

## DISTRIBUTION, COMPOSITION ET CARACTERISTIQUES DE LA TRANCHE SUPERFICIELLE DES SEDIMENTS DU LAC DU BARRAGE BICAZ (ROUMANIE)<sup>1</sup>

par

C. GRUJENSKI<sup>2</sup>, C. DINU<sup>3</sup>, R. COSMA<sup>3</sup>, E. FODOREANU<sup>3</sup>, M. TRIMBITASU<sup>3</sup>,  
ANCA STANCIU<sup>3</sup>, W. ZOMBORI<sup>3</sup>, A. BURST<sup>3</sup>, D. NEGUT<sup>3</sup>, M. SIKO<sup>3</sup>,  
VERONICA STAMATE<sup>3</sup>, A. ULIAN<sup>3</sup>

(10 figures et 1 tableau)

**RESUME.**- L'analyse granulométrique a montré que la tranche superficielle des sédiments du lac Bicaz représente un mélange en proportions variables des trois classes granulométriques : gravier-sable; silt; argile (échelle Wentworth). D'après les paramètres granulométriques ce sédiment, à caractère bimodal, est généralement mal trié et il met en évidence une importante énergie des courants.

Les distributions granulométriques et entropiques permettent de séparer trois zones distinctes dans le lac Bicaz :

- Une zone située en amont du village de Ceahlau, avec des sédiments grossiers, mal triés et avec des valeurs d'entropie élevées au centre du lac et diminuant vers les bords. Dans cette zone le régime de sédimentation est très variable car il est contrôlé par les vagues, par les oscillations du niveau du lac et par les courants. Souvent, dans la zone de faible profondeur, la sédimentation s'arrête et les sédiments les plus fins sont repris et redistribués.
- Dans la deuxième zone, comprise entre les villages de Ceahlau et de Buhalnita, les sédiments fins, bien triés, sont prédominants. Ils occupent le centre du lac et passent graduellement vers les bords à des sédiments plus grossiers. Le régime de sédimentation dans cette zone est constant, tranquille et spécifique de la sédimentation des grands lacs en général (Ontario, Erié, Léhman etc...).
- La troisième zone, comprise entre le village de Buhalnita et le barrage Bicaz, est caractérisée par la distribution zonale des sédiments, à prédominance argileuse au centre du lac passant à une prédominance grossière vers les bords. Les valeurs d'entropie sont élevées au centre du lac et diminuent vers l'extérieur. La distribution granulométrique et entropique montre l'existence d'un régime de sédimentation mixte : une combinaison entre les deux régimes de sédimentation qui caractérisent les zones précédentes. L'apparition du régime mixte a été déterminée par le changement des conditions morphologiques du lac.

L'association des minéraux lourds et argileux montre que les schistes cristallins des Carpathes orientales est la source de la plupart des sédiments accumulés dans le lac Bicaz. Dans la zone avale du lac, le relief environnant, spécialement "l'unité des schistes noirs", a fourni au lac d'importantes quantités de sédiments solides et en solution.

Les analyses spectrales quantitatives ont mis en évidence l'accumulation de quelques éléments chimiques qui peuvent avoir un intérêt économique.

**ABSTRACT.**- A granulometric analysis has shown that the top layer of sediments in the Bicaz Reservoir consists of mixed grit-sand, silt and clay (on the Wentworth scale). It is a poorly sorted sediment, with a bimodal distribution, and it shows the influence of high energy currents.

The distribution of granulometric and entropic values allow three zones to be distinguished :

- A zone situated neat the village of Ceahlau, which consists of coarse, poorly sorted sediments with a high entropy value in the centre of the reservoir and diminishing values towards its borders. In this zone the regime of sedimentation is most variable since it is controlled by wave action, the changes in the level of water within the reservoir, and by currents. Where the reservoir is most shallow, the sedimentation is often interrupted and the finer sediments winnowed and redistributed.

<sup>1</sup> Manuscrit déposé la 24 février 1978.

<sup>2</sup> Professeur à l'Université Nationale du Zaïre, Campus de Lubumbashi, Département de Géologie et à l'Université Bucarest, Fac. Géologie-Géographie, Roumanie.

<sup>3</sup> Université Bucarest- Fac. Géologie-Géographie, Roumanie.

