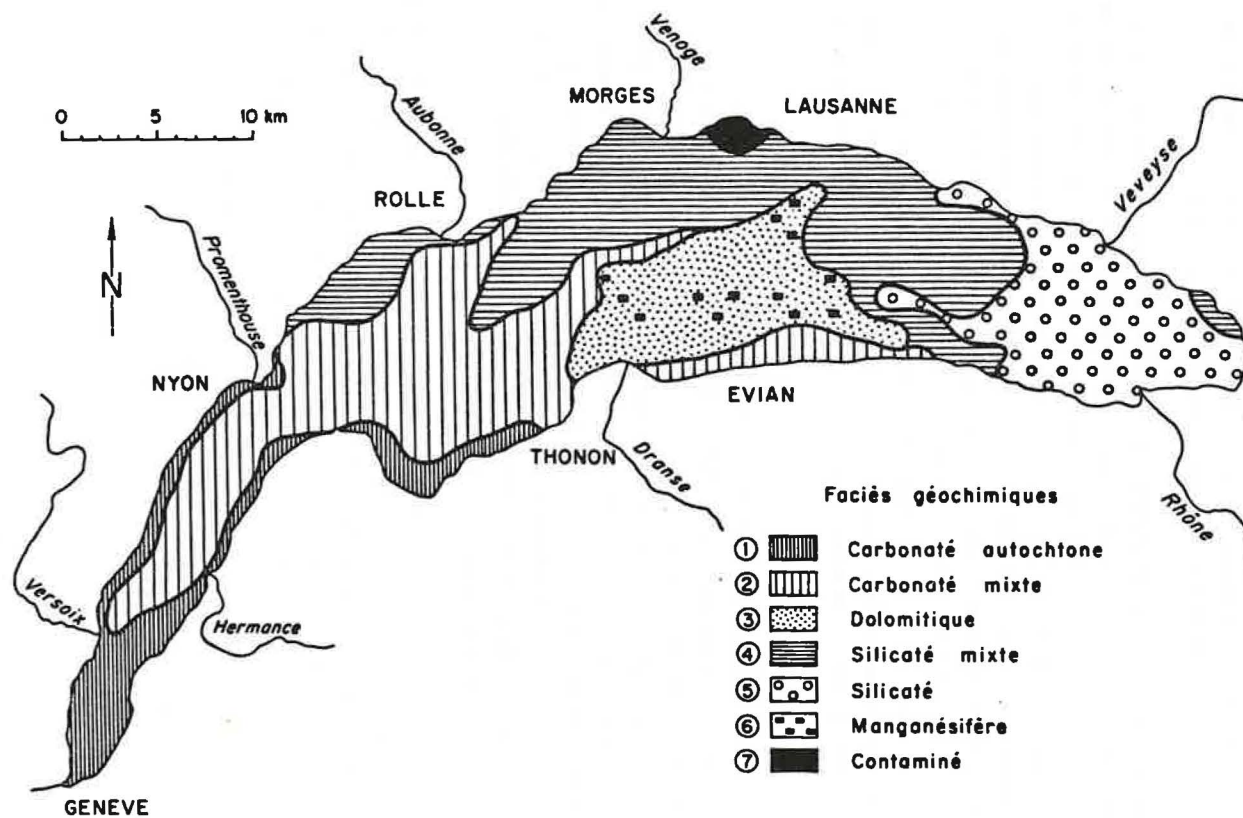


Table 5 - Valeur moyenne des éléments majeurs par faciès (% ou ppm)¹

Faciès	Bathy. m	Grain moy. (μ m)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Ptot (ppm)	Corg.	Ntot	C/N
1 Petit Lac	28	11	0,5	2,0	11,0	33,9	0,4	2,2	42,5	4,1	706	2,3	0,31	7,3
2 Moy. Lac	106	8	0,7	2,4	14,6	45,4	0,5	3,2	22,6	5,4	692	2,0	0,27	7,4
3 Dranse	260	8	0,6	3,2	14,4	48,7	0,6	3,2	20,8	5,4	687	1,7	0,20	8,7
4 Côte N	199	7	1,1	2,8	17,0	54,3	0,6	4,2	13,9	6,9	715	2,0	0,23	8,6
5 Rhône	168	9	1,5	3,2	17,6	49,2	0,8	5,1	11,1	7,4	782	1,3	0,15	8,6
6 Plaine	284	8	0,8	3,4	14,6	51,4	0,6	3,7	18,9	6,2	705	1,9	0,21	9,1
7 Vidy	19	12	0,9	2,2	12,6	51,2	0,6	2,7	20,6	6,1	2743	3,8	0,40	9,4
Lac Total	157	8	0,9	2,7	15,4	49,4	0,6	3,7	20,0	6,0	727	1,9	0,24	7,9

¹ Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti et Fe: analyses au quantomètre, corrigées EDAX

Table 4 - Caractéristiques des faciès géochimiques

Faciès	Lieu	Bathy. m	CaCO ₃ %	$\frac{Na_2O}{MgO}$	IP ^{tot}	Remarques
1	Petit lac côtier	28	50	0,25	3,2	Carbonate précipité dominant. Peu enrichi en traces.
2	Petit lac prof. Part. W. Gd. Lac	106	36	0,29	4,0	Mélange argiles-carbonate. Moyenn. enrichi en traces (Hg fort).
3	Delta de la Dranse	260	31	0,19	2,5	Dolomite détritique. Quartz abond. Traces faibles.
4	Partie nord Grand lac	199	25	0,39	4,4	Silicates abond. (argiles, micas). Moyenn. enrichi en traces.
5	Haut lac (Delta Rhône)	168	17	0,47	2,3	Silicates (feldsp., micas). Traces faibles.
6	Plaine centrale p.p.	284	28	0,24	3,3	Analogue à 3. Mn très abondant.
7	Baie de Vidy	19	32	0,41	10,3	Carbonate et quartz abond. Très fort enrichiss. en traces.
-	Ensemble du lac	157	30	0,33	3,6	

4.2. Composition minéralogique

En général, on considère que les éléments majeurs apportent peu d'information sur la minéralogie d'un sédiment (JONES et BOWSER, 1978). Dans le cas, toutefois, où le nombre des éléments majeurs analysés est supérieur ou égal à celui des minéraux en présence, et où la composition chimique de ces derniers est connue avec précision, il est possible d'estimer mathématiquement la composition minéralogique du sédiment (DAVAUD, 1976b).

En ce qui concerne le Léman, les minéraux sont trop nombreux pour permettre l'application de cette méthode. Aussi, avons-nous eu recours non seulement aux pourcentages d'oxydes, mais aussi à leurs rapports, ainsi qu'à l'information apportée par la granulométrie. Nous avons ensuite contrôlé les résultats obtenus à l'aide de ces moyens indirects par des analyses en diffraction X.

4.2.1. Pourcentages d'oxydes

Les travaux de ROMIEUX (1930) et de MEYBECK (1970) ont montré que les sédiments lémaniques sont constitués par un mélange comprenant du CaCO₃ d'une part, et du quartz, de la silice amorphe (diatomées) et divers silicates, d'autre part. Le carbonate est surtout autochtone, mais il peut être aussi allochtone (SERRUYA, 1969). La matière organique ne constitue que quelques pourcents du total.

Les cartes de la pl. 1 rendent bien compte de cette répartition. On notera l'abondance du carbonate dans le Petit-Lac (pl. 1 a), dilué par les apports silicatés du Rhône, qui dominent dans le Haut-Lac et la partie Nord du Grand-Lac (pl. 1 b-c). Les deltas du Rhône et de la Dranse se marquent nettement par des teneurs maximales en MgO (pl. 1 d), dont la signification géochimique est discutée plus loin.

4.2.2. Rapports d'oxydes

Parmi tous les rapports calculables entre oxydes majeurs, les suivants peuvent être raisonnablement interprétés en termes minéralogiques (Table 6):

- $\text{SiO}_2 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$: la valeur de ce rapport est infinie pour le quartz et l'opale et varie entre 0,7 et 2 pour les silicates. Il est donc inversement proportionnel à l'abondance des silicates.
- $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$: également infini pour le quartz et l'opale, il varie entre 3,6 et 1,3 dans l'ordre chlorite - feldspaths - illite - kaolinite - micas. Tout en étant directement proportionnel à l'abondance de la silice libre, il doit être aussi sensible aux proportions relatives de ces silicates (fig. 4).
- $\text{Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$: comme Na n'est pratiquement présent que sous forme d'albite, ce rapport est fonction de la proportion des feldspaths par rapport aux autres silicates (pl. 2).
- $\text{K}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$: ce rapport décroît de 0,9 à 0 suivant l'ordre feldspaths - micas - illite - kaolinite et chlorite.
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{MgO}$: en ce qui concerne les silicates, ce rapport vaut 1,5 pour la biotite, et entre 0,2 et 4,5 pour les chlorites. Pour la dolomite, il est nul, et très élevé pour les oxydes de fer.

Les valeurs de ces rapports pour les différents faciès sont reportées sur la fig. 4 et la pl. 2. On peut en retirer les informations suivantes:

La proportion de silice libre par rapport aux silicates augmente du Haut-Lac vers le Petit-Lac. Elle est forte dans le delta de la Dranse et très forte à Vidy (Fig. 4 a-b). La nature de cette silice libre peut être estimée par examen des fractions au MEB: dans les sédiments du Petit-Lac et de Vidy, les frustules de diatomées sont très abondantes, même dans la fraction argileuse, alors que dans le delta de la Dranse, le quartz domine nettement.

Les feldspaths diminuent nettement du delta du Rhône vers le Petit-Lac, et sont à un minimum dans le delta de la Dranse, dont le bassin versant est constitué en quasi-totalité de roches sédimentaires (Fig. 4 et pl. 2).

Le rapport $\text{K}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ (Fig. 4 d) indique une prédominance successive des micas, de l'illite et de la kaolinite en passant du Haut-Lac au Petit-Lac.

Enfin, la présence de dolomite détritique dans le delta de la Dranse et la Plaine centrale (pl. 1 d et 4 e) est attestée par un rapport $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{MgO}$ bas. En revanche, la forte valeur notée à Vidy indique un excès de Fe_2O_3 , dont l'origine anthropique a déjà été signalée par WILLIAMS et al. (1978).

On notera sur la Fig. 4 que les caractéristiques géochimiques de la Plaine centrale (F6) sont influencées tant par le Delta du Rhône (F5) que par celui de la Dranse (F3).

L'importance capitale des apports du Rhône et de la Dranse sur la minéralogie de la phase non-carbonatée peut être illustrée par la variation géographique du rapport $\text{Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ reportée sur la Fig. 4 c et la pl. 2.

La distribution du carbone organique est reportée sur la pl. 1 e. La majeure partie des sédiments lémaniques ont des teneurs comprises entre 1,8 et 2,5%, exception faite des deltas ($<1,8\%$) et de quelques zones côtières (jusqu'à 4,5%).

La tendance à l'auto- ou allochtonie de la matière organique peut être évaluée à l'aide du rapport C/N (DAMIANI 1974), dont les valeurs moyennes par faciès sont reportées dans la Table 5, et la répartition spatiale sur la pl. 1 f. Les sédiments du Petit-Lac et de la partie W du Grand-Lac (faciès F2) ont des valeurs de C/N ≤ 8 , indiquant une matière organique à dominance autochtone. L'ensemble du Grand-Lac se tient autour de 8-9, alors que dans les zones de delta et de Lausanne, C/N peut atteindre jusqu'à 14, ce qui indique un caractère nettement allochtone.

Comme l'avait indiqué MEYBECK (1970), la répartition du phosphore total est relativement uniforme dans l'ensemble des sédiments lémaniques. On note néanmoins sur la pl. 1 g un certain nombre de zones profondes à teneurs relativement faibles (< 680 ppm), un ensemble entre 680 et 950 ppm et quelques zones côtières dépassant cette dernière valeur. On sait que P tot. représente la somme de plusieurs formes de phosphore, dont le comportement géochimique est fort différent (WILLIAMS et al., 1978). A ce titre, P tot. n'est pas un paramètre apportant beaucoup d'information. On se reportera à l'étude de JAQUET (1978) pour des données et une discussion sur la spéciation du phosphore dans le Léman.

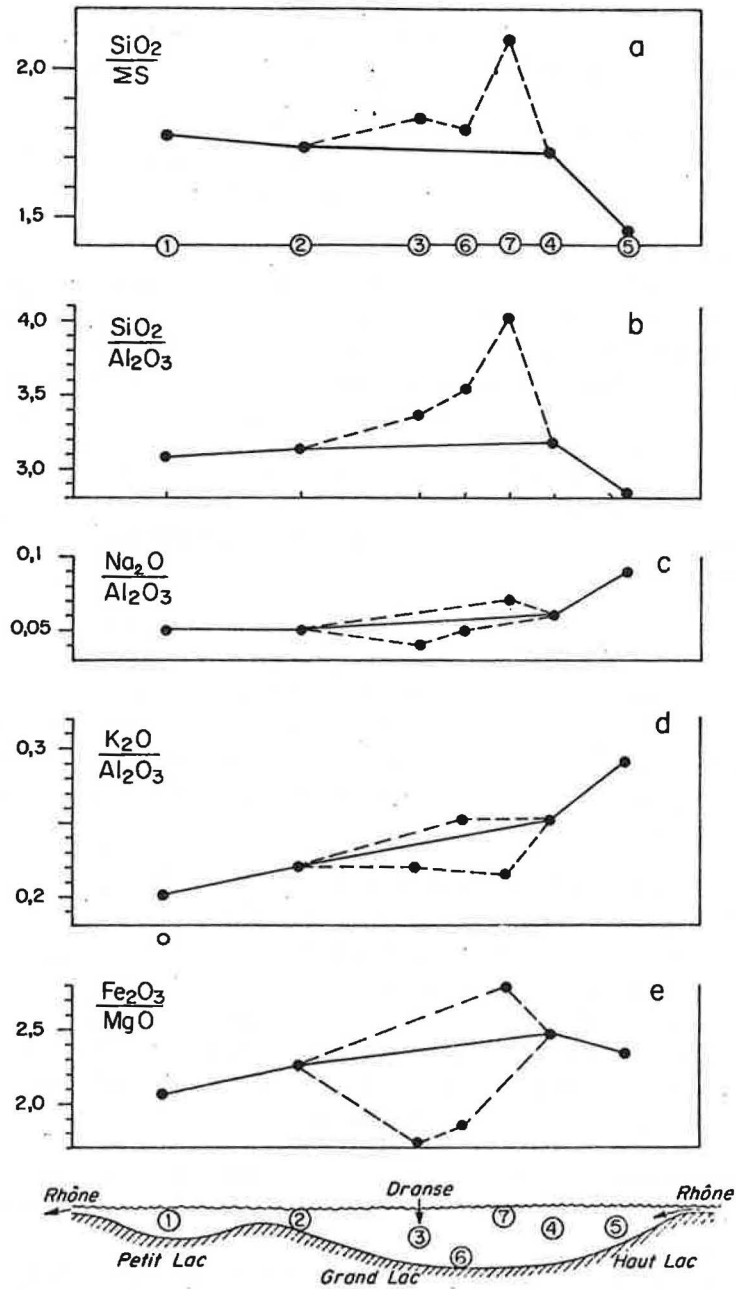
Table 6 - Valeurs approximatives des rapports d'oxydes pour les principaux minéraux ¹

	Feldsp.	Micas	Kaolin.	Illite	Chlorite ² type 1	Chlorite type 2	Chlorite type 3
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	2,6-3,5	1,2-1,9	1,2	1,5-2,5	1,4	24,1	3,1
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	0-0,4	0	0	0	0	0	0
$\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	0-0,9	0,3	0	0,2	0	0	0
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$	--	1,5	--	--	4,5	0,6	0,2
$\text{SiO}_2/\Sigma\text{silic.}$	1,9	0,7	1,2	1,8	0,3	1,1	0,7

¹ calculés d'après BETEKHTINE (1968) et DEER et al. (1962).

² chlorites provenant du Pennique valaisan et du Massif du Gotthard (analyses par EDAX).

Figure 4 - Variation, d'amont en aval, des rapports d'oxydes dans les sédiments superficiels (en trait continu: tendance principale, en tireté: tendances secondaires)

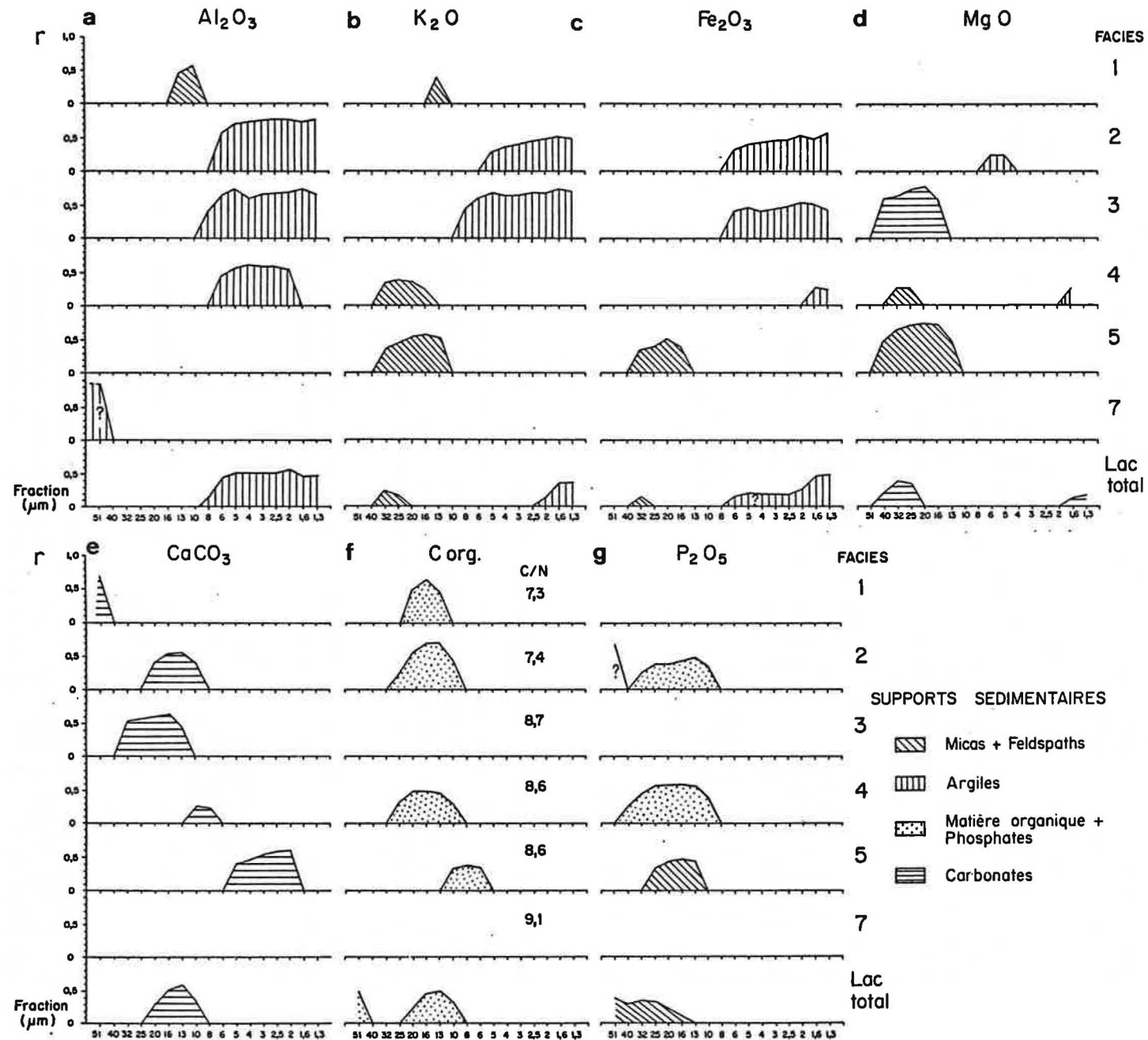


La position des faciès est projetée sur un plan vertical passant par le centre du lac