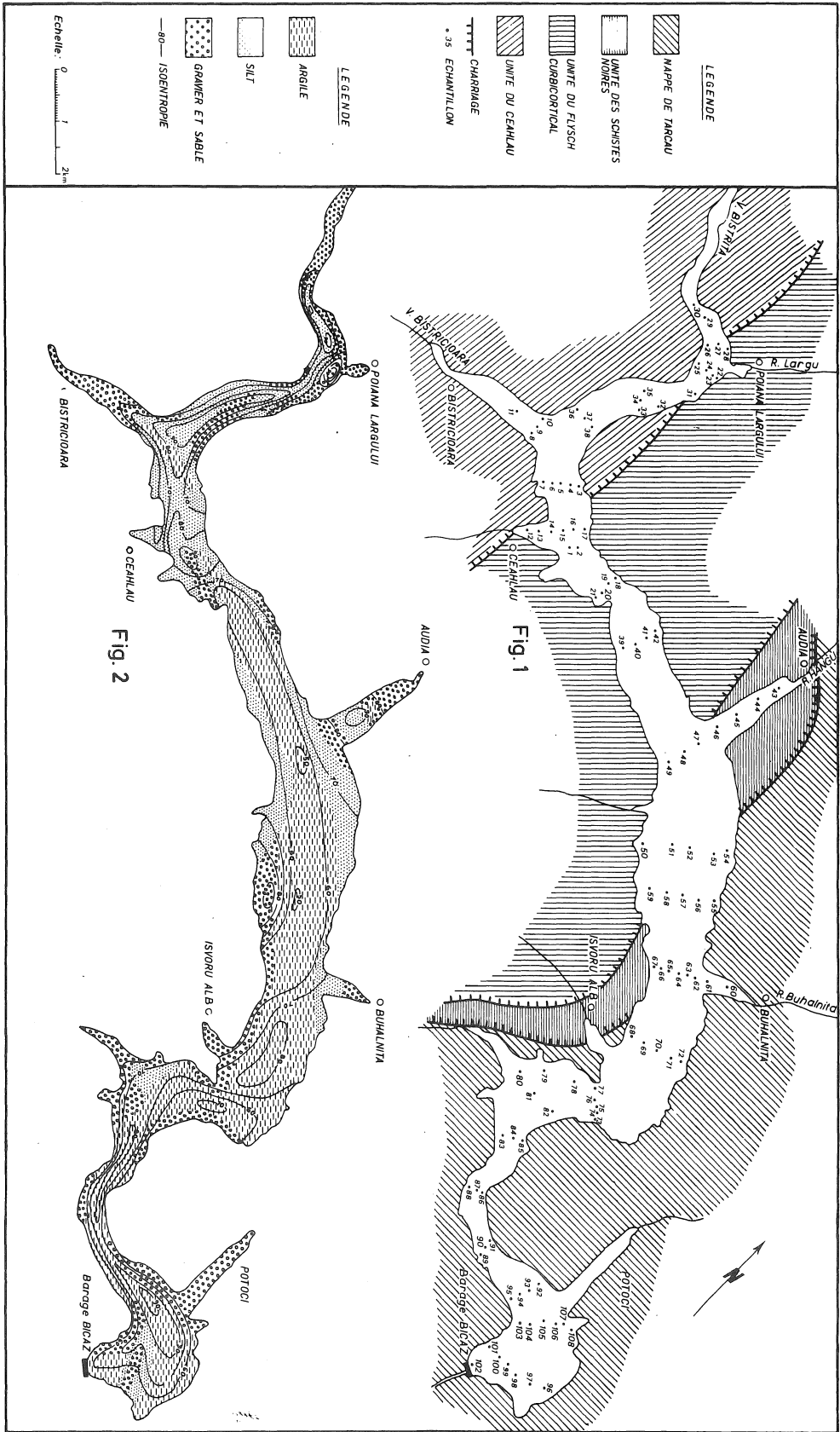


Figure 1.- Carte géologique du lac Bicăz

Figure 2.- Carte de la distribution des sédiments du lac Bicăz

- Between the villages of Ceahlau and Buhalnita fine, well sorted sediments are predominant. They occupy the centre of the reservoir and pass gradually into coarser sediments towards its borders. This zone is characterised by constant sedimentation in quiet waters, as is common in all big lakes (Ontario, Erie, Geneve etc...).
- The third zone, situated between the village of Buhalnita and the Bicaz Dam, is characterised by the zonal distribution of its sediments which are predominantly argillaceous in the centre of the reservoir and which pass into coarser grained sediments towards its borders. The entropy values are high in the centre and diminish outwards. The distribution of granulometric and entropic values shows the presence of a mixed regime of sedimentation, i.e. a combination of the two regimes characterising the 2 precedent zone. The appearance of the mixed regime is due to changes in the morphology of the reservoir.

The distribution of heavy minerals and that of clay minerals shows the crystalline schists of the eastern Carpathians to be the source of most of the sediments accumulated in the Bicaz Reservoir. In the lower reaches of the reservoir, the surrounding relief and in particular that which corresponds to the "black shales unit", has provided important amounts of sedimentary material, both solids and in solution.

Quantitative spectroscopic analyses have shown the presence of trace elements which may be of some economic interest.

A cause de la sédimentation, la durée d'exploitation d'un lac de barrage hydroélectrique est limitée. Elle dépend de la grandeur du lac, du taux de sédimentation, de l'efficacité du décolmatage et de bien d'autres facteurs. L'étude complexe des sédiments accumulés dans le lac étudié apporte des informations très intéressantes sur ces problèmes et en même temps sur la constitution géologique du bassin versant en amont du barrage.

Souvent, les lacs de barrage représentent une zone favorable pour l'accumulation et la concentration des minéraux lourds ou rares, des pépites, des matériaux de construction (graviers, sables, argiles pour les briques etc..). Si ces accumulations sont riches, elles constituent des gisements facilement exploitables et renouvelables. Une telle exploitation a l'avantage de diminuer le taux de colmatage et augmente la durée d'exploitation du lac; elle protège le milieu environnant par la diminution du nombre des carrières d'argiles, des sablières et des gravières nécessaires aux travaux de construction et du génie.

\*  
\*   \*  
\*

Le lac hydroélectrique Bicaz se trouve dans le bassin supérieur de la rivière Bistrita (Carpathes orientales); il est alimenté aussi directement par plusieurs ruisseaux. Réalisé en 1961, ce lac de barrage a son niveau maximal à une altitude de 510 m., mais, souvent on enregistre d'importantes baisses de niveau. Autour de celui-ci le relief atteint vite 2.000 m. Dans son bassin versant affleurent les formations sédimentaires crétacé et paléogène sous faciès flysch appartenant aux quatre unités tectoniques indiquées sur la fig. 1; A l'ouest de la zone du flysch crétacé, dans les bassins versants supérieurs des vallées de Bistrita et de Bistricioara, affleurent les schistes cristallins des Carpathes orientales.

Le lac Bicaz a les dimensions suivantes : une longueur maximale de 35 km, une largeur maximale de 2 km, une profondeur maximale dépassant de peu 100 m, une superficie de 3.200 ha et un volume moyen d'eau de  $1,25 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>. Ce lac présente une série de phénomènes complexes d'érosion, de transport et de sédimentation. En quelques endroits ces phénomènes favorisent une intense accumulation de sédiments (la vitesse de sédimentation de 0 à 30 cm/an).

Les cours d'eau amènent au lac par traction, suspension ou solution des quantités importantes de sédiments. Une fois les sédiments arrivés, ils sont redistribués par des courants (le plus important de ceux-ci suit l'ancien cours de la vallée Bistrita), par des vagues (provoquées par des vents très forts), par les oscillations du niveau du lac (variations saisonnières de 5 à 20 m). Dans le processus d'érosion et du transport des sédiments dans le lac Bicaz, un rôle secondaire, mais permanent, est joué par les torrents et les eaux de ruissellement qui lavent spécialement la zone de flysch : cette zone étant constituée en grande partie par des roches tendres. A ces sédiments on doit ajouter les sédiments provenant de l'érosion des rives, érosion très active dans certaines zones, qui peut aussi produire des glissements de terrain.

En fonction de la prédominance, locale ou temporaire, d'un facteur ou d'un autre, la sédimentation dans le lac Bicaz prend un caractère particulier.