4.2.3. Relations entre éléments majeurs et granulométrie

Il ressort nettement des coefficients de corrélation calculés entre classes granulométriques et éléments majeurs (voir 2.2.2. et Fig. 5) que ces derniers sont concentrés dans des fractions bien définies du spectre granulométrique, et qui ne sont pas toujours les mêmes d'un faciès à l'autre. Ceci fournit des indications précieuses sur la minéralogie du sédiment, indications que l'on peut résumer ainsi:

- Al_2O_3 prédomine dans les fractions $< 10 \mu\text{m}$, qui représentent les minéraux argileux (Fig. 5a). L'absence de corrélations dans le faciès 5 (delta du Rhône) indique que cet élément est réparti dans plusieurs minéraux de granulométrie différente.
- K_2O (Fig. 5b) tombe dans les mêmes fractions (argiles) qu' Al_2O_3 pour les faciès 1 à 3, non directement influencés par les apports du Rhône. En revanche, il est nettement associé aux fractions $> 10 \mu\text{m}$ dans les faciès 4 et 5 — fractions assimilables aux feldspaths et micas. La présence d'un pic pour Al_2O_3 et K_2O dans les fractions 10-13 μm du faciès 1 pourrait indiquer l'association de ces éléments au sein de feldspaths et micas provenant de grès molassiques (JAQUET et al., 1975a).
- Fe_2O_3 se distribue granulométriquement comme Al_2O_3 et K_2O (Fig. 5c). Dans les faciès 2 à 4, cet élément est lié aux argiles (chlorite et illite), alors que dans le delta du Rhône, il est nettement associé à la fraction 16-32 μm (biotite et autres ferro-magnésiens).
- MgO (Fig. 5 d) n'est pas associé à une fraction particulière dans la partie Ouest du Léman (F1 et 2). En revanche, dans le delta de la Dranse (F3), il se trouve dans les mêmes fractions que CaCO_3 ($> 10 \mu\text{m}$), considéré comme carbonale détritique. Dans ce cas, MgO est donc clairement un constituant de la dolomite. Dans le faciès 4, MgO est aussi corrélé aux fractions $> 10 \mu\text{m}$ (biotite) et 1,6 μm (chlorite). Enfin, dans le faciès 5, il est concentré dans les fractions $> 10 \mu\text{m}$, comme Fe_2O_3 et K_2O (biotite).
- CaCO_3 (Fig. 5 e) semble être abondant dans les fractions $> 63 \mu\text{m}$, indiquant une origine biodétritique dans le Petit-Lac (F1). Dans le faciès 2, il est associé surtout aux classes entre 10 et 20 μm . Des examens au MEB ont montré qu'il s'agit là de carbonate précipité autochtone. Il n'en va pas de même dans le delta de la Dranse (F3), où CaCO_3 est plus grossier et d'origine détritique (dolomite). Dans les faciès rhodaniens (F4-5), on note une diminution de la granulométrie de CaCO_3 , qui est notablement plus fin que le carbonate précipité de F2. Il s'agit là probablement de carbonate détritique allochtone.
- C org. (Fig. 5 f) domine de façon assez constante dans les fractions comprises entre 10 et 20 μm (F1, 2 et 4). Dans le delta du Rhône, la classe modale est à 8 μm . Si l'on prend le lac dans son ensemble, on trouve encore un pic dans les fractions $> 51 \mu\text{m}$. Il semble donc y avoir deux "types" de matière organique particulière, l'un à $> 50 \mu\text{m}$, formé de débris ligneux et de carapaces de micro-crustacés, et l'autre entre 20 et 6 μm , constitué probablement de restes de phytoplancton.



4.2.4. Information fournie par les rayons X

Un échantillon-type de chaque faciès a été analysé par diffraction X, et les minéraux suivants ont été mis en évidence: quartz, albite, muscovite, chlorite, illite, kaolinite, calcite et dolomite.

La comparaison visuelle des diagrammes a permis de dégager quelques tendances dans les proportions relatives des différents minéraux. Le faciès le plus riche en quartz et en dolomite est F3 (Dranse). Ce dernier minéral est identifiable également dans les faciès 4 et 11 (Plaine centrale), indiquant une origine alpine. Les feldspaths et la muscovite sont à un maximum dans le delta du Rhône (F5), et à un minimum dans celui de la Dranse. Ces résultats corroborent parfaitement ceux qui ont été obtenus sur la base des éléments majeurs.

En ce qui concerne le cortège des minéraux argileux, il ne varie pratiquement pas d'un faciès à l'autre. En moyenne, l'illite représente 66%, la chlorite 22% et la kaolinite 12%. Seul le delta de la Dranse présente une proportion de chlorite un peu plus élevée (27%), et des traces de montmorillonite.

A nouveau, ces données confirment les analyses faites par EDAX sur la fraction argileuse. Elles recoupent aussi le spectre des minéraux argileux mis en évidence par VERNET et PARENT (1970) dans une carotte du Petit-Lac.

4.3. Eléments-trace

4.3.1. Relations avec les supports sédimentaires

Ces relations ont été établies d'une part sur la base de diagrammes d'ordination (Fig. 6), représentation graphique bidimensionnelle de la matrice des coefficients de corrélation entre variables (DAVAUD, 1976a), et d'autre part, à l'aide des profils de corrélation entre éléments et classes granulométriques (4.2.3., Fig. 5, 7 et 8).

Sur la base des données minéralogiques discutées plus haut, les éléments majeurs peuvent être considérés comme représentant les supports sédimentaires potentiels suivants:

- 1) Carbonate de calcium (Ca)
- 2) Matière organique (C org., N)
- 3) Phosphates (P tot.)
- 4) Silicates, eux-mêmes subdivisibles en: feldspaths, micas et argiles (Si, Al, Fe, K, Na et Mg)
- 5) Oxydes de fer (Fe)

On remarque en outre, sur les diagrammes d'ordination, les variables "bathymétrie" et "diamètre moyen des particules". Ces paramètres ont une influence sur certains éléments majeurs ou en traces, car ils représentent une intégration des processus physiques (hydrodynamisme) à l'oeuvre dans le milieu lacustre.

4.3.1.1. Ensemble du lac

Quatre supports ressortent du diagramme d'ordination, ainsi que les traces qui leur sont associées, ce qui permet de confirmer et de préciser les affinités géochimiques mises en évidence au cours des travaux antérieurs (DAVAUD et al., 1977; RAPIN et al., 1978):

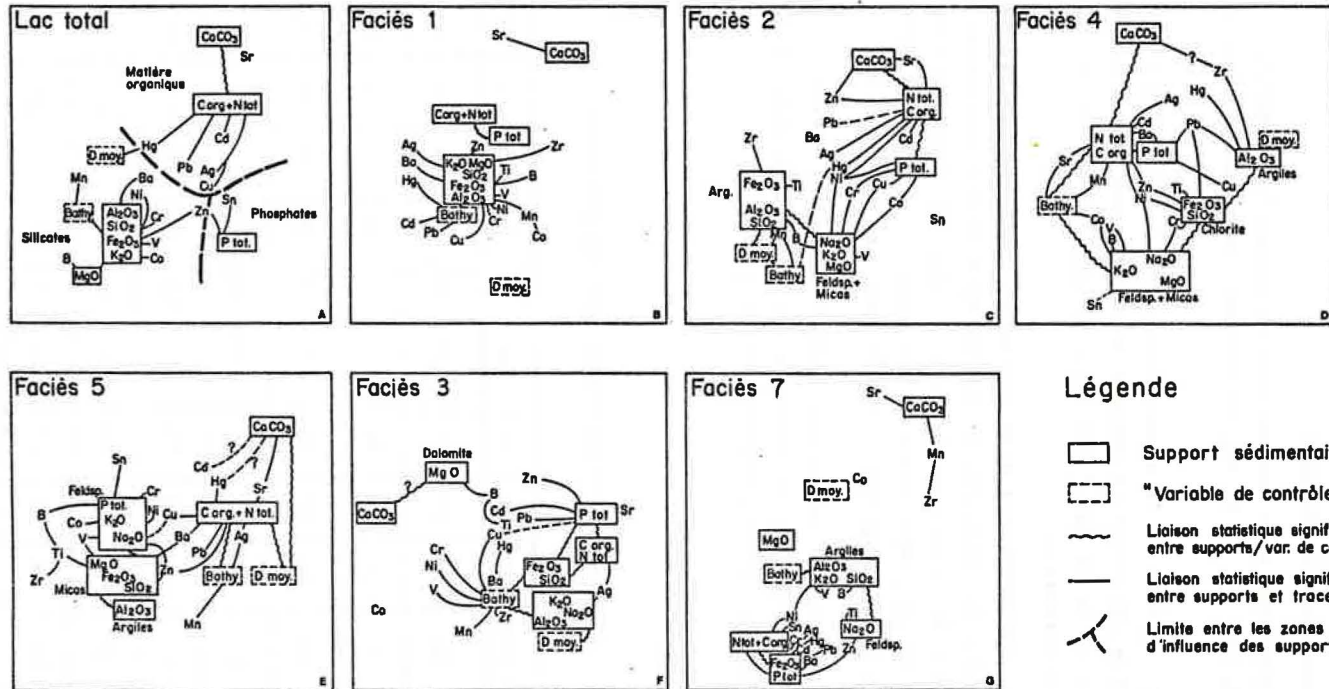
- CaCO_3 , auquel se lie Sr seul
- Matière organique avec son cortège de traces "organophiles" (JAQUET et al., 1978): Cd, Cu, Pb, Ag et Hg, ce dernier étant aussi influencé par la bathymétrie;
- Phosphore: du fait de la nature composite du paramètre P tot., cet élément ne se révèle pas comme un support très net. Les traces qui lui sont associées le sont parce que P est lié, quoique faiblement, à la matière organique et aux silicates.
- Silicates: contrairement à ce qui apparaîtra dans les faciès pris séparément, ce pôle est compact, et il est malaisé d'y distinguer les divers minéraux. Seul MgO s'en éloigne quelque peu, qui représente non seulement biotite et chlorite, mais aussi la dolomite. Autour des silicates se regroupent les traces dites "argilophiles", Ba, Ni, Cr, Co, V et B.

Certains éléments "hésitent" entre ces pôles (Sn, Zn) et Mn est contrôlé essentiellement par la bathymétrie, qui exprime ici les conditions redox à l'interface eau-sédiment (JAQUET et al., 1982b, NEMBRINI et al., 1982).

Table 7 - Valeur moyenne des éléments-trace par faciès (ppm)

Faciès	Mn	Fe/Mn	V	Bi	Ni	Hg	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd	Ag	Ba	Sr
1 Petit Lac	506	38	49	40	56	0,38	50	37	97	89	0,97	0,3	551	123
2 Moy. Lac	1006	27	78	58	84	0,86	67	60	119	121	0,97	0,7	691	908
3 Oranse	1222	26	76	89	60	0,39	39	39	77	96	0,78	0,5	528	916
4 Côte N.	1410	27	101	65	106	1,19	74	72	126	148	1,06	1,0	760	813
5 Rhône	932	38	126	84	94	0,44	54	45	120	148	0,54	0,4	698	752
6 Plaine	2738	12	97	95	84	0,65	51	52	95	124	0,97	0,5	629	826
7 Vidy	749	23	69	62	77	1,0	275	253	371	205	3,46	12,7	1123	899
Lac tot.	1188	29	90	67	87	0,79	63	58	115	129	0,93	0,7	682	916

Figure 6 - Expression bi-dimensionnelle des relations entre les supports sédimentaires et les éléments-trace pour les différents faciès (diagrammes d'ordination)



En comparant les "profils" des figures 5, 7 et 8 (dernière ligne), on remarque que ces associations entre support et trace sont confirmées, le plus souvent, par leur "appartenance" à une ou plusieurs fractions granulométriques communes. Ainsi, Sr associé à Ca tombe aussi dans les fractions entre 10 et 20 μ . De même, la bimodalité du profil de C org. (Fig. 5f) se retrouve dans les traces organophiles (Cd et Cu). Enfin, V et B (Fig. 8 d-e) tombent dans les mêmes fractions que K_2O (Fig. 5b), alors que Ni, Cr, Co et Mn (Fig. 8 a-c) se concentrent dans les fractions $< 6 \mu$ exclusivement, comme Al_2O_3 (Fig. 5a) qui représente les argiles.

La variabilité minéralogique relativement grandes des sédiments du Léman, couplée à la multitude des sources externes de métaux lourds, laisse présager une variabilité concomitante des relations entre supports et traces. Aussi l'image générale et moyenne fournie par l'ensemble du lac doit-elle être précisée par l'examen des faciès pris séparément.

4.3.1.2. Faciès 1 (Petit Lac)

La structure de corrélation exprimée par la Fig. 6b est simple. A part l'association $CaCO_3$ -Sr, la quasi-totalité des traces est liée aux silicates, qui forment un pôle compact, impossible à subdiviser. Cette association est confirmée par la granulométrie (Fig. 5a et b, 7 et 8), qui indique en outre qu'il ne s'agirait pas d'argiles, mais plutôt de micas et de feldspaths.

La bathymétrie contrôle directement l'abondance des silicates et indirectement, donc, celle de la plupart des traces. En revanche, la matière organique ne semble pas jouer le rôle de support dans le Petit-Lac, ce qui pourrait être dû à son caractère autochtone (rapport C/N relativement petit (Fig. 5f)).

4.3.1.3. Faciès 2 (Moyen Lac)

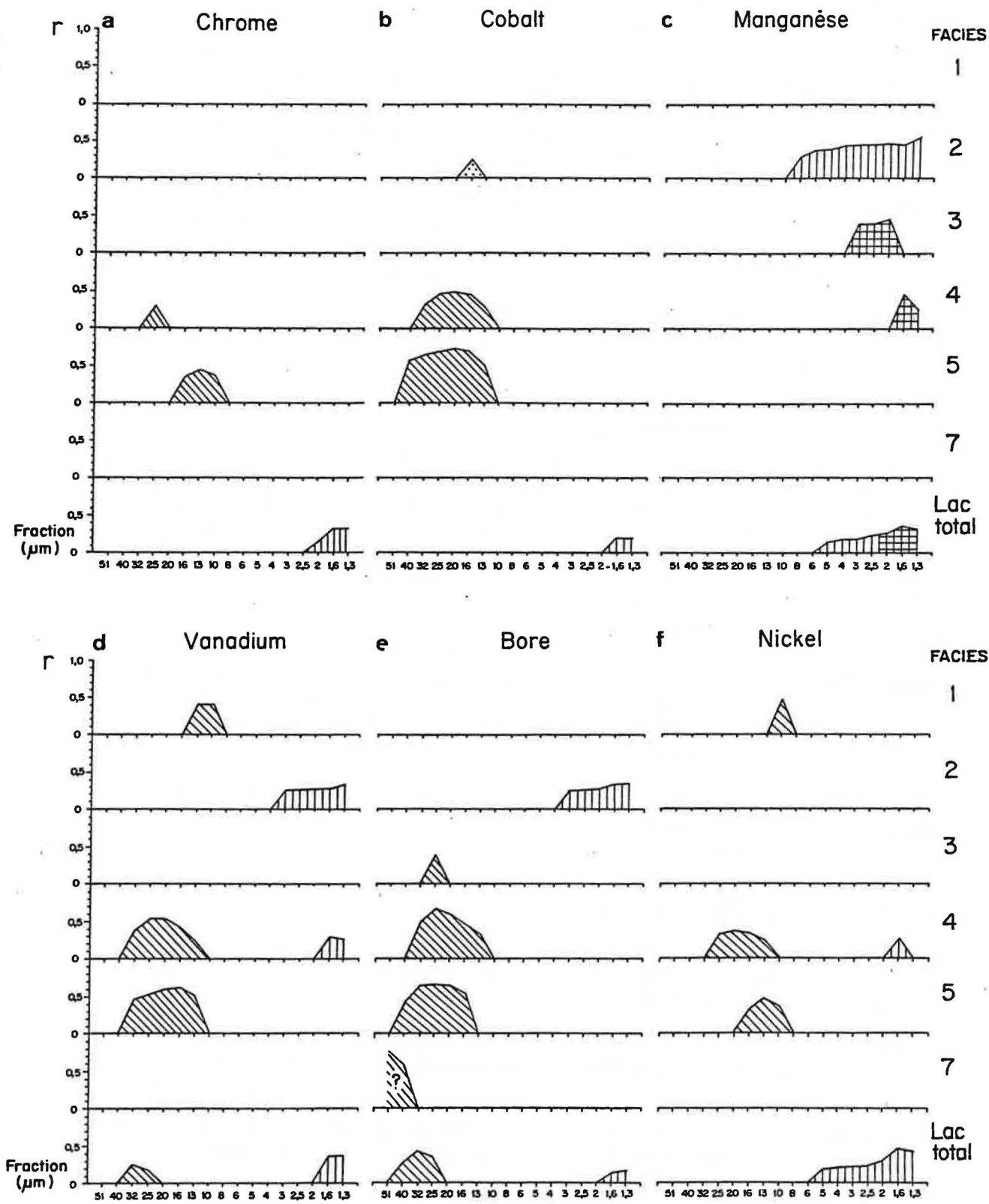
Quatre supports s'y distinguent clairement (Fig. 6c): le carbonate, la matière organique et son satellite, le phosphore, les argiles et les feldspaths + micas + chlorite (?). On remarquera que carbonate et matière organique sont corrélés et qu'ils tombent dans la même fraction granulométrique, 10-20 μ m (Fig. 5e-f), de même qu'argiles et micas. Le contrôle bathymétrique sur la granulométrie et les silicates est bien marqué.

Le carbonate ne fixe que Sr, à une granulométrie dominante de 15 μ m, caractéristique de la calcite précipitée.

A la matière organique sont associés directement (granulométrie 10-20 μ m) Zn, Pb, Ag, Hg et Cd, et indirectement ou plus faiblement Cr, Ni et Co. Ces derniers éléments semblent fixés aussi aux micas en plus des argilophiles typiques B et V. Cu est associé à C org., mais aussi à P total qui semble en bonne partie organique au sein du faciès 2 (JAQUET, 1978). Enfin, les argiles s'entourent de Zr, Ti, Mn et B.

A la différence du Petit-Lac, la matière organique prend ici de l'importance comme support, entrant en "compétition" avec les silicates.

Figure 8 - Relation entre la granulométrie et les éléments-trace argilophiles, exprimée par le coefficient de corrélation r



4.3.1.4. Faciès 4 (Côte Nord Grand Lac)

Il correspond, rappelons-le, à des sédiments influencés par les apports rhodaniens distaux et par l'activité humaine de la côte Nord du lac. Le diagramme d'ordination (Fig. 6d) est caractérisé par la différenciation nette des supports silicatés, déjà amorcée au sein du faciès 2: kaolinite et illite (Al_2O_3), chlorite et oxydes de fer (Fe_2O_3 , SiO_2), micas et feldspaths (Na, K, Mg). On note aussi la persistance de l'association matière organique-phosphore. Enfin, la bathymétrie influence Mn, Sr et Co.

Le carbonate ne contrôle plus Sr, lié ici à la matière organique, donc probablement d'origine anthropogénique. Les argiles servent de support à Zr, Hg et Pb; la chlorite à Ni, Cr, Zn, Ti et Pb, tandis que les micas s'entourent de Sn, Co, B, V et Ni. Enfin, la matière organique est toujours associée aux traces organophiles typiques.

Là encore, ces associations sont confirmées par les profils granulométriques (Fig. 5, 7 et 8). En particulier, l'anticorrélation de K_2O et Al_2O_3 s'explique par leur association à des fractions granulométriques différentes.

4.3.1.5. Faciès 5 (Delta du Rhône)

Dans ces sédiments directement influencés par les apports du Rhône, les silicates sont constitués surtout, on l'a vu, de feldspaths et micas. On distingue le pôle des phosphates sous forme d'apatite détritique (JAQUET, 1978), et entouré de Sn, Ni, Cr, B, Co et V. Les micas (Mg, Fe) supportent Ti, Zr, V, Co, Zn et Ba. Quant au pôle des argiles, il est très mal défini (Al_2O_3) (Fig. 5a) et ne semble fixer aucune trace.

Les organophiles Cd, Ag, Pb, Ba, Zn et Cu, avec Hg en plus, sont très nettement associés à la matière organique. CaCO_3 constitue dans ce faciès une partie de la fraction détritique fine (Fig. 5d) et ne fixe que Sr. La possibilité d'une association (coprécipitation) entre le carbonate et Cd et Hg, postulée initialement par DAVAUD et al. (1977), n'est pas confirmée, la corrélation entre lesdits supports et éléments n'étant pas significative.

Enfin, la forte corrélation entre Mn et bathymétrie s'explique aisément par la sensibilité de ce métal aux conditions redox, elles-mêmes fonction de la profondeur (JAQUET et al., 1982b).

4.3.1.6. Faciès 3 (Delta de la Dranse)

Les sédiments du delta de la Dranse sont caractérisés, on l'a vu, par un rapport quartz/silicates élevé, la quasi-absence de feldspaths et la relative abondance des calcaires dolomitiques d'origine allochtone (Fig. 5d-e).

Sur la figure 6f, ressortent clairement les pôles suivants: calcaires dolomitiques; phosphates; matière organique + argiles, ces deux derniers très proches.

Les carbonates ne "fixent" ici que B, et non pas Sr, qui est totalement isolé. Ceci est un autre argument en faveur d'une origine détritique terrigène de Ca et Mg, car dans le cas du carbonate précipité in situ, Sr est toujours corrélé positivement à Ca (voir aussi SERRUYA, 1969).

A l'instar du Petit-Lac (Fl), la matière organique n'est associée directement à aucune trace, pas plus d'ailleurs que les argiles (sauf pour Ag). En revanche, le phosphore a des affinités avec Zn, Cd et Pb, éléments ordinairement organophiles. Des travaux sont en cours actuellement pour tester la présence éventuelle de carbonates mixtes de Ca et métaux lourds dans cette zone.

Outre Mn, les éléments Cu, Cr, Ni et V sont contrôlés par la bathymétrie, elle-même faiblement corrélée au pôle des argiles. Ce rôle accentué de la bathymétrie est probablement dû à l'étendue de sa variation (de 8 à 300 m!). Enfin, Hg et Ba ne sont liés directement à aucun support visible.

4.3.1.7. Faciès 7 (Baie de Vidy)

Les sédiments de la zone de Vidy sont très affectés par les apports anthropiques de la région lausannoise (Table 4). En dépit de son apparente simplicité, le diagramme d'ordination (Fig. 6g) pose un problème d'interprétation, intrinsèque d'ailleurs à la méthode statistique employée: l'agglomération de nombreuses traces autour du pôle de la matière organique implique-t-elle une liaison chimique, ou alors une simple coexistence, due à la nature même des rejets de la STEP (HÄRKANSON, 1981, p. 193)? Un élément de réponse est apporté par une analyse de spéciation, due à GARCIA et LORIS (1978), et qui confirme que Cu, en tous cas, est bien lié préférentiellement à la phase organique.

Le fer et P tot sont très fortement corrélés (0,96), ce qui s'explique par l'utilisation de FeCl_2 dans l'étage de déphosphatation de la STEP. Au sein du sédiment, ces éléments sont associés, entre autres, sous forme de vivianite et d'anapaïte (NRIAGU et DELL, 1974).

En outre, les très fortes corrélations statistiques existant entre P_{tot} et les métaux lourds postulées par DAVAUD et al. (1977) sont confirmées par l'existence de phosphates mixtes de Fe, Ca, Zn, Pb et parfois Cu, mis en évidence à la microsonde (JAQUET, 1983).

La présence de Fe et P_{tot} au sein du pôle de la matière organique s'explique par leur coexistence dans les rejets de la STEP.

Les autres pôles visibles sur le diagramme sont les feldspaths (avec Ti), les argiles (avec B et V), contrôlés par la bathymétrie, et finalement les carbonates, auxquels se lient Sr, Zr et Mn.

Cette dernière liaison est intéressante et unique dans les sédiments superficiels du Léman. Il est possible que les conditions physico-chimiques extrêmes régnant dans la zone de Vidy (production continue de méthane par exemple) permettent la formation de carbonates mixtes de Ca et Mn. L'étude détaillée des processus diagénétiques dans cette zone est en cours.

4.3.2. Evaluation de la contamination par les métaux lourds

A partir de la notion de teneur naturelle variable introduite plus haut, le calcul du taux de contamination et des index de pollution par les divers métaux lourds a permis d'évaluer l'impact des activités humaines sur le stock géochimique du lac.

Conformément à la convention utilisée dans les rapports de la CIPEL, seuls les métaux dont le C^m est égal ou supérieur à 2 sont considérés comme enrichis. Les valeurs de C^m pour les divers faciès sont reportés dans la Table 8 et la figure 9 pour l'ensemble du lac. Il en ressort les points suivants:

- le mercure est très nettement le métal le plus enrichi dans les sédiments lémaniques, avec une valeur du taux de contamination égale à 22,6 en moyenne et à 60 au maximum. Ces chiffres très élevés ne sont pas dus à une surestimation; au contraire, ils auraient plutôt tendance à rester en deçà de la réalité, la valeur C^{Hg}_{pelite} (Table 1) fixée à 50 ppb étant probablement trop haute. A titre de comparaison, C^{Hg} dans les sédiments du lac Ontario est voisin de 11 (THOMAS et JAQUET, 1976) et de 14 dans le lac Erié (KEMP et al., 1976).

Cette forte contamination est due à l'usage répandu de ce métal très mobile tant dans l'industrie pour l'électrolyse de NaCl et la fabrication de l'acétaldéhyde et du chlorure de vinyle, (BARBEN 1979), que dans les hôpitaux et les ménages (A.F.E. E., 1978; VERNET et THOMAS, 1972b; AMMANN et al., 1980). RAPIN et al. (1978) ont calculé que la couche superficielle des sédiments lémaniques (5 cm) renferme environ 35 tonnes de Hg. Bien que son taux de méthylation ne soit pas connu, son passage dans la biosphère est évident: en 1979, la concentration de Hg dans les perches était de l'ordre de 130 ppb et dans les lottes de 300 (MONOD, 1979). Rappelons que le seuil de tolérance, fixé par l'OMS, s'élève à 500 ppb.

Le mercure sédimenté dans le Léman constitue donc un danger potentiel pour la faune piscicole, ainsi que pour ses consommateurs éventuels.

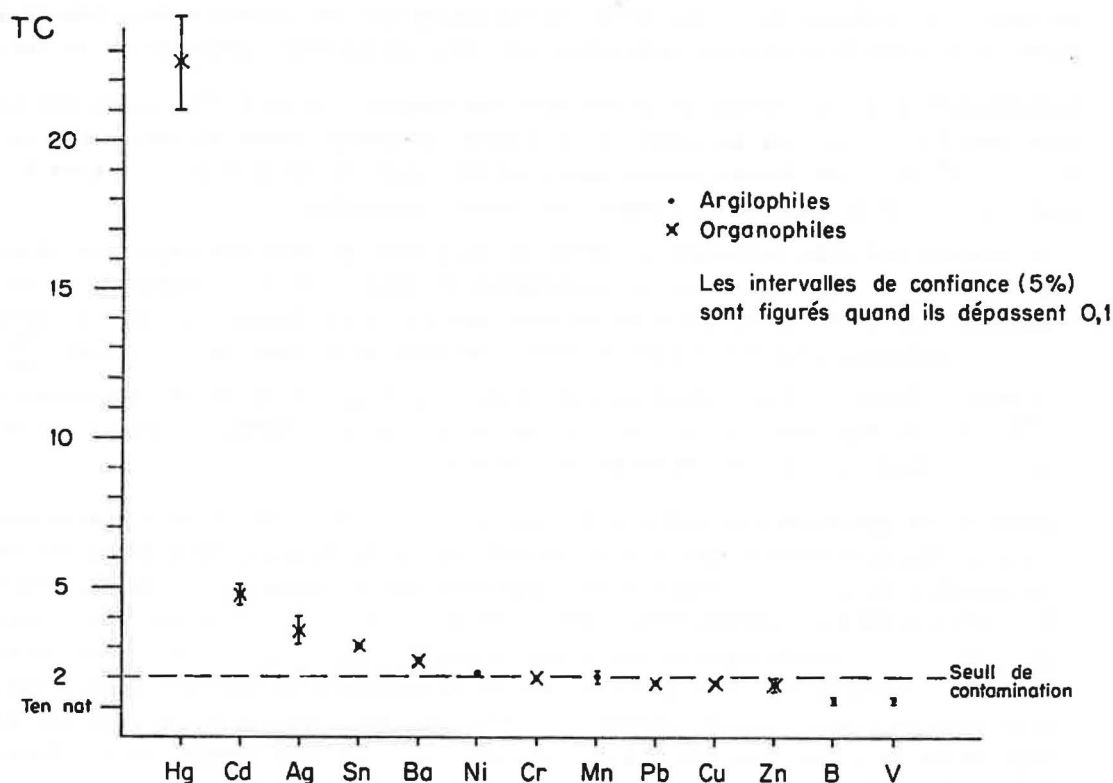
- Le cadmium et l'argent ont un C^m moyen compris entre 3 et 5, avec des valeurs maximales de 52 et 170, respectivement. Cd a une toxicité à peine inférieure à celle de Hg. Sa forte concentration dans les sédiments de certaines zones côtières (voir pl. 4c) représente, là aussi, un danger potentiel pour la santé (FRIBERG et al., 1974; LEVESQUE, 1977), d'autant plus que cet élément semble facilement remobilisable (LEUPIN, 1981).

D'après FORSTNER et WITTMANN (1979), les sources anthropogéniques de Cd sont liées principalement (a) aux industries (galvanoplastie, pigments et batteries), (b) aux engrais (Cd parfois >15 ppm), (c) au trafic routier (pneus, lubrifiants).

Ces quatre types de sources existent tous dans le bassin lémanique, ce qui explique la contamination quasi générale des sédiments par Cd.

En ce qui concerne la contamination par Ag, elle est circonscrite essentiellement autour de Lausanne (pl. 4d). Ce métal est utilisé principalement en photographie, et ses sels sont très toxiques pour les poissons (FORSTNER et WITTMANN, 1979). Une de ses formes dans le sédiment pourrait être AgI_2 , observé à la microsonde (JAQUET, 1983).

Figure 9 - Taux de contamination des éléments arrangés par ordre décroissant
(Lac total)



- l'étain est assez régulièrement enrichi au sein des divers faciès ($C^{Sn} \approx 2,5$) avec une pointe de 10 à Vidy. Les travaux de MARTOJA et al. (1977) et CHASSARD-BOUCHAUD et al. (1977, 1978) ont montré que cet élément est celui qui est le plus enrichi dans les crustacés planctoniques du Léman.

- les autres métaux tels que Ba, Ni, Cr, Pb, Cu et Zn ont un C^m voisin de 2. S'ils ne contaminent pas les sédiments du Léman de façon critique et générale, ils peuvent être anormalement concentrés dans des zones plus localisées, telles que Vidy. Bien que non négligeable, leur toxicité est moindre que celle de Hg et Cd (FORSTNER et WITTMANN, 1979). Les sources de Cr et Ni sont constituées principalement par les rejets des industries de traitement de surfaces. Il en va de même pour Zn.

Quant à Cu, il provient en partie des fongicides (vignobles) et algicides (ports).

- Les métaux argilophiles ne sont en général pas concentrés à des taux excédant deux fois la teneur naturelle. La valeur de $C^{Mn} = 4,5$ dans le faciès 6 (bordure de la Plaine centrale), reflète un processus de concentration naturelle due aux phénomènes rédox. Cette absence de contamination par les traces argilophiles reflète leur usage anthropique limité.

4.3.3. Répartition géographique des teneurs et origine des contaminations

4.3.3.1. Eléments argilophiles

Manganèse (pl. 3 a): la répartition spatiale de cet élément n'est pas influencée directement par l'activité humaine. Ses teneurs maximales correspondent à la partie de la Plaine centrale la moins exposée aux apports fluviatiles, où l'interface eau-sédiment peut devenir anoxique (CHASSAING, 1978), et où la "mangano-bactérie" *Metallogenium* sp. est la plus répandue (JAQUET et al., 1982b).

Bore (pl. 3 b): les apports de cet élément sont nettement liés aux rivières (Rhône, Dranse, Paudèze). Il est concentré dans les fractions voisines de 25 μ m (Fig. 8 e) et il est lié à MgO (biotite dans le delta du Rhône, et peut-être dolomite dans celui de la Dranse). Il est donc d'origine naturelle.

Vanadium : pl. 3 c): les seuls apports significatifs de cet élément proviennent du Rhône et éventuellement de l'Aubonne. Ils sont liés à la fraction 13-32 μ m, ensemble avec K₂O et MgO (feldspaths et micas). Là encore, cet élément est d'origine naturelle.

Ni (pl. 3 d): en contraste avec les éléments précédents, la répartition spatiale des teneurs n'indique aucun apport par le Rhône et la Dranse, mais quelques faibles sources anthropogéniques sur la côte Nord et dans la région d'Evian.

4.3.3.2. Eléments organophiles

Mercure (pl. 4 a-b): la distribution spatiale de cet élément est des plus intéressantes, surtout si l'on compare la carte de 1970 et celle de 1978.

En 1970, les gradients du TC^{Hg} indiquent nettement deux sources: (a) le Rhône valaisan, dont les sédiments sont contaminés en plusieurs points par des rejets industriels (RAPIN et VERNET, 1979) et (b), la région de Nyon, où les rejets mercuriels proviennent d'une industrie pharmaceutique (VIEL et VERNET, 1979). A partir de ces zones, les auréoles de pollution sont bien visibles.

En 1978, la zone contaminée du delta s'est "déplacée" vers l'Ouest, et celle de Nyon s'est légèrement atténuée. Ces contrastes peuvent être attribués à plusieurs causes possibles: (a) une diminution considérable des rejets dans le Rhône, dès 1974 déjà, mise en évidence par RAPIN et VERNET (1979); (b) un lent déplacement des sédiments vers l'Ouest, suivant les courants majeurs (BAUER et GRAF, 1978); (c) un accroissement des rejets dans la région lausannoise. Cette hypothèse serait plutôt démentie par la constance de TC^{Hg} dans la zone de Vidy entre 1976 et 1978 (JAQUET et al., 1979); (d) une diminution des rejets dans la région de Nyon, constatée déjà dans l'Asse (VIEL et VERNET, 1979).

Cadmium (pl. 4 c): la mise en évidence des points de rejet de ce métal est aisée: le principal provient de la région lausannoise via la STEP de Vidy, avec deux apports secondaires par la Venoge (VIEL et VERNET, 1979) et le Boiron. Sur la côte française, les zones urbaines de Thonon et Evian ont des TC $\approx$ 7. Quant à l'enrichissement constaté dans la partie médiane du Petit Lac, son origine demeure inexpliquée.

Argent (pl. 4 d) : cette contamination a son origine dans la région de Morges-Lausanne, et rayonne depuis Vidy. Le halo de dispersion, très clair, s'étend en deux lobes vers l'Est et l'Ouest, séparés par la partie distale du delta de la Dranse.

Plomb (pl. 4 e) : à part une faible source vers Evian, l'essentiel des apports anthropogéniques de Pb provient de la zone comprise entre Pully et St-Prex, avec un maximum à Vidy. L'auréole contaminée s'étend ensuite vers le Petit Lac, suivant la direction du transport sédimentaire prédominant. Notons que les deltas n'apparaissent pas, sur cette carte, comme des anomalies négatives par rapport au reste du lac. Cela pourrait être dû à l'ubiquité du plomb provenant des carburants.

Zinc (pl. 4 f) : là encore, la source principale est à Vidy, avec d'autres points de rejets moins importants au voisinage d'autres localités. Le minimum de contamination constaté dans la Plaine centrale est intéressant à noter : il correspond à la zone la plus souvent anoxique, où le flux de P, Mn et Zn du sédiment vers l'eau est le plus important (JAQUET et al., 1982b).

Cuivre (pl. 4 g) : les zones d'apport de ce métal sont extrêmement nettes : à Vidy et à Morges, Cu est d'origine industrielle, alors que vers la Côte, il provient essentiellement des fongicides utilisés en viticulture.

Chrome (pl. 4 h) : sur une valeur régionale du C^m assez uniforme (1,5 à 2,5), ne ressortent clairement que deux zones d'apport : Vidy et Evian. Comme pour le nickel (pl. 3 d), dont la répartition est analogue, la contamination est peu marquée.

Table 9 - Index de pollution (IP) par faciès en 1978

Faciès	Mercure	Eléments		Total
		organoph.	argiloph.	
1 Petit Lac	15,0	2,9	1,2	3,2
2 Moy. Lac	26,7	2,8	1,4	4,0
3 Dranse	11,4	2,0	1,4	2,5
4 Côte N	31,7	2,8	1,6	4,4
5 Rhône	10,6	1,8	1,4	2,3
6 Plaine	18,0	2,2	2,1	3,3
7 Vidy	27,9	13,7	1,3	10,3
Lac total	22,6	2,6	1,5	3,6

4.3.3.3. Index de pollution

L'information fournie par les cartes des TC^m peut être synthétisée au moyen des index de pollution, qui résument en un chiffre le degré de la contamination polymétallique dans les différents faciès ou zones (Table 9, Fig. 10 et 11).

On y remarque clairement l'influence prépondérante de la région lausannoise sur la contamination des sédiments.