Les sédiments du lac Bicaz ont été étudiés à partir de 108 échantillons répartis en 23 profils (fig. 1) et prélevés à la partie superficielle du sédiment (20 à 30 cm d'épaisseur) à l'aide d'un godet à mâchoires (Bedengreifer) de type Petersen. La plus grande densité d'échantillonnage se trouve en amont du village de Ceahlau, c'est-à-dire dans la zone représentant le principal domaine d'accumulation des sédiments transportés par les rivières Bistrita et Bistricioara.

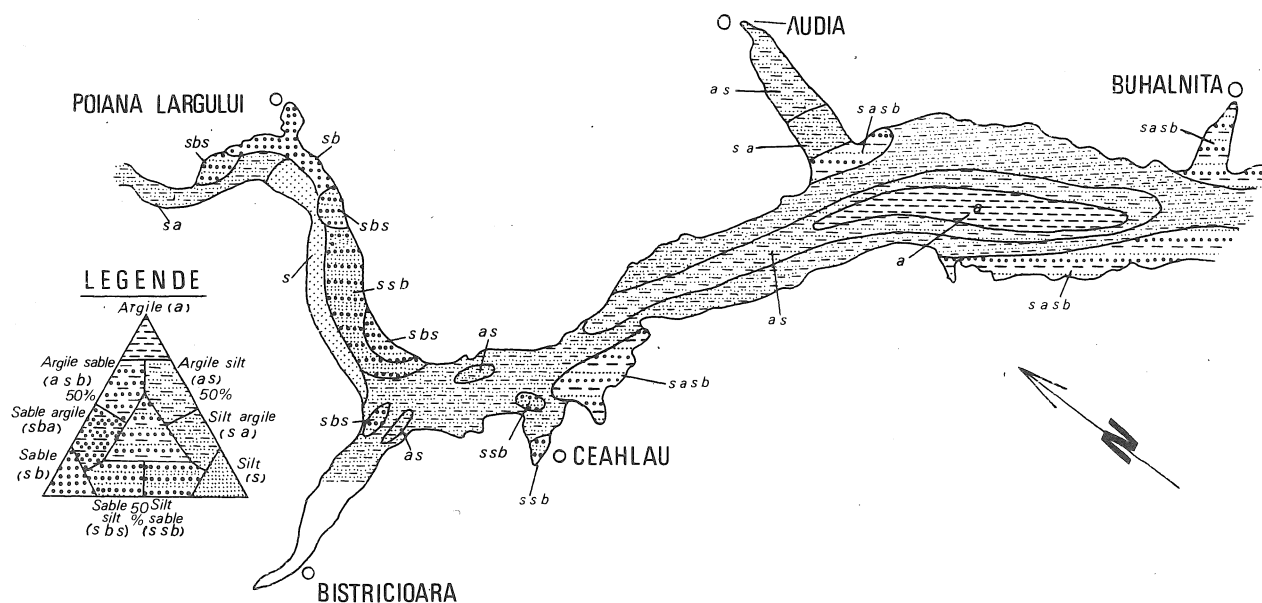


Figure 3.- Carte de la distribution des sédiments (classification granulométrique d'après SEPHARD, 1954).

### GRANULOMETRIE

L'analyse granulométrique de la partie grossière des échantillons a été faite par tamisage et par densimétrie pour la partie fine. Dans la description qualitative des échantillons, la fraction modale a été utilisée : gravier  $\phi > 2$  mm; sable  $2 \text{ mm} > \phi > 0,0625$  mm; silt  $0,0625 \text{ mm} > \phi > 0,004$  mm; argile  $\phi < 0,004$  mm (l'échelle Wentworth).

La carte granulométrique (fig. 2) montre la disposition spatiale des classes granulométrique à la partie superficielle des sédiments actuels. Pour une partie du lac, située en amont du village de Buhalnita, nous avons réalisé la carte de distribution des sédiments superficiels classés d'après la classification de F.D. SEPHARD (1963) (fig. 3).