Figure 10 - Valeur des Index de Pollution pour les différents faciès

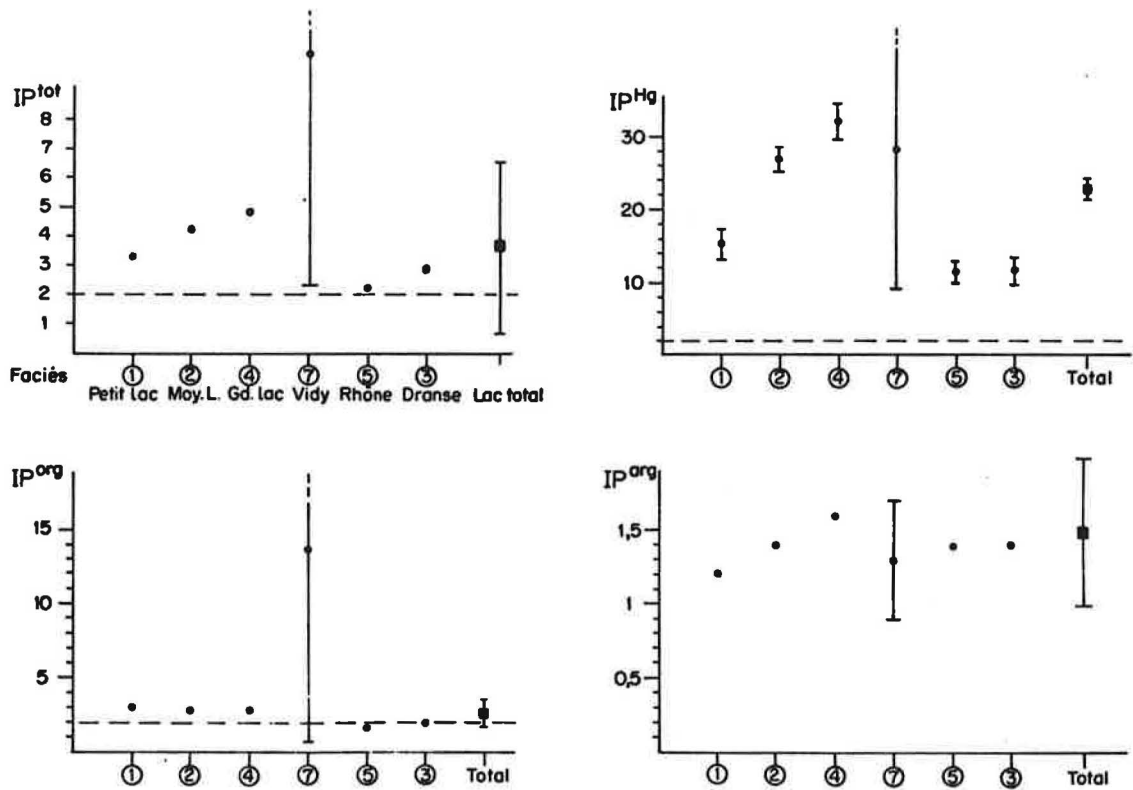
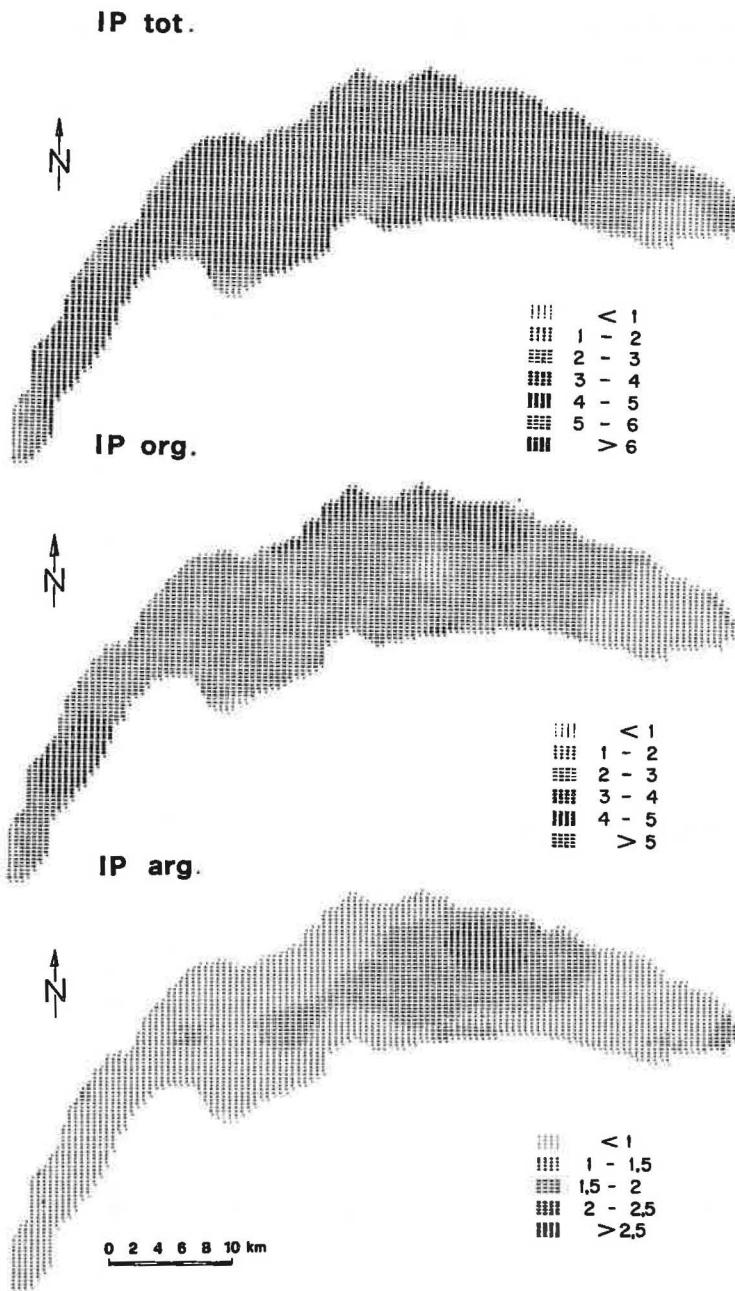


Figure 11 - Variation géographique des Index de pollution



5. C O N C L U S I O N S

Les sédiments du Léman sont caractérisés par la coexistence, en proportions variables, de deux phases, l'une autochtone (calcite et détritiques d'origine planctonique), l'autre allochtone, silicatée et calcaréo-dolomitique, provenant principalement du Rhône et de la Dranse.

Un emploi intensif, quoique prudent, des méthodes d'analyse multivariée a permis de subdiviser le lac en 6 faciès géochimiques principaux, qui reflètent bien ce caractère mixte de la sédimentation.

A l'intérieur de ces faciès, la structure de corrélation des éléments majeurs, de leurs rapports et de la granulométrie, a été déchiffrée et interprétée en termes de la minéralogie du sédiment.

On sait le rôle fondamental joué par les composants majeurs du sédiment (minéraux, matière organique) dans la géochimie des traces. Cette notion de support sédimentaire a permis de subdiviser les traces en éléments argilophiles (Mn, Ni, Co, V et B) et organophiles (Pb, Cu, Zn, Cr, Cd, Sn, Ba, Ag, Hg), sur la base de l'analyse statistique, mais avec confirmation par d'autres méthodes (spéciation, microanalyse).

Alors que l'activité humaine a une influence faible, sinon nulle, sur la géochimie des éléments majeurs, il n'en va pas de même en ce qui concerne les traces: les déversements d'eaux usées en provenance du bassin versant peuvent non seulement augmenter fortement les concentrations en métaux-trace, mais aussi modifier les relations entre supports et traces.

Outre les silicates et la matière organique, les phosphates se sont confirmés comme étant des supports sédimentaires importants, surtout dans les zones très contaminées, comme la baie de Vidy.

Pour évaluer aussi objectivement que possible l'influence anthropique, l'on introduit les notions de taux de contamination et d'index de pollution. Ces paramètres sont fonction de la teneur analysée en élément-trace, mais aussi de la teneur naturelle, elle-même fonction de la composition minéralogique.

Les cartes de répartition des taux de contamination révèlent que les éléments argilophiles sont apportés par les rivières et qu'ils échappent à l'influence humaine: ($TC \approx 2$). En revanche, Hg ($TC = 22,6$), Cd ($TC = 4,6$) et Ag ($TC = 3,5$), ainsi que les autres éléments organophiles, sont notablement enrichis par rapport à la teneur naturelle, et sont clairement d'origine humaine.

La pollution mercurielle a évolué entre 1970 et 1980, les apports dus au Rhône valaisan diminuant au profit de ceux de la côte vaudoise. En revanche, les teneurs moyennes pour tout le lac sont pratiquement les mêmes.

Les régions du lac les plus contaminées par les métaux lourds sont situées sur la côte Nord. A Vidy, l'index de pollution totale atteint 10,3. Pour l'ensemble du lac, il vaut 3,6, ce qui montre combien l'activité humaine affecte le plus grand lac d'Europe.

B I B L I O G R A P H I E

Abréviation : CIPEL = Commission internationale pour la protection des eaux du Léman contre la pollution, Lausanne

AMMANN, P., SCHWEIZER, C., WYSS, C. & KISLIG, F. (1980): Bilan des métaux lourds dans le bassin versant d'une station d'épuration. Inst. Génie Envir. EPF Lausanne, 34 p.

Association Française pour l'Etude des Eaux (AFEE) (1978): Les micropolluants minéraux dans les eaux superficielles continentales No 1: le mercure. Paris, 103 p.

BARBEN, H. (1979): Rapport sur l'état de la charge mercurielle du Rhône et des mesures d'assainissement prises dans deux entreprises utilisant du mercure en Valais. Office Féd. Prot. Envir., 13 p.

BAUER, S. & GRAF, W.H. (1978): Wind induced water circulation of Lake Geneva. Proc. 10th Int. Liège Colloq. on Ocean Hydrodyn., 15 p.

BETEKHTINE, A. (1968): Manuel de minéralogie descriptive. Ed. Mir, Moscou, 735 p.

BURKARD, P. (1978): Etude des affluents du lac Léman et de son émissaire entre Genève et Chancy. Rapport CIPEL: 187-249.

CHASSAING, B. (1978): Etude de l'interface eau-sédiment du Lac Léman. Rapport CIPEL : 327-331.

CHASSARD-BOUCHEAU, C., BALVAY, G. & KLEINBAUER, F. (1977): Pollution du Lac Léman. Mise en évidence d'une accumulation d'étain par les crustacés planctoniques. Premières données obtenues par spectrographie des rayons X. C.R. Acad. Sc. Paris, 285 (I): D113-D116.

CHASSARD-BOUCHEAU, C. & BALVAY, G. (1978): Application of electron probe x-ray microanalysis to the detection of metal pollutants in freshwater zooplankton. Microsc. Acta, suppl. 2. Hirzel, Stuttgart; 185-192.

DAMIANI, V. (1974): Distribution of organic carbon and organic nitrogen in the surface sediments of Isola Borromee basin (Lago Maggiore, N. Italy). Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 31: 45-60.

DAVAUD, E. (1976a): Etude géochimique et granulométrique des vases lacustres récentes. Thèse no 1745, Univ. Genève, 129 p.

DAVAUD, E. (1976b): L'analyse minéralogique quantitative des roches sédimentaires: Nouvelle méthode de dosage basée sur la composition chimique des échantillons. Eclog. Geol. Helv., 69 (I): 163-175.

DAVAUD, E. & JAQUET, J.-M. (1977): Description du système de gestion et de traitement des données physico-chimiques et bactériologiques de la CIPEL. Rapport informatif CIPEL no 3, 17 p.

DAVAUD, E., RAPIN, F. & VERNET, J.-P. (1977): Contamination des sédiments côtiers par les métaux lourds. Rapport CIPEL: 189-211.

DEER, W.A., HOWIE, R.A. & ZUSSMANN, J. (1962): Rockforming minerals, Vol. 1-5, Clowes & Sons, Londres.

- DUSSART, B. (1966): Limnologie: l'étude des eaux continentales. Gauthier-Villars, Paris, 677 p.
- FAVARGER, P.-Y. & VERNET, J.-P. (1979): L'isotope ^{137}Cs utilisé comme dateur de la pollution des sédiments lacustres. Arch. Sc. Genève, 32 (1): 25-42.
- FOERSTNER, U. & WITTMANN, G.T.W. (1979): Metal pollution in the aquatic environment. Springer, Berlin, 486 p.
- FRIBERG, L., PISCATOR, M., NORDBERG, G. KJELLSTROEM, F. (1974): Cadmium in the environment. CRC Press, Cleveland, 248 p.
- FROIDEVAUX, R., JAQUET, J.-M. & THOMAS, R.L. (1976): AGCL, a FORTRAN IV program for agglomerative, non-hierarchical classification of large data sets. Comput. & Geosc. 3: 31-48.
- GARCIA, J. & LORIS, Z. (1978): Technique de lessivage sélectif pour l'extraction et le dosage de métaux traces dans les sédiments. Travail de diplôme, Dépt. Chimie analyt., Univ. Genève, 10 p.
- HÄKANSON, L. (1981): Lake sediments in aquatic pollution control programs; principles, processes and practical examples. Rap. no 1398, Swedish Environm. Prot. Board, 242 p. Résumé anglais.
- HUBERT, P. (1971): Etude par le tritium de la dynamique des eaux du Lac Léman. Apport du tritium à la limnologie physique. Thèse, Univ. Paris, 149 p.
- JAQUET, J.-M. (1978): Formes du phosphore dans les sédiments lémaniques en 1978. Rapp. CIPEL: 310-326.
- JAQUET, J.-M. (1983): Heavy-metal phosphates in contaminated sediments of Lac Léman (Switzerland). A paraître dans Envir. Tech. Letters.
- JAQUET, J.-M., VERNET, J.-P. & FERRARI, J.-P. (1971): Détermination quantitative par volumétrie de la calcite et de la dolomite dans les roches. Arch. Sciences (Genève), 24 (2): 259-284.
- JAQUET, J.-M., FROIDEVAUX, R. & VERNET, J.-P. (1975a): Comparaison of automatic classification methods applied to lake geochemical samples. Mathem. Geol. 7 (3): 237-266.
- JAQUET, J.-M., VERNET, J.-P. & THOMAS, R. (1975b): Etude granulométrique des sédiments du Lac Léman. Proc. 9th Int. Sedim. Congress, Nice, tome 3.
- JAQUET, J.-M. & VERNET, J.-P. (1976): Pollution des zones côtières du Léman par les métaux lourds. Rapport CIPEL: 283-311.
- JAQUET, J.-M., DAVAUD, E. & VERNET, J.-P. (1978): Impact des rejets des stations d'épuration sur les sédiments côtiers du Léman. Coll. Lacs Naturels, Soc. Franç. Limnol., Chambéry: 134-155.

- JAQUET, J.-M., BARDE, B., CACHELIN, M.-F. & ROCHAT, G. (1979): Pollution des sédiments par les métaux lourds dans la zone de Nyon, Rolle, Morges, Vidy et du delta du Rhône en 1979. Rapport CIPEL: 247-264.
- JAQUET, J.-M., DAVAUD, E., RAPIN, F. & VERNET, J.-P. (1982a): Basic concepts and associated statistical methodology in the geochemical study of lake sediments. Proc. 2nd Int. Symp. Interact. betw. sedim. and freshwat., Junk, Amsterdam (Hydrobiologia 91:139-146).
- JAQUET, J.-M., NEMBRINI, G., GARCIA, J. & VERNET, J.-P. (1982b): The manganese cycle in Lac Léman (Switzerland): the role of Metallogenium. Proc. 2nd Int. Symp. Interact. betw. sedim. and freshwat., Junk, Amsterdam (Hydrobiologia 91:323-340).
- JAQUET, J.-M., VERNET, J.-P., FAVARGER, P.-Y. & ULDRY, A. (1983): Production, transformation et sédimentation de la matière particulaire dans le Léman. Manusc. à paraître à la Revue suisse d'Hydrol.
- JONES, B.F. & BOWSER, C.J. (1978): The mineralogy and related chemistry of lake sediments. In: LERMAN, A. édit. Lakes; Chemistry, Geology, Physics. Springer, New-York: 179-236.
- JOUKOWSKY, E. & BUFFLE, J. (1938): Etude sur la partie occidentale du Lac de Genève III. Constitution physique et chimique des sédiments du Lac de Genève. Mém. SPHN Genève, 41 (4): 415-466.
- KEMP, A.L.W., THOMAS, R.L., DELL, C. & JAQUET, J.-M. (1976): Cultural impact on the geochemistry of sediments in Lake Erie. Jour. Fish. Res. Bd. Canada, 33 (3): 440-462.
- KRISHNASWAMY, D.L., MARTIN, J.M. & MEYBECK, M. (1971): Geochronology of lake sediments. Earth Plan. Sc. lett. 11: 407-414.
- LEUPIN, P. (1981): Complexation du plomb et du cadmium d'un sédiment du Léman par l'acide nitrilotriacétique (NTA). Travail de stage, Institut Forel, Univ. de Genève, 35 p.
- LEVESQUE, L. (1977): Le Zinc-Le Cadmium. Les micropolluants minéraux dans les eaux continentales, rapp. no 4, Assoc. Franç. Etude des Eaux, 30 p.
- MARTOJA, R., MARTOJA, M., BALLAN-DUFRANCAIS, C., JEANTET, A.-Y., LHONORE, D., LHONORE J. & TRUCHET, M. (1977): Incidence de la pollution sur la faune du Léman: données préliminaires sur l'accumulation d'étain par divers Invertébrés. C.R. Acad. Sc. Paris, 284: D2027-2029.
- MEYBECK, M. (1970): Bilan hydrochimique et géochimique du Lac Léman. Thèse, Centre Rech. Géod. Thonon, 245 p.
- MONOD, R. (1972): Evolution physico-chimique des eaux du Léman. Rapp. CIPEL: 11-110.
- MONOD, R. (1978): Evolution physico-chimique des eaux du Léman en 1977. Rapport CIPEL: 11-82.
- MONOD, R. (1979): Recherche du mercure et autres substances toxiques dans la faune piscicole. Rapport CIPEL: 209-217.