Ces deux cartes granulométriques permettent quelques observations :

- A partir du village de Ceahlau vers l'amont du lac, les sédiments grossiers prédominent. Leur distribution spatiale se fait selon l'axe des principaux courants. La plus grande partie des sédiments sableux et silteux apportés par les rivières Bistrita et Bistricioara est déposée dans cette zone. Seuls les sédiments fins, en suspension, sont transportés par le

courant principal plus loin, vers l'aval. Le ruisseau Poiana Largu apporte des quantités importantes de sédiments grossiers qui gisent sous forme d'un cône de déjection localisé à son embouchure. Au débouché de la rivière Bistricioara, il n'existe pas de cône de déjections. La présence d'une crique profonde permet toujours l'accumulation des sédiments. D'ici quelques années, cette situation sera changée par suite du colmatage complet de la crique.

- En aval du village de Ceahlau jusqu'au barrage Bicaz la fraction fine prédomine dans les sédiments superficiels du lac. Marquant à la fois le trajet du courant principal et les grandes profondeurs, les sédiments fins occupent la zone centrale du lac et passent vers les rives à des fractions plus grossières. Les sédiments grossiers en bordure du lac, en aval du village de Ceahlau, représentent les sédiments apportés par les ruisseaux et les torrents latéraux (Schitul, Hangu, Buhalnita, Isvorul Alb, Potoci), par les eaux de ruissellement ou par les glissements de terrain (très actifs dans la zone d'affleurement des "couches de Hangu" - Nappe de Tarcau). A cause de la morphologie de la crique Audia, et par sa position éloignée du courant principal, le dépôt qui s'y accumule rappelle un sédiment de type deltaïque.

Les cartes granulométriques réalisées mettent en évidence la distribution de la classe granulométrique principale. Pour montrer le degré de mélange entre les trois fractions granulométriques principales sur la carte granulométrique (fig. 2), nous avons marqué les lignes d'isoentropie relative ( $H_r$ ). Cette entropie a été calculée d'après la formule de C.R. PELTO (in MILLER L.R., KAN S.J., 1962).

$$100 H_r = \frac{-100 \sum_1^n p_i \cdot \ln p_i}{H_m} \text{ ou :}$$

$H_r$  = entropie relative exprimée en ‰,

$p_i$  = probabilité d'apparition de chaque composant granulométrique,

$H_m$  = entropie maximale ( $H_m = 1,0988$  dans un système à trois composantes).

Les fortes valeurs d'entropie relative montrent le degré élevé du mélange granulométrique, c'est-à-dire des proportions presque égales entre les trois classes granulométriques choisies. Au contraire, les valeurs basses indiquent la prédominance d'une seule classe granulométrique.

Les valeurs d'entropie nous permettent de compléter les observations précédentes :

- En amont du village de Ceahlau les graviers-sables et les silt prédominent, mais les fortes valeurs d'entropie (80 à 90 ‰) nous indiquent que la présence d'argile est aussi importante. Ces grandes valeurs se trouvent au centre du lac, superposées dans l'axe du courant principal et diminuent progressivement vers les bords. En conséquence, on peut considérer que dans la zone centrale du lac, les sédiments sont mal triés et que l'entropie s'amorce de l'intérieur vers l'extérieur, là où les eaux du lac sont plus tranquilles.
- Entre Ceahlau et Buhalnita l'entropie présente un aspect différent. Au centre du lac, on trouve les valeurs les plus réduites (50 à 60 ‰), qui augmentent progressivement vers les rives. Les sédiments accumulés au centre du lac sont argileux et bien triés, mais, vers les bords, l'élu triage diminue. Cet aspect du régime de sédimentation est déterminé par l'accroissement de la largeur et de la profondeur du lac, par la diminution de la vitesse du courant principal, par le fait que celui-ci a déposé les sédiments grossiers dans la zone amont, par l'importance réduite des matériaux apportés par les ruisseaux latéraux et par la pente faible des versants.

- En aval du village de Buhalnita, jusqu'au barrage Bicaz l'entropie reprend le même aspect que dans la zone amont du lac. A quelques exceptions près, le centre du lac est occupé par de fortes valeurs d'entropie qui diminuent vers les bords. Les sédiments accumulés dans la zone centrale représentent un mélange des trois composantes granulométriques. Ils sont mal triés et dans ceux-ci l'argile est la fraction principale. On peut observer clairement que la répartition entropique et celle des sédiments sont contrôlées par la largeur réduite du lac, par une topographie beaucoup plus forte des versants et du fond, par l'augmentation de la vitesse du courant principal et par les quantités réduites de sédiments grossiers apportés par les ruisseaux latéraux dans cette zone.