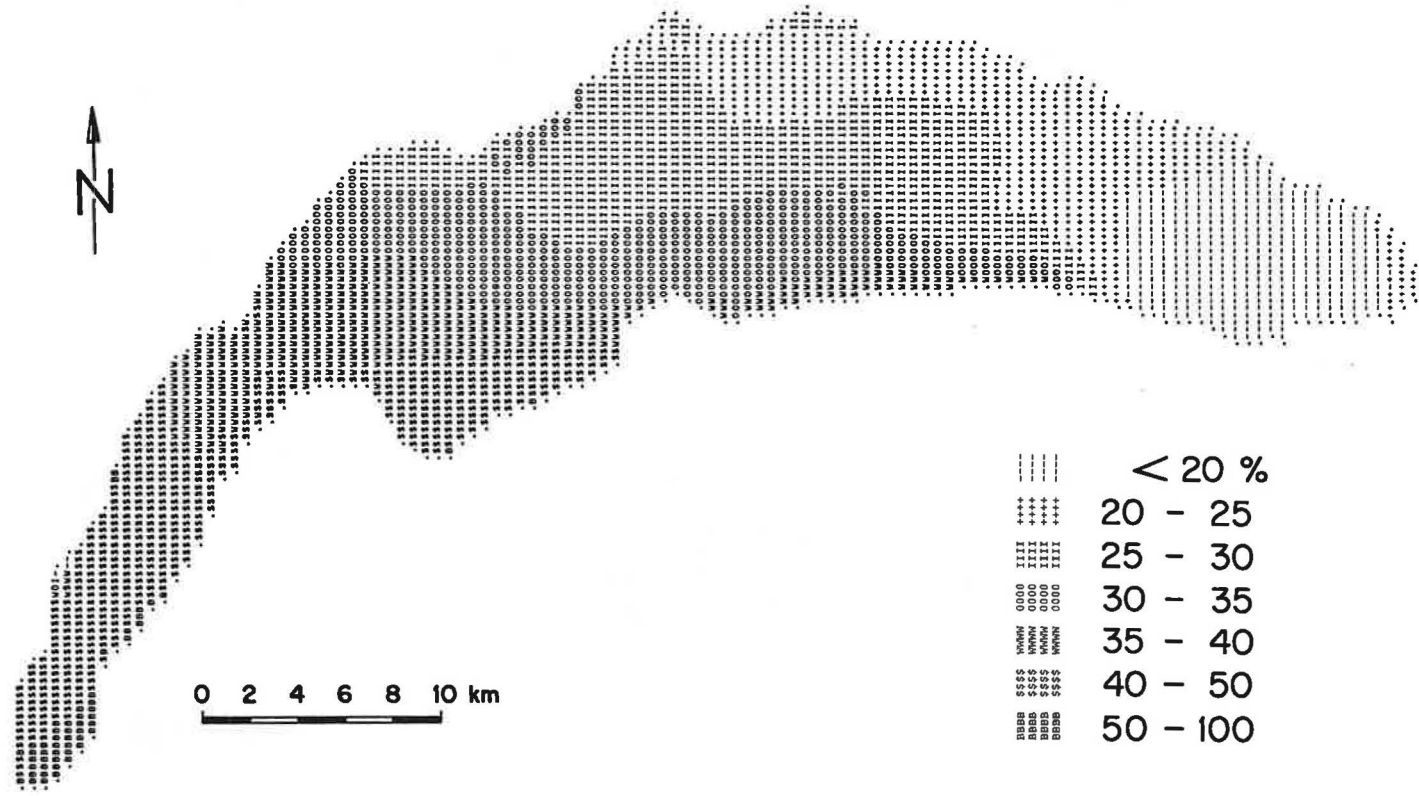
- NEMBRINI, G., CAPOBIANCO, J., GARCIA, J. & JAQUET, J.-M. (1982): Interaction between interstitial water and sediment in two cores of Lac Léman (Switzerland). Proc. 2nd Int. Symp. Interact. betw. sedim. and freshw., Junk, Amsterdam (Hydrobiologia 92: 363-375).
- NRIAGU, J.O. & DELL, C. (1974): Diagenetic formation of iron phosphates in recent lake sediments. Amer. Miner., 59: 934-946.
- PELLETIER, J. (1978): Evaluation de la production primaire ou production organique dans le Léman. Rapport CIPEL: 169-174.
- RAPIN, F., DAVAUD, E. & VERNET, J.-P. (1978): Etude générale de la pollution des sédiments du Léman. Rapport CIPEL: 294-309.
- RAPIN, F. & VERNET, J.-P. (1979): Etude de la pollution des sédiments du Léman et du bassin du Rhône. Partie A2: le Rhône amont et ses affluents. Rapport CIPEL: 234-246.
- RAPIN, F. (1980): Les sédiments des baies de Nice et de Villefranche-sur-Mer (Méditerranée, France): Etude sédimentologique et géochimique. Thèse Univ. Genève, 139 p.
- RIBORDY, E. (1974): Etude de trois sondages dans le Petit Lac. Travail de diplôme, Dépt. Géologie, Univ. Genève, 60 p.
- ROMIEUX, J. (1930): Les carbonates dans les sédiments du Lac de Genève. Thèse (No 875), Univ. Genève, 30 p.
- SERRUYA, C. (1969): Les dépôts du Lac Léman en relation avec l'évolution du bassin sédimentaire et les caractères du milieu lacustre. Thèse Univ. de Genève, 254 p.
- TESSIER, A., CAMPBELL, P. & BISSON, M. (1979): Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Anal. Chem., 51: 844-851.
- TUREKIAN, K. & WEDEPOHL, K. (1961): Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. Geol. Soc. Amer. Bull., 72: 175-192.
- THOMAS, R.L. & JAQUET, J.-M. (1976): Mercury in the surficial sediments of Lake Erie. Jour. Fish. Res. Bd. Canada, 33 (3): 404-412.
- VERNET, J.-P. & PARENT, C. (1970): Limnologie physique du Léman 1: Etude des sédiments de la fosse de Nernier. C.R. séances Soc. Phys. Hist. Nat. Genève, 5 (2-3): 205-215.
- VERNET, J.-P., MEYBECK, M., PACHOUD, A. & SCOLARI, G. (1971): Le Léman, une synthèse bibliographique: géologie, structure, sédimentation, hydrologie. Bull. BRGM, sect- IV no 2: 47-84.
- VERNET, J.-P. & THOMAS, R.L. (1972a): The occurrence and distribution of mercury in the sediments of the Petit Lac (Western Lake Geneva). Eclog. Geol. Helv., 65 (2): 307-316.

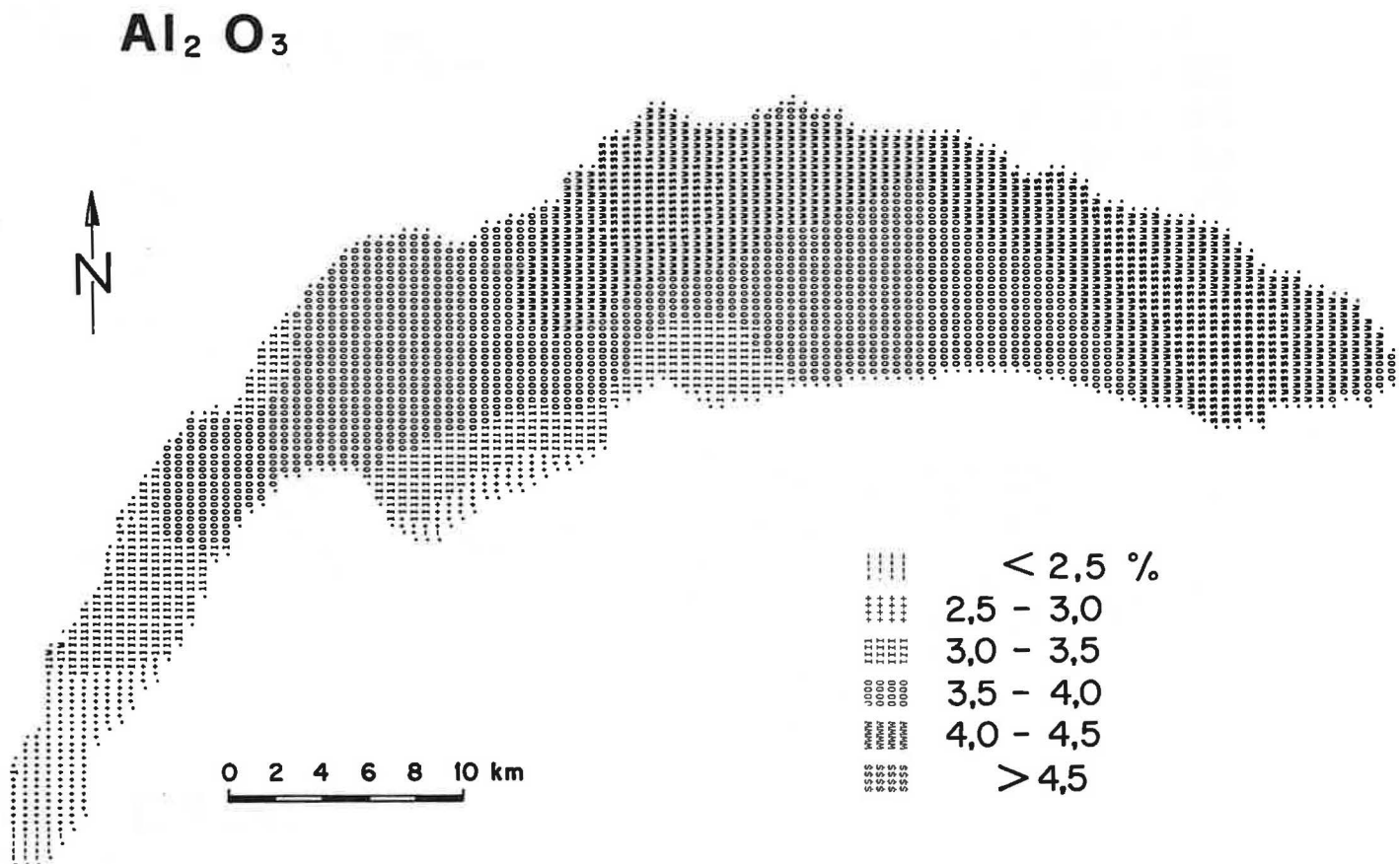
- VERNET, J.-P. & THOMAS, R.L. (1972b): Le mercure dans l'environnement et le rôle de la géologie sédimentaire. Bull. BRGM, 2ème série, sect. III/3: 43-61.
- VERNET, J.-P., THOMAS, R.L., JAQUET, J.-M. & FRIEDLI, R. (1972): Texture of the sediments of the Petit Lac (Western Lake Geneva). Eclog. Geol. Helv., 65 (3): 591-610.
- VERNET, J.-P., DAVAUD, E., COSANDEY, M. & BERLIE, J. (1975): Analyse de la radio-activité des sédiments des lacs Léman et Morat. Eclog. Geol. Helv. 68 (I): 87-96.
- VIEL, M. & VERNET, J.-P. (1979): Contamination par les métaux lourds des sédiments de quelques affluents du Léman et d'un affluent de l'Arve. Rapp. CIPEL: 218-233.
- WILLIAMS, J., JAQUET, J.-M. & THOMAS, R. (1976): Forms of phosphorus in the surficial sediments of lake Erie. Jour. Fish. Res. Bd. Canada, 33 (3): 413-429.
- WILLIAMS, J., JAQUET, J.-M. & VERNET, J.-P. (1978): Influence des rejets de deux stations d'épuration sur la teneur en phosphore des sédiments côtiers du Léman. Rev. Suisse Hydrol., 40 (2): 361-373.

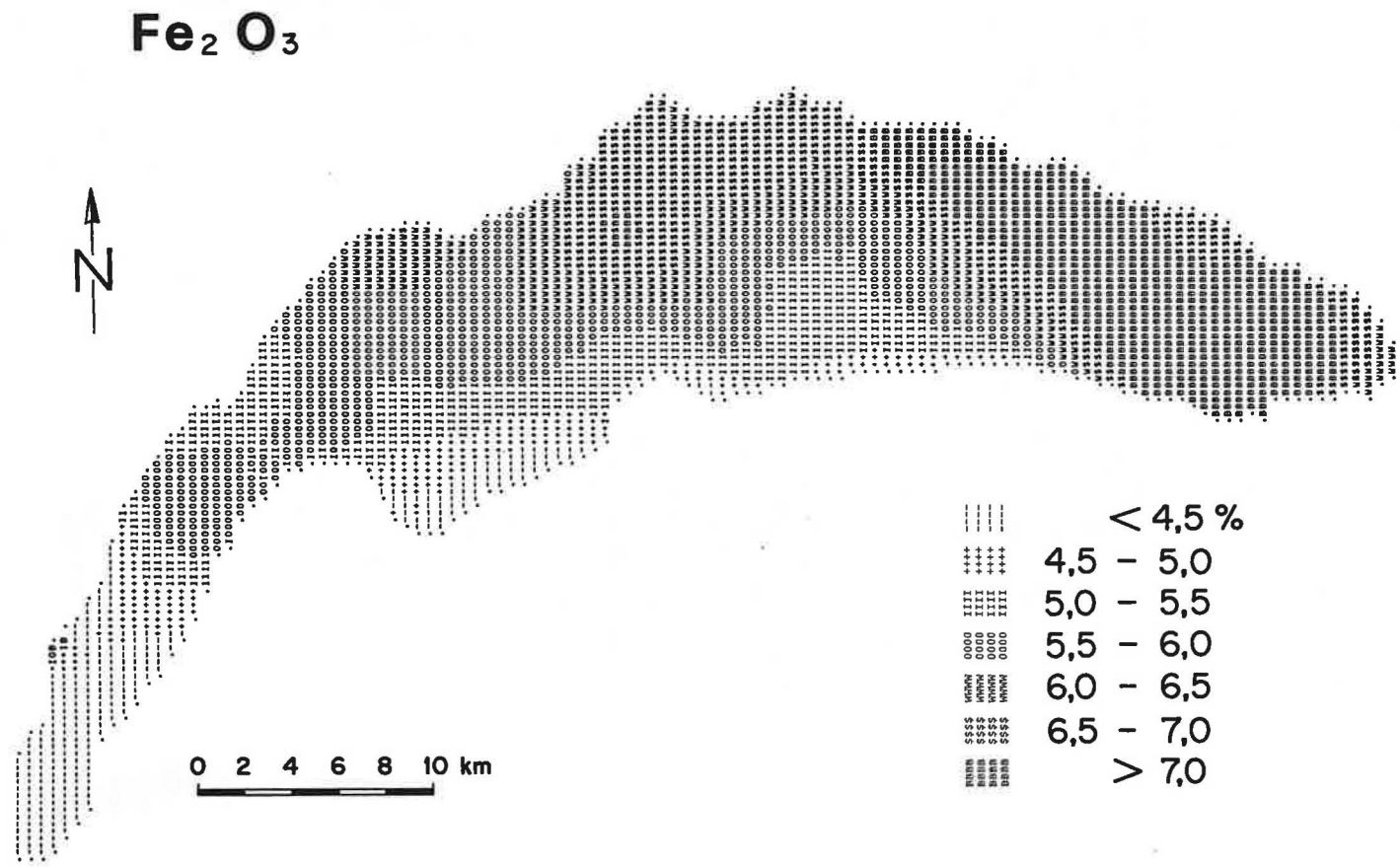
LEGENDE DES PLANCHES

- 1a-g: Variation géographique de la concentration de quelques éléments majeurs dans les sédiments superficiels.
- 2 : Variation géographique du rapport $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ dans les sédiments superficiels.
- 3a-d: Variation géographique de la concentration des éléments-traces argilophiles dans les sédiments superficiels.
- 4a-g: Variation géographique de la concentration du mercure et des éléments-traces organophiles dans les sédiments superficiels.

CaCO₃



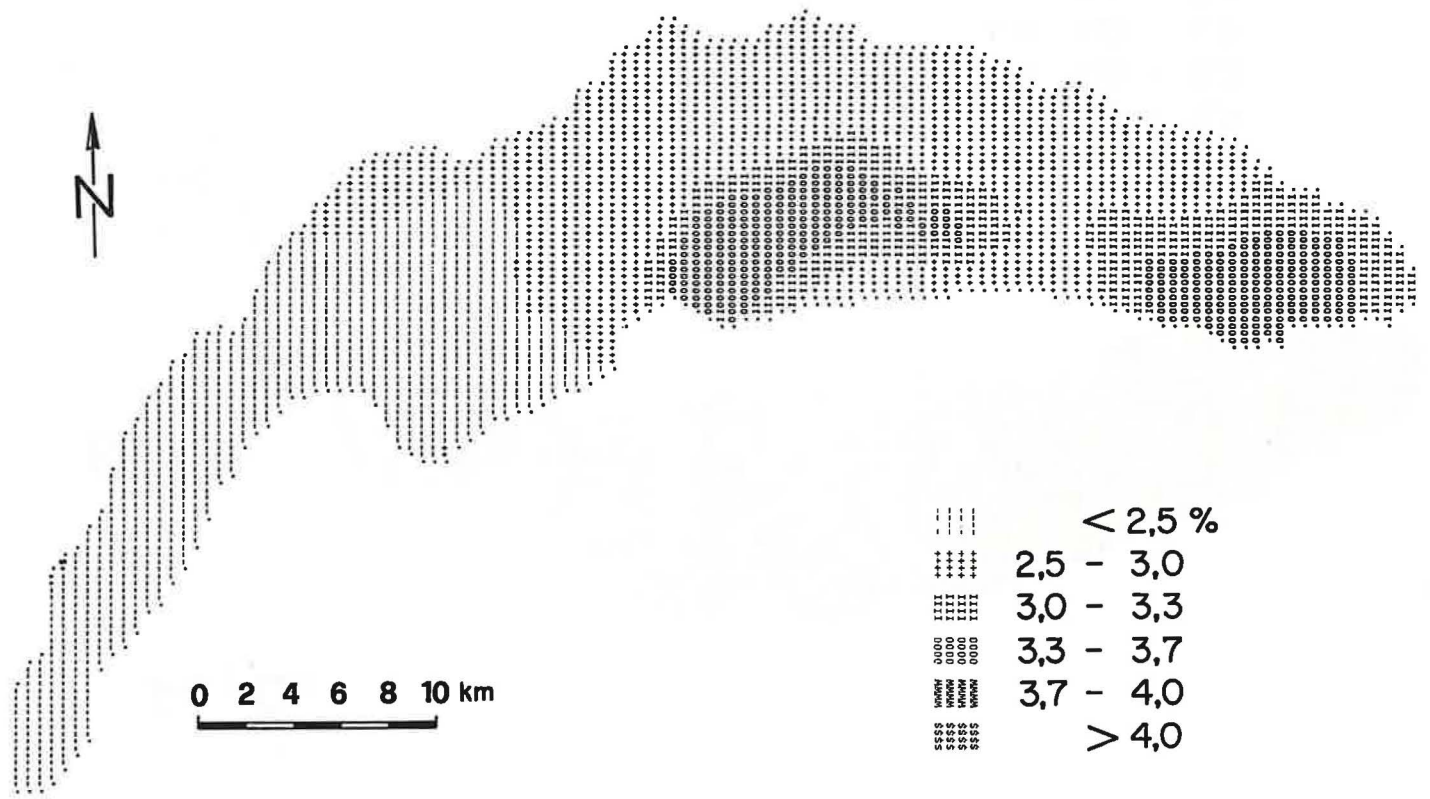




MgO

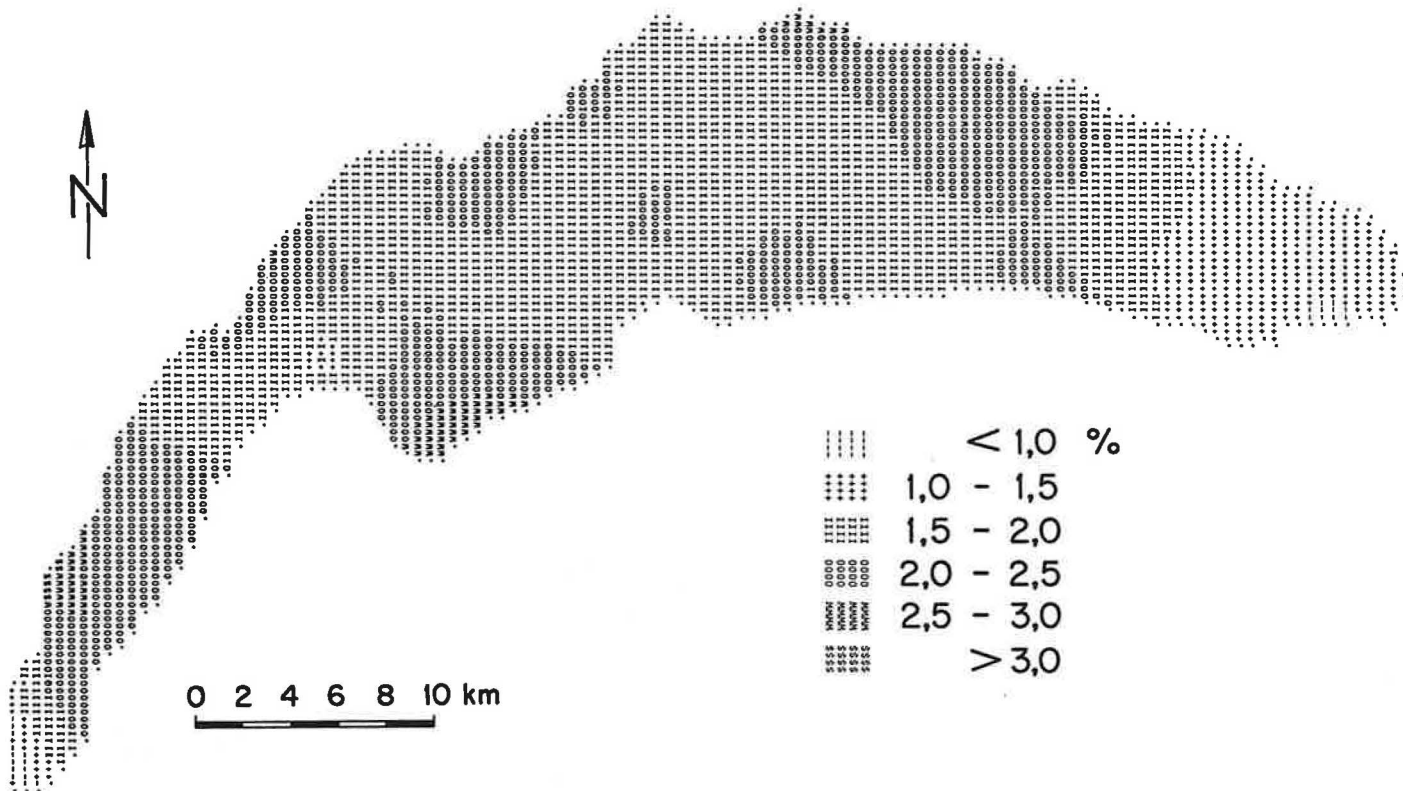


0 2 4 6 8 10 km

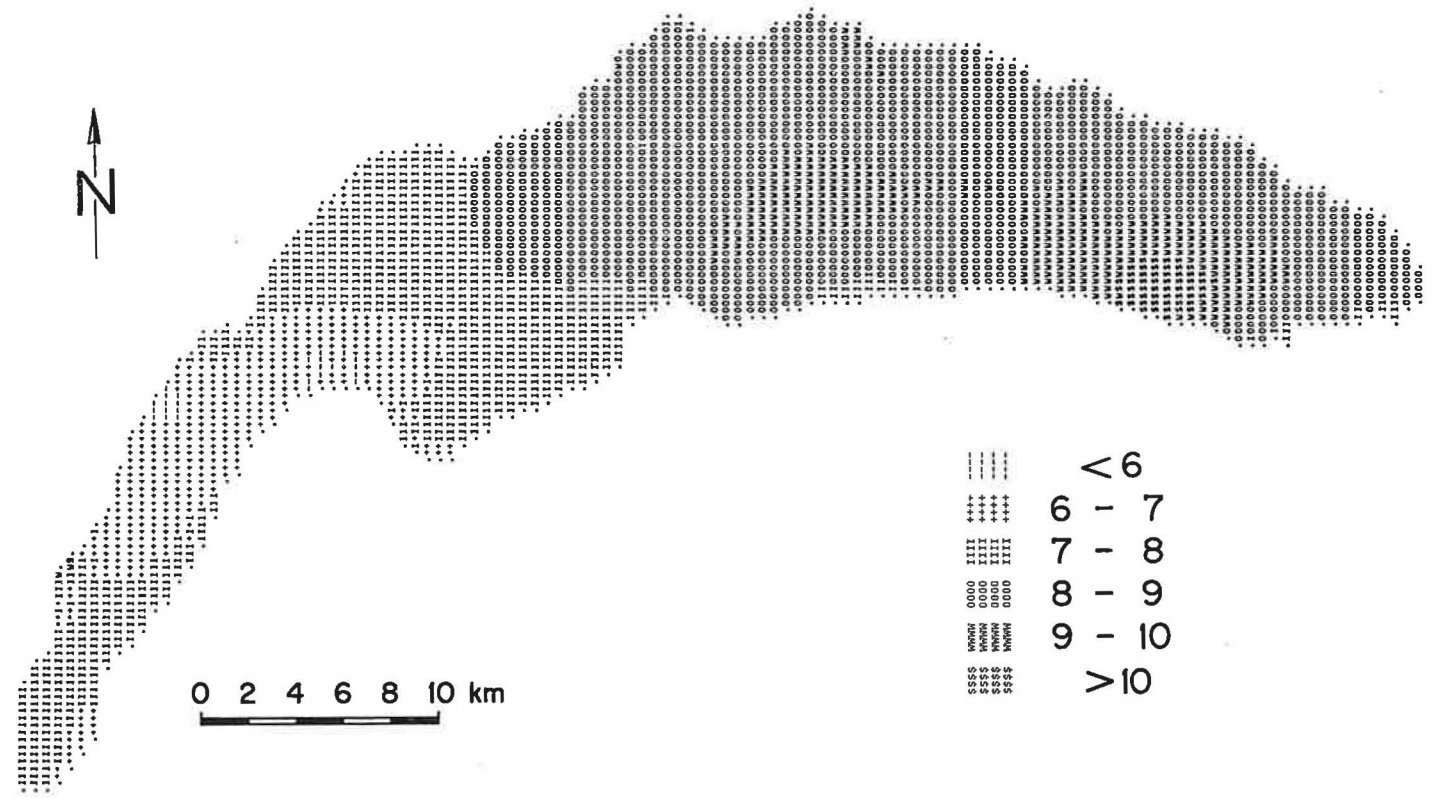


----	< 2,5 %
----	2,5 - 3,0
----	3,0 - 3,3
----	3,3 - 3,7
----	3,7 - 4,0
----	> 4,0

Carbone org.



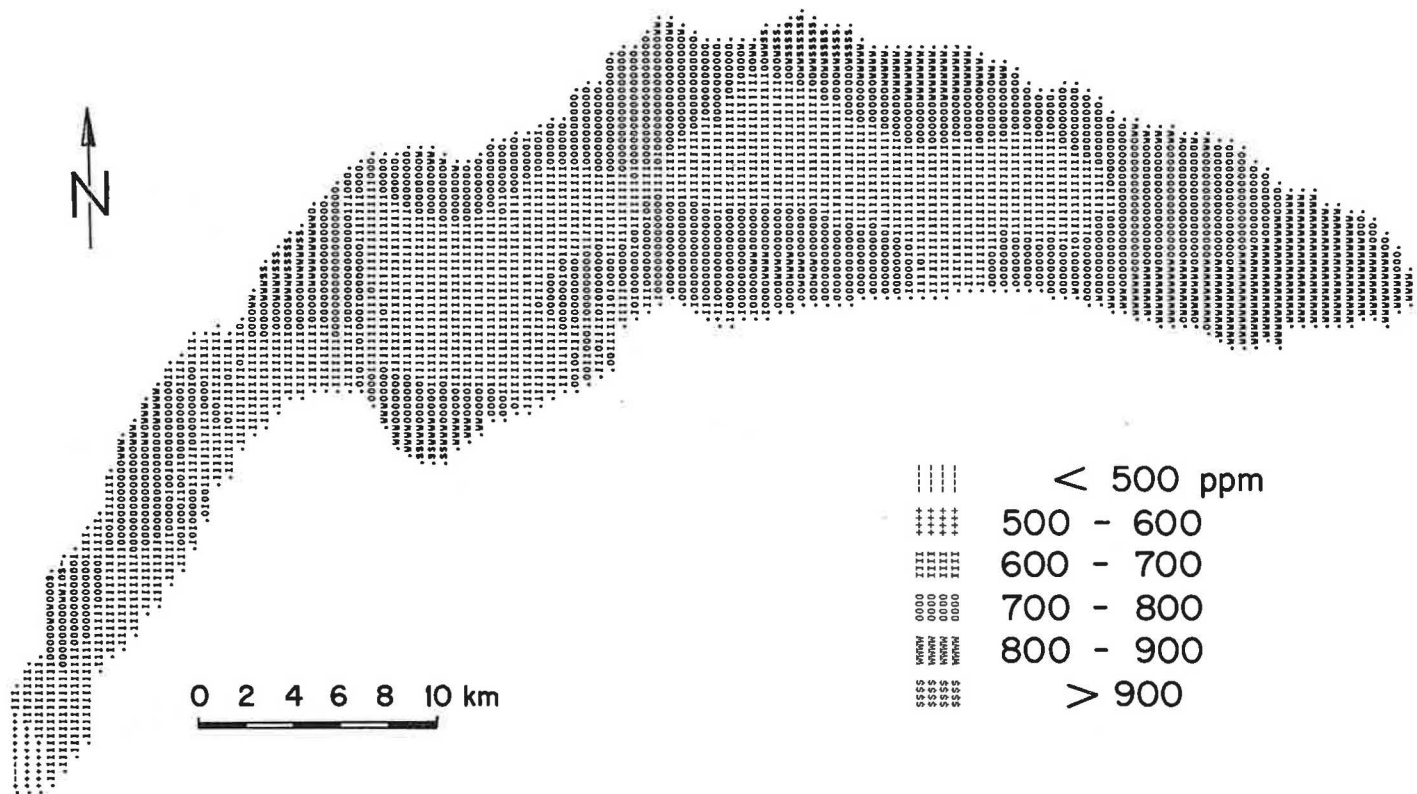
C / N

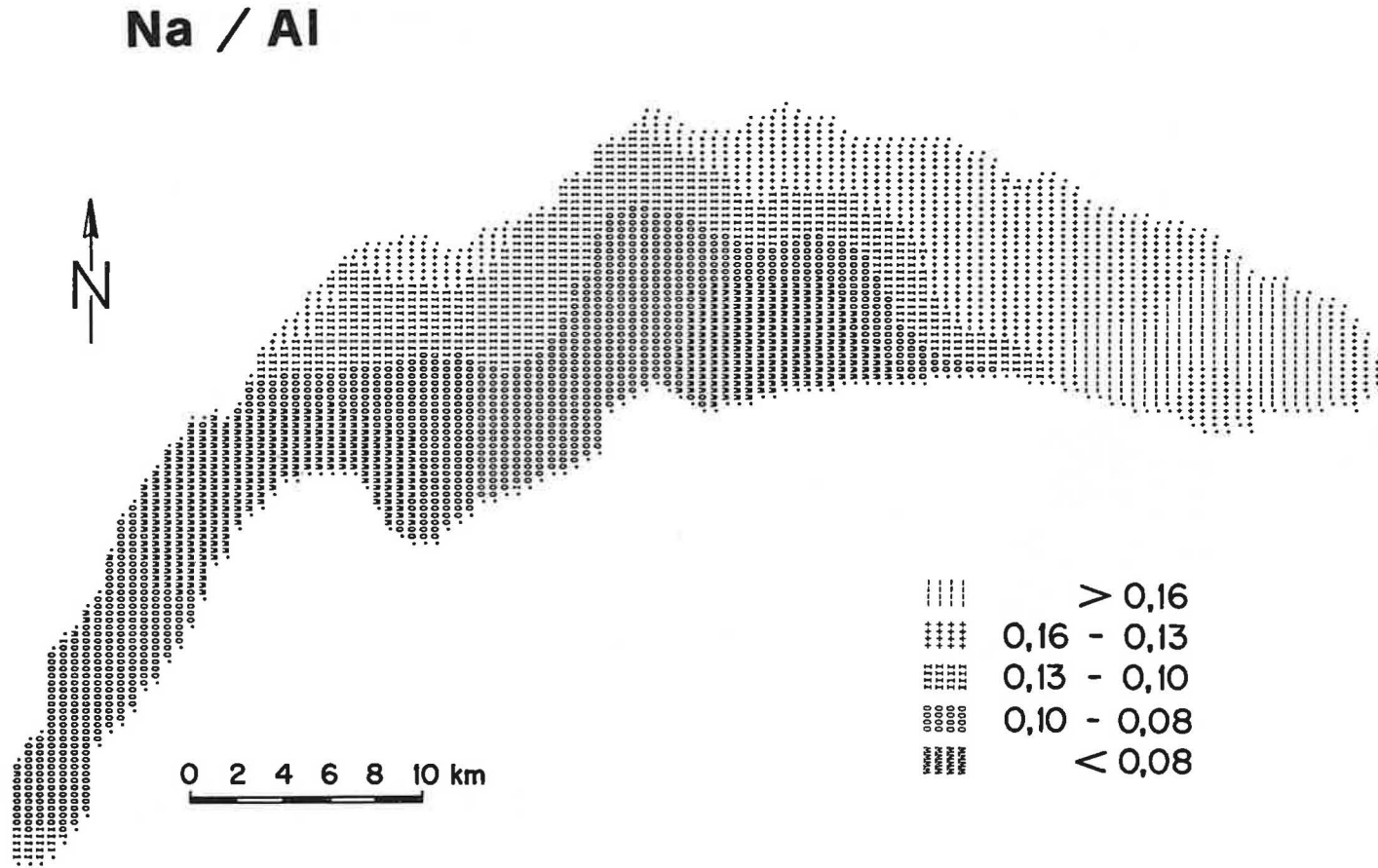


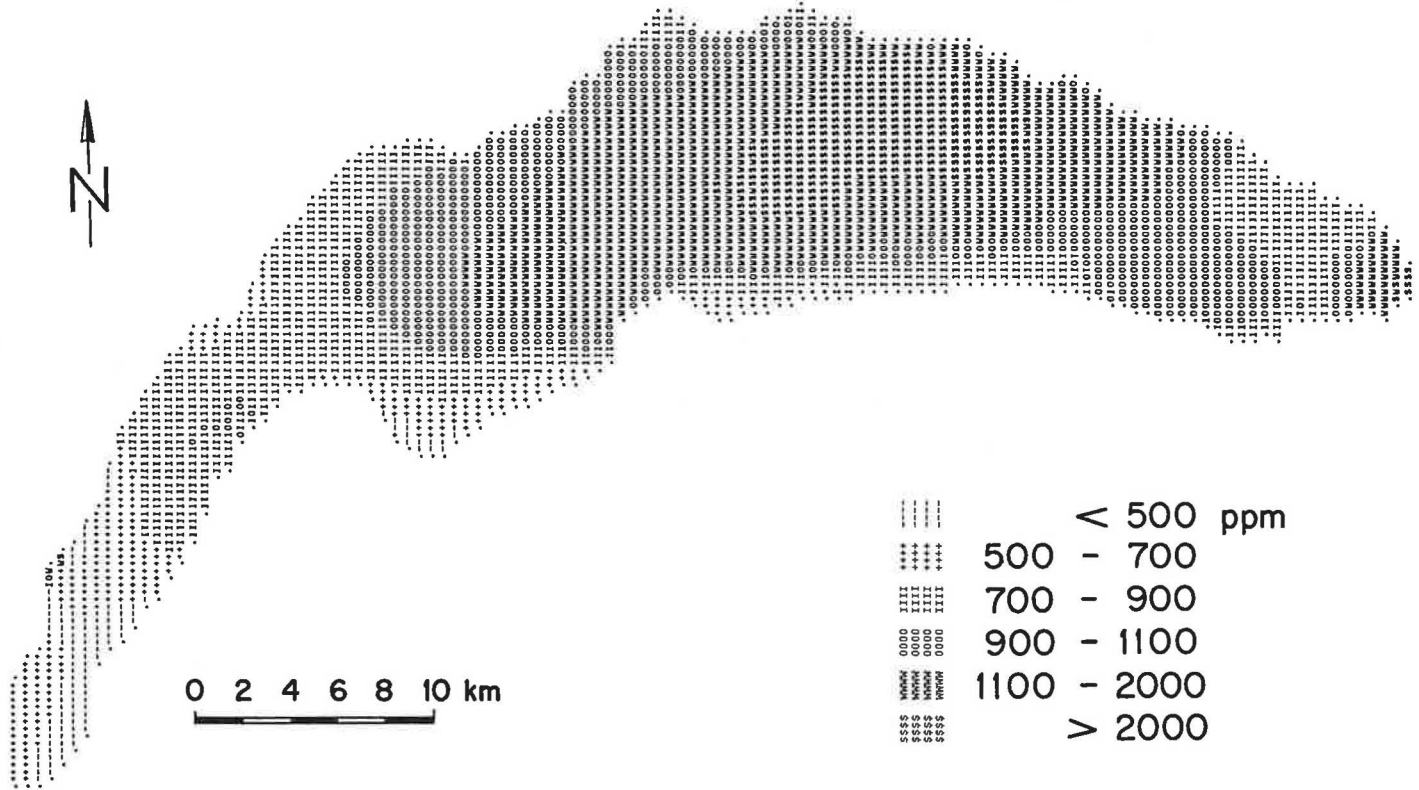
0 2 4 6 8 10 km

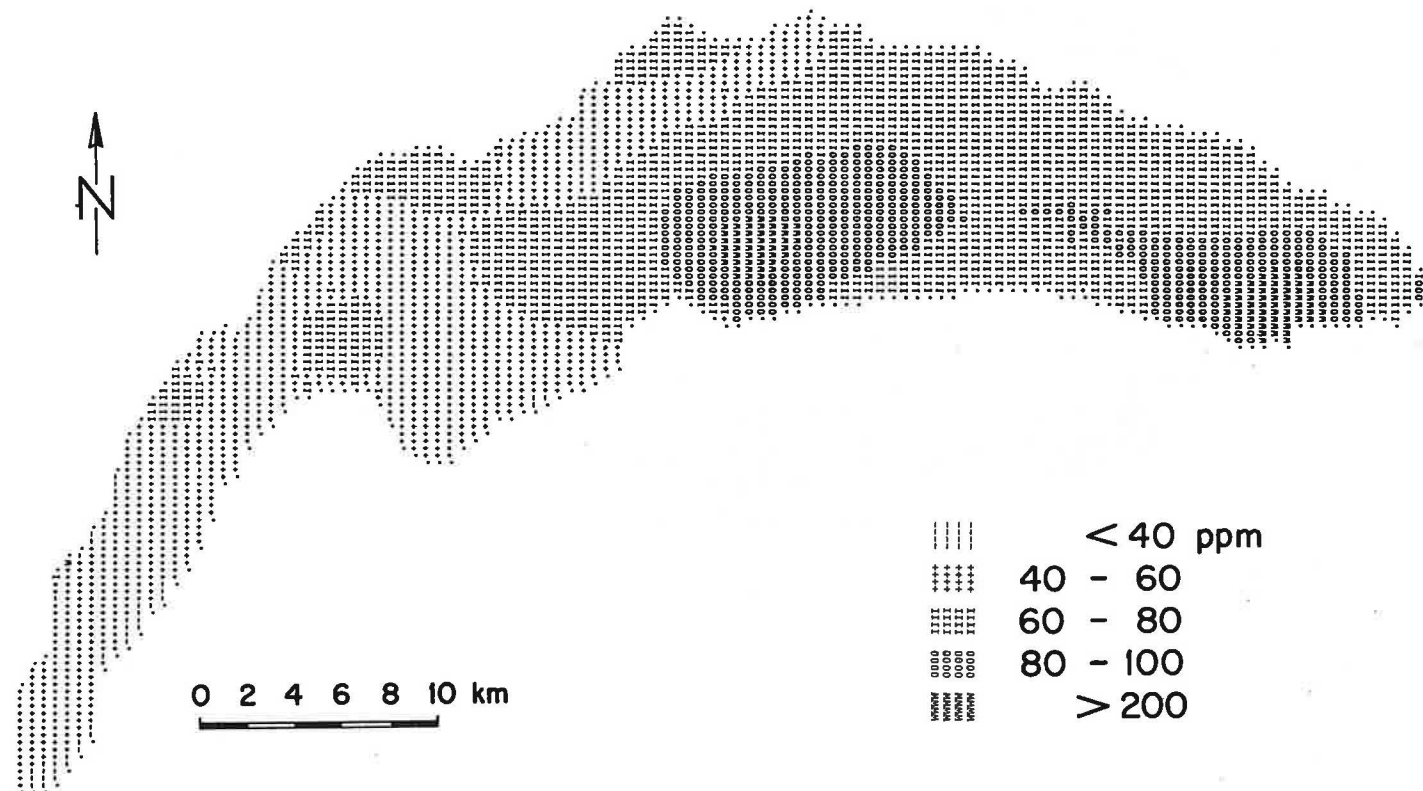
SSSS	MMMM	0000	IIII	IIII	+++	< 6
SSSS	MMMM	0000	IIII	IIII	+++	6 - 7
SSSS	MMMM	0000	IIII	IIII	+++	7 - 8
SSSS	MMMM	0000	IIII	IIII	+++	8 - 9
SSSS	MMMM	0000	IIII	IIII	+++	9 - 10
SSSS	MMMM	0000	IIII	IIII	+++	> 10