Pour approfondir la connaissance des sédiments superficiels et du régime de sédimentation sur la base d'une partie des courbes granulométriques et en utilisant les formules de R.L. FOLK & W.C. WARD (1957) nous avons calculé certains paramètres granulométriques.

- la médiane (mode)  $M_d = P_{50}$
- la médiane arithmétique (mean)  $\bar{X} = \frac{P_{16} + P_{50} + P_{84}}{3}$
- la déviation standard (standard deviation)

$$\sigma = \frac{P_{84} - P_{16}}{4} + \frac{P_{95} - P_5}{6,6}$$

- l'assymétrie (Skewness)

$$S_k = \frac{P_{16} + P_{84} - 2P_{50}}{2(P_{84} - P_{16})} + \frac{P_5 + P_{95} - 2P_{50}}{2(P_{95} - P_5)}$$

- l'angulosité (Kurtosis)  $K = \frac{P_{95} - P_5}{2,44(P_{75} - P_{25})}$

Tous les paramètres granulométriques (Tableau 1) ont été calculés en unités  $\varphi$  (A. CAILLEUX & J. TRICART, 1959). Les diagrammes des rapports entre divers paramètres granulométriques obtenus ont été comparés avec les diagrammes de R.L. FALK & W.C. WARD (1957); D.S. CRONAN (1972); R.L. THOMAS; A.L.W. KEMP & L.F.M. LEWIS (1972).

Sur l'histogramme de la médiane ( $M_d$ ) (fig. 4) on remarque le caractère bimodal de la distribution, caractère donné par l'existence de deux maxima. Une maximum pour la valeur  $M_d = 2$  à  $3 \varphi$  ( $\cong 0,2$  mm diamètre).

Tableau 1.- Valeurs des paramètres granulométriques des sédiments du lac Bicz

Echantillon		$\bar{X}$	$\sigma$	$S_k$	K
N°					
1		5,95	-3,56	0,075	0,790
4		7,90	-2,17	0,043	0,952
5		7,03	-1,81	0,038	1,340
6		6,63	-2,12	-0,141	1,870
7		7,60	-1,55	-0,077	1,000
8		7,06	-2,01	0,002	1,280
9		8,06	-1,78	0,028	1,506
10		7,26	-1,73	-0,047	1,080
11		5,13	-2,62	-0,075	1,257
12		5,20	-2,91	0,019	1,710
13		7,50	-2,23	-0,037	0,807
14		4,06	-2,07	-0,387	1,830
15		7,36	-2,41	-0,230	1,080
16		7,73	-2,08	-0,148	1,030
17		7,23	-2,08	-0,130	1,260
18		8,10	-1,63	-0,063	1,000
19		9,93	-1,54	0,590	0,770
20		6,46	-2,35	-0,857	0,998
21		2,96	-4,41	-0,226	0,801
22		6,36	-3,38	0,186	0,692
23		3,36	-2,34	-0,082	1,370
24		4,80	-2,83	-0,758	0,691
25		6,43	-2,37	0,040	1,123
26		1,16	-2,44	-0,271	1,104
29		3,03	-0,46	-0,343	0,717
32		5,8	-2,42	-0,206	0,943
37		5,96	-2,75	-0,160	0,760
38		3,93	-1,35	-1,170	1,200
41		9,17	-2,30	-0,040	1,300
44		7,03	-3,31	0,081	0,901
45		7,03	-2,79	0,026	0,830
48		8,83	-2,02	0,140	1,400
51		8,63	-1,79	0,130	0,910
57		8,63	-1,69	-0,620	1,280
65		9,03	-1,51	-0,440	0,890
70		7,30	-6,17	0,034	0,920
74		9,20	-1,63	0,610	1,104
87		7,80	-2,65	0,085	0,820
93		6,76	-2,54	0,320	0,540
102		8,43	-2,06	0,060	1,060
104		7,46	-1,40	0,720	0,580
90		8,23	-2,62	0,100	1,050