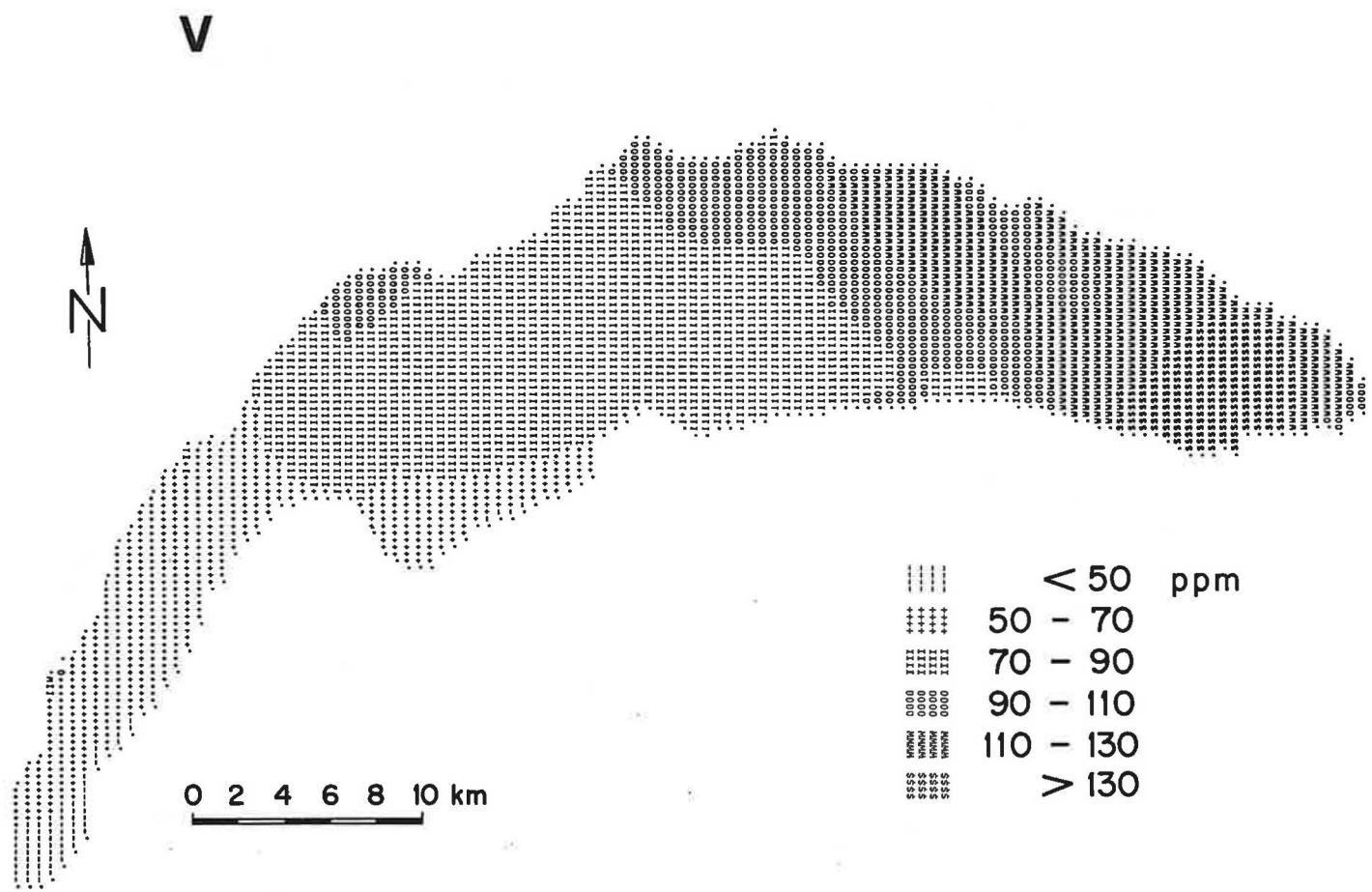
Phosphore tot.



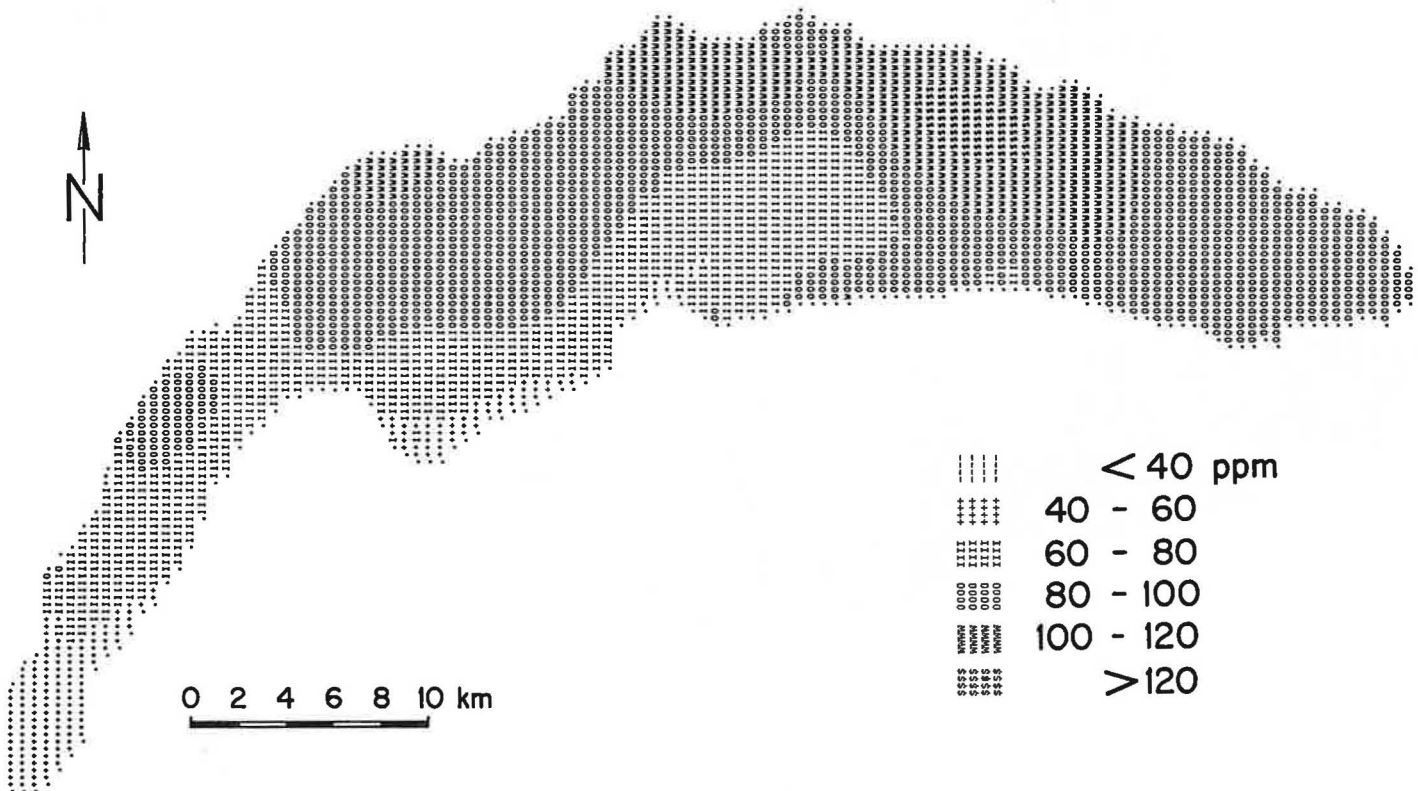








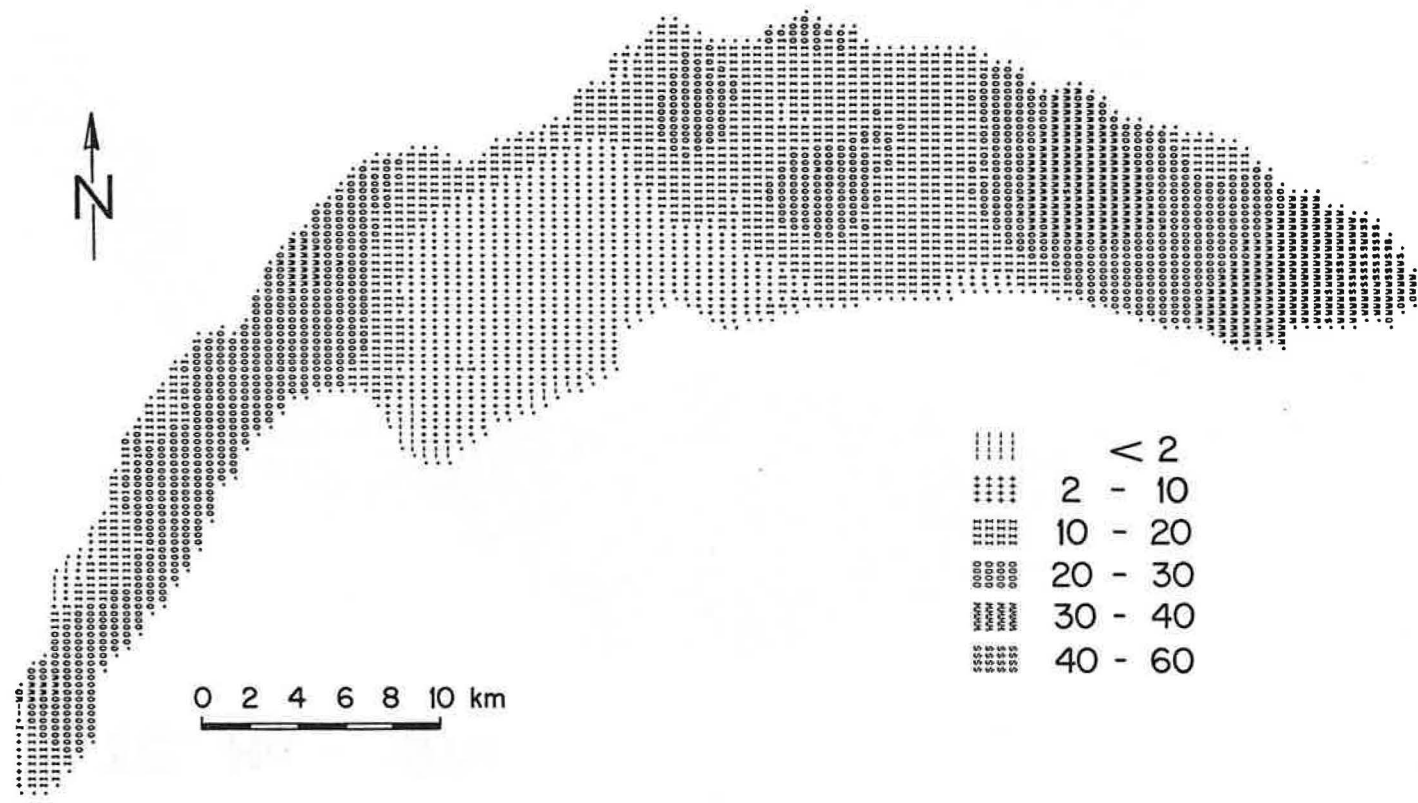
0 2 4 6 8 10 km



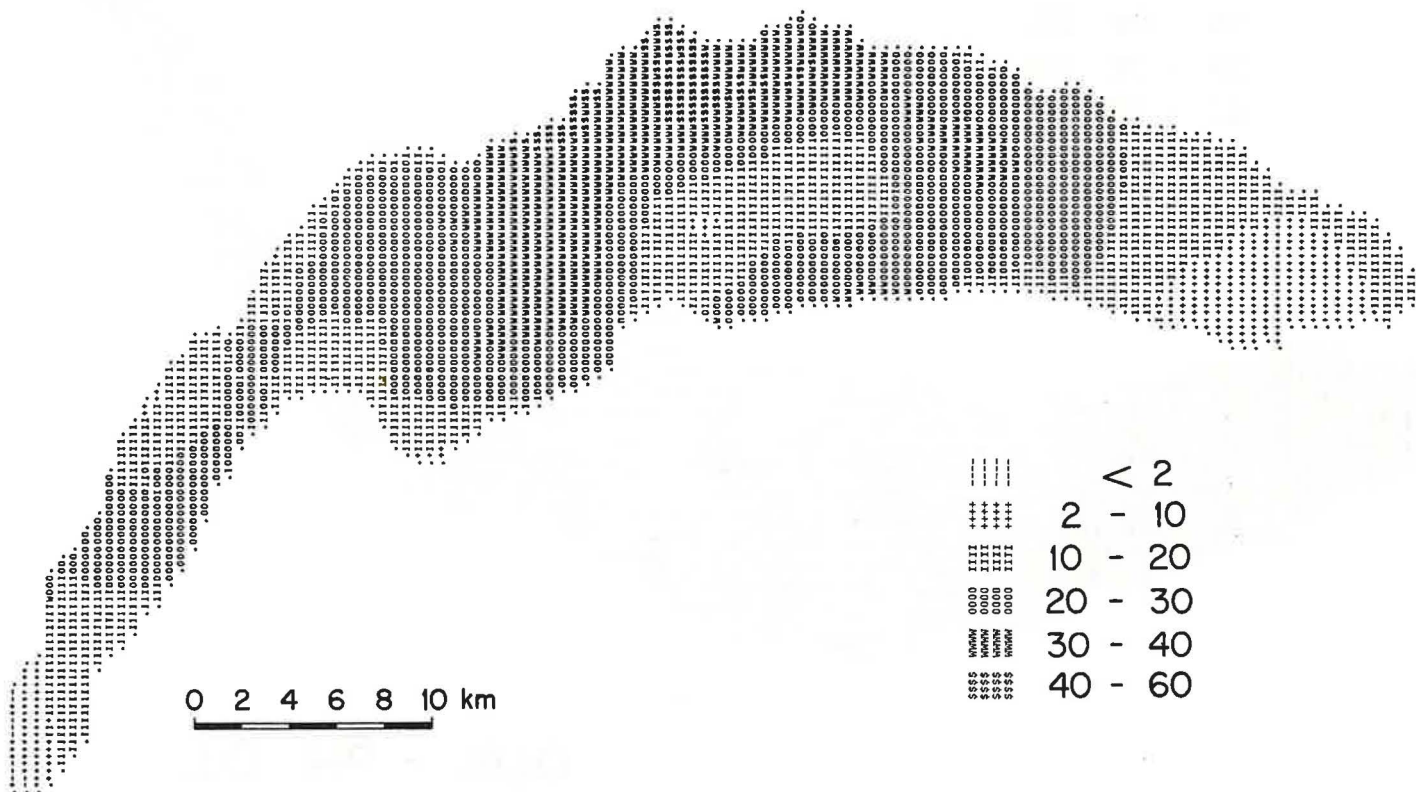
< 40 ppm
 40 - 60
 60 - 80
 80 - 100
 100 - 120
 > 120

----	++++	IIII	0000	MMMM	\$\$\$\$
----	++++	IIII	0000	MMMM	\$\$\$\$
----	++++	IIII	0000	MMMM	\$\$\$\$
----	++++	IIII	0000	MMMM	\$\$\$\$
----	++++	IIII	0000	MMMM	\$\$\$\$

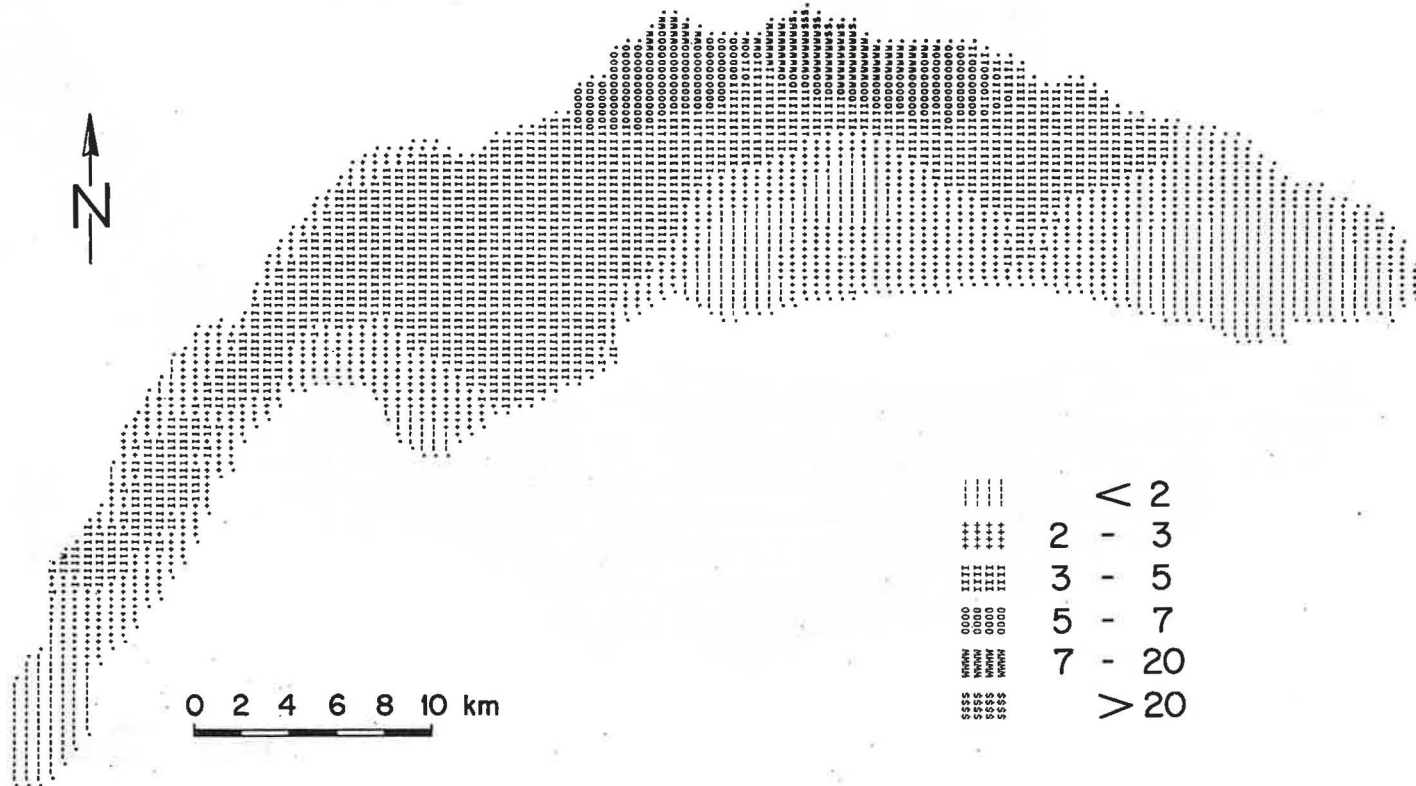
TC. Hg - 1970



TC. Hg - 1978

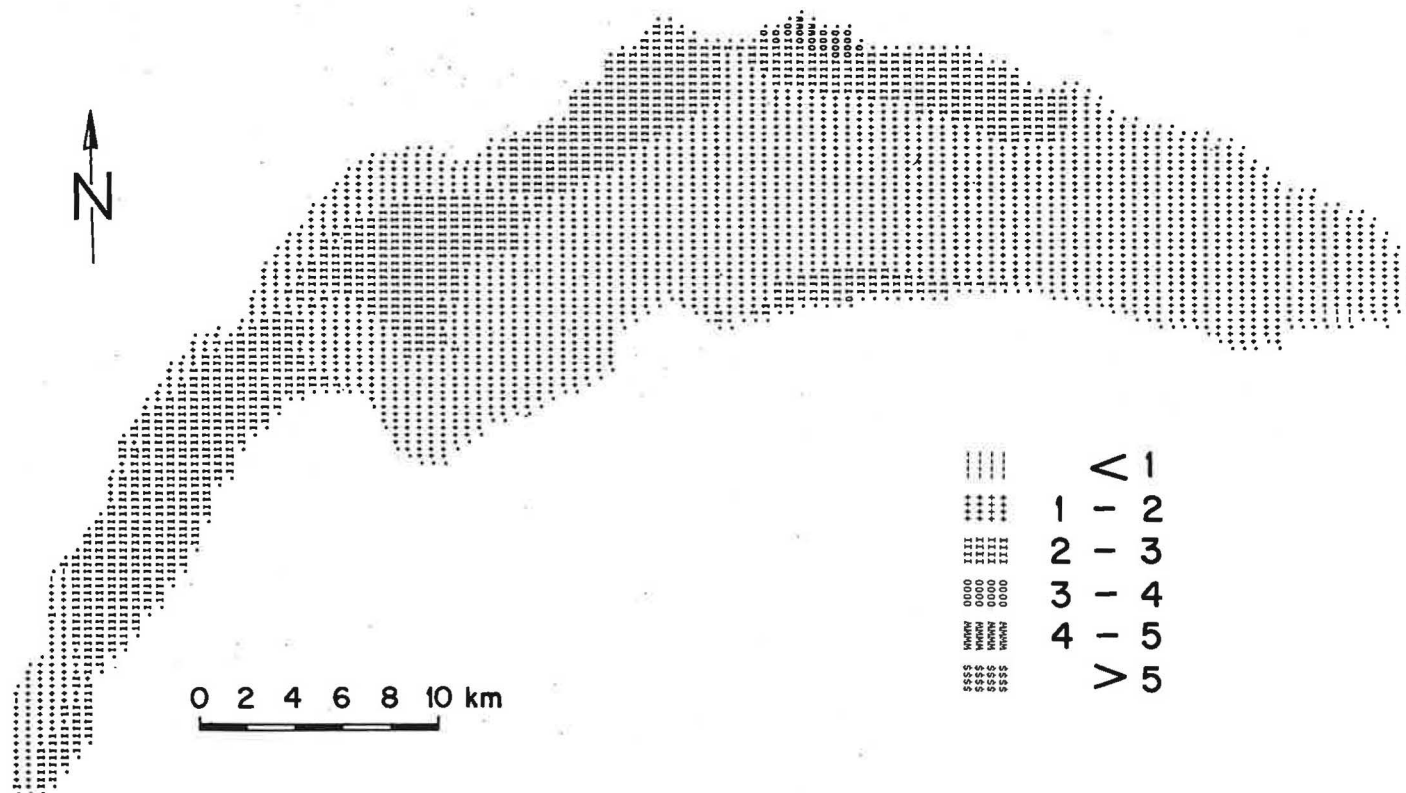


TC. Ag

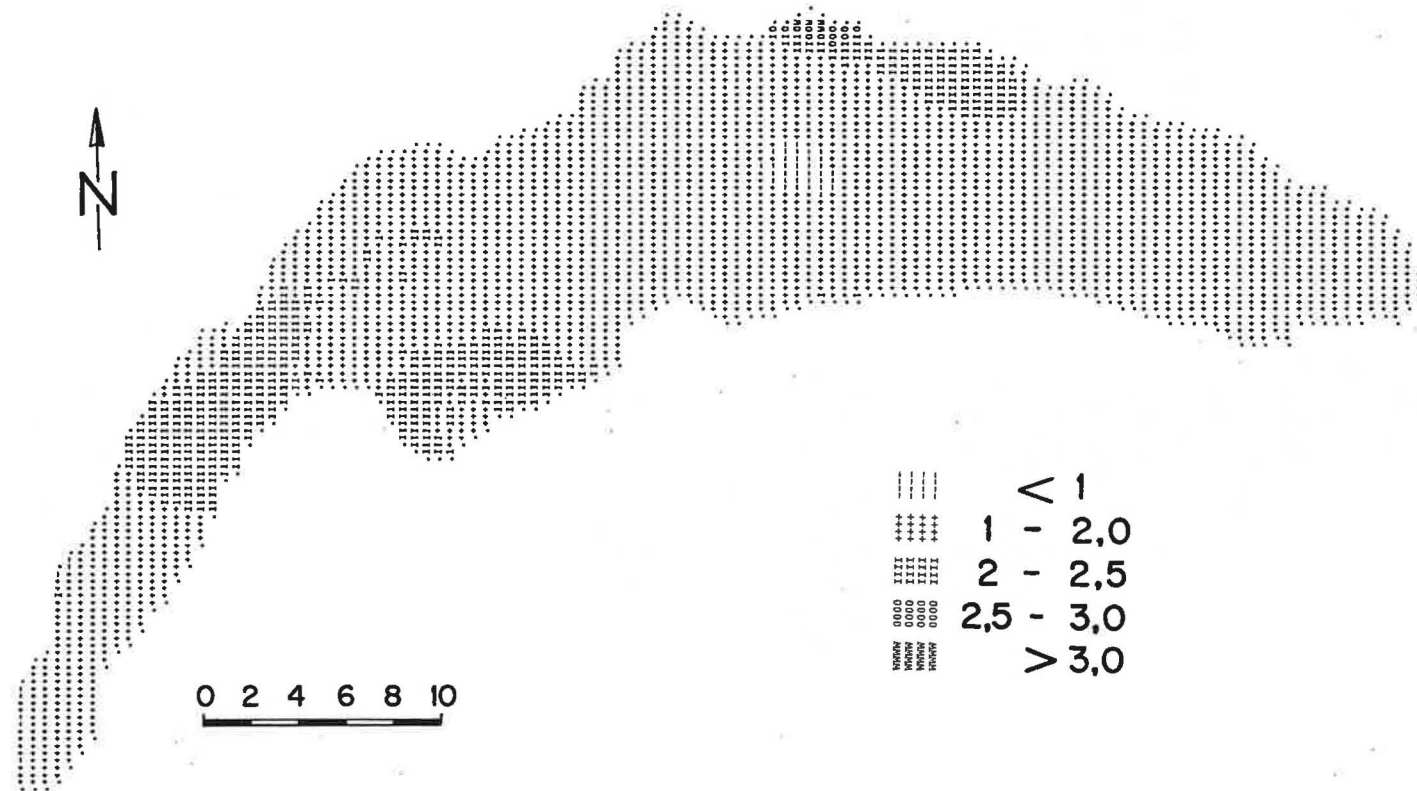


----	----	< 2
+++	+++	2 - 3
		3 - 5
0000	0000	5 - 7
NNNN	NNNN	7 - 20
----	----	> 20

TC. Pb

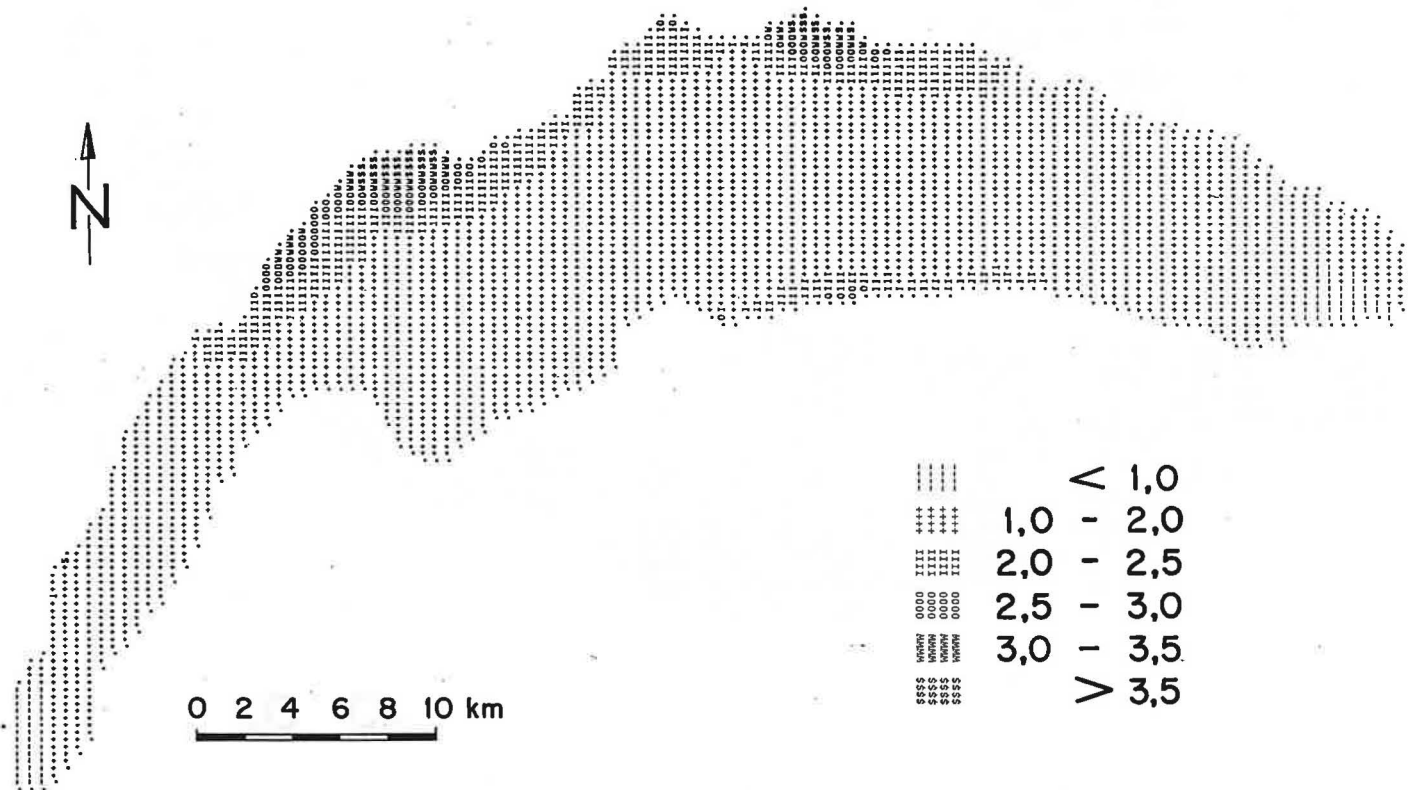


TC. Zn



4_g

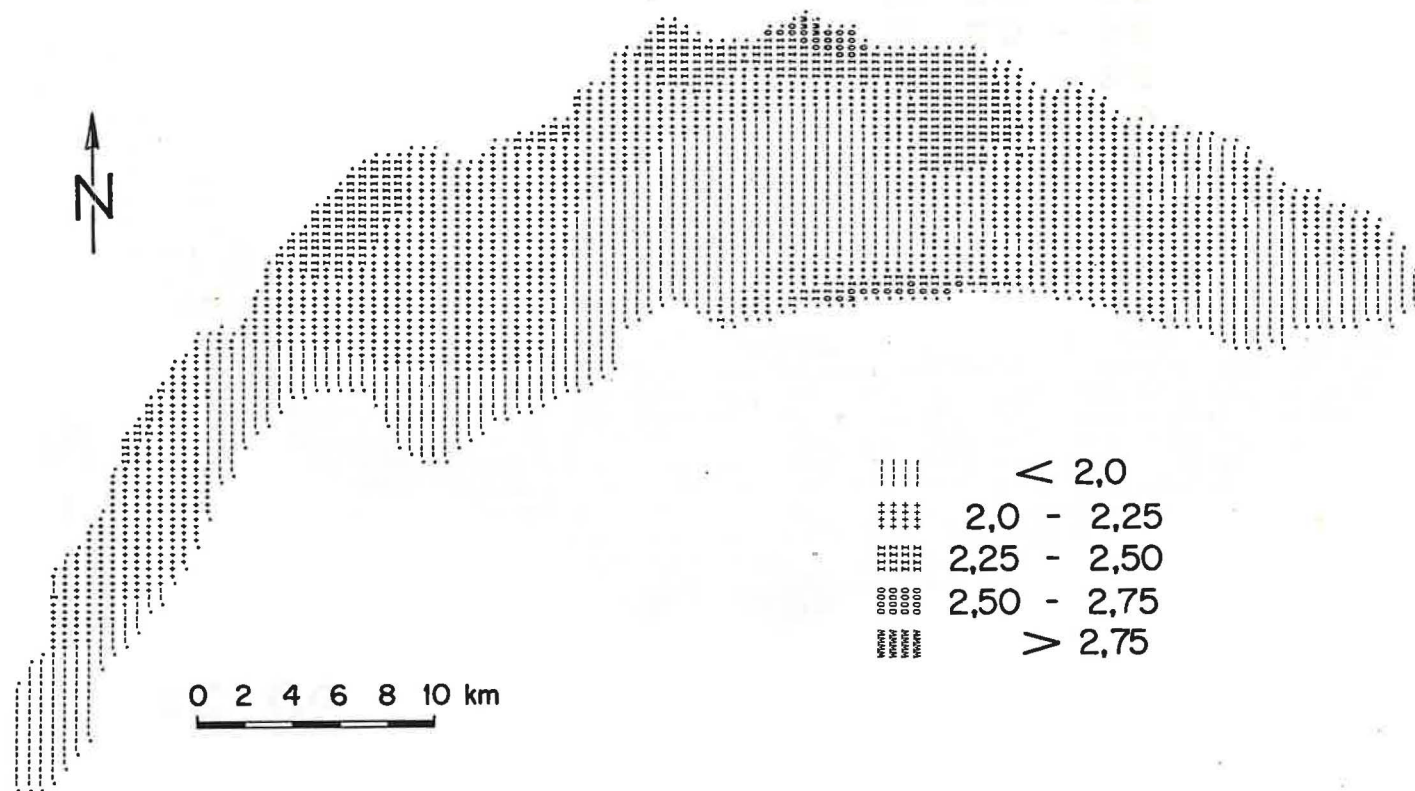
TC. Cu



0 2 4 6 8 10 km

----	III	0000	5555	<	1,0
----	III	0000	5555	1,0 -	2,0
----	III	0000	5555	2,0 -	2,5
----	III	0000	5555	2,5 -	3,0
----	III	0000	5555	3,0 -	3,5
----	III	0000	5555	>	3,5

TC. Cr



12. V. BINGGELI. Zur Morphologie und Hydrologie der Valle del Lucomagno. 124 Seiten, 30 Tabellen, 64 Figuren, 9 Fototafeln. 1961 16. —
13. J.G. ZELLER. Mophorlogische Untersuchungen in den östlichen Seitentälern des Val Blenio. 111 Seiten, 64 Textfiguren, 2 Tafeln. 1964 16. —
14. M. NIKLAUS. Geomorphologische und limnologische Untersuchungen am Öschinensee. 116 Seiten, 26 Textfiguren, 1 Tafel. 1967 24. —
15. E. GRUETTER. Beiträge zur Morphologie und Hydrologie des Val Verzasca. 92 Seiten, 9 Karten, 36 Figuren, 27 Abbildungen, 33 Tabellen. 1967 24. —
16. P. NYDEGGER. Untersuchungen über Feinstofftransport in Flüssen und Seen, über Entstehung von Trübungshorizonten und zuflussbedingten Strömungen im Brienzersee und einigen Vergleichsseen. 92 Seiten, 58 Abbildungen, 6 Tafeln, 29 Tabellen. 1967 24. —
17. H.U. SCHWEIZER. Beiträge zur Hydrologie der Ajoie (Berner Jura). 1970 24. —
18. Chr. JAGGI. Hydrologische Untersuchungen in verschiedenen Tessiner Tälern. 1970 24. —
19. P. KASSER, Karin SCHRAM und J.C. THAMS. Die Strahlungsverhältnisse im Gebiet der Baye de Montreux. 1970
20. P. FÖHN. Methoden der Massenbilanzmessung bei grossen Schneehöhen untersucht im Firngebiet des Grossen Aletschgletschers. 1971 24. —
21. J.P. TRIPET. Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse. 1973 24. —
22. V. BINGGELI. Hydrologische Studien im zentrale schweizerischen Alpenvorland, insbesondere dem Gebiet der Langete. 1974 30. —
23. Ch. LEIBUNDGUT. Zum Wasserhaushalt des Oberaargaus und zur hydrologischen Bedeutung des landwirtschaftlichen Wiesenbewässerungssystems im Langental. 30. —
24. Die Rheinwasserstrasse. -Technische und wirtschaftliche Aspekte, hydrologische Aspekte, Abflussprognosen. 10. —
25. Die Verdunstung in der Schweiz. -Stand der Kenntnisse, Methoden, Anregungen zur weiteren Erforschung. 24. —
26. E. HOEHN. Hydrogeologische Untersuchungen im Gebiet westlich von Frick (Aargauer Tafeljura). 1979 24. —
27. A. WILDBERGER. Zur Hydrologie des Kartes im Rawil-Gebiet. 1981 30. —
28. Tracermethoden in der Hydrologie. -Tagungsbericht des 4. SUWT-Internationale Fachtagung über die Anwendung von Tracermethoden in der Hydrologie, Bern, 1981. Teil I und II 65. —
29. F.D. VUATAZ. Etude géochimique et géothermique des eaux thermales de la Suisse et de quelques régions limitrophes. 1982 38. —
30. J.-M. JAQUET, F. RAPIN, E. DAVAUD et J.-P. VERNET. Géochimie des sédiments du Léman. 1983 20. —