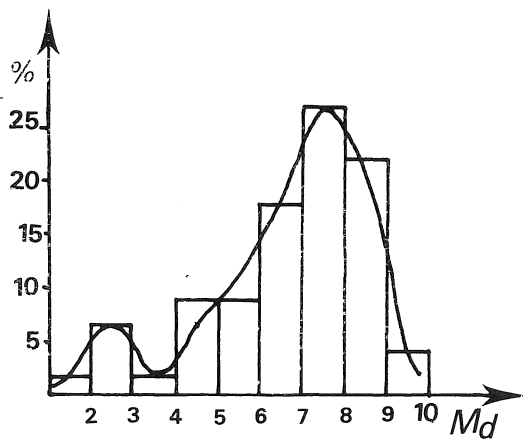


Figure 4.- Histogramme de la médiane  $M_d$

et un autre plus important pour  $M_d = 7 \text{ à } 8 \varphi (\cong 0,005 \text{ mm}$  diamètre). Ce caractère bimodal s'explique par le mauvais tri des sédiments. Pour la zone étudiée il définit les sédiments superficiels comme un mélange de sable fin et de silt en association avec une fraction argileuse.

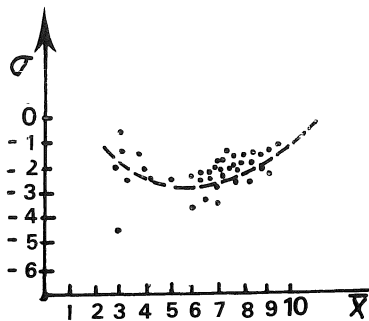


Figure 5.- Diagramme  $\sigma/\bar{X}$

Sur le diagramme de la variation de la déviation standard ( $\sigma$ ) en rapport avec la médiane arithmétique ( $\bar{X}$ ) (fig. 5),  $\bar{X}$  a une tendance à décroître de l'extérieur vers l'intérieur du diagramme sous forme d'un demi cercle. Le minimum de ce demi cercle correspond à la valeur  $\bar{X} = 6$ , c'est-à-dire au diamètre des grains de 0,016 mm (le domaine du silt). Cet aspect du diagramme montre l'existence dans le lac d'une importante énergie liée à un système unidirectionnel du transport principal des sédiments.

Le rapport entre ( $\bar{X}$ ) et l'assymétrie ( $S_k$ ) (fig. 6) présente une faible tendance linéaire avec plusieurs échantillons disposés autour du  $S_k = 0$ . La distribution des points sur le diagramme indique une assymétrie négative pour les échantillons prélevés au centre du lac et une assymétrie positive pour les échantillons proches

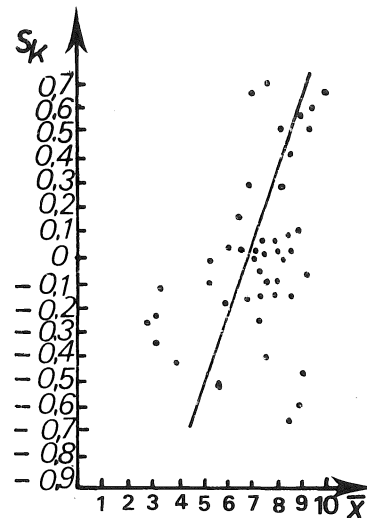


Figure 6.- Diagramme  $S_k/\bar{X}$

des rives du lac. Cette distribution est déterminée par l'importance du pourcentage des silts dans chaque échantillon analysé et par suite de l'apparition d'une assymétrie positive ou négative dans les populations des termes finaux (argile et sable-gravier).

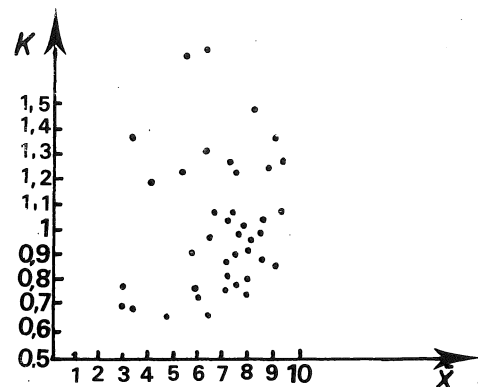


Figure 7.- Diagramme  $K/\bar{X}$

La variation de ( $\bar{X}$ ) en rapport avec l'angulosité ( $K$ ) (fig. 7) montre une distribution très dispersée des échantillons analysés. Cet aspect indique que les populations des termes finaux (argile et sable-gravier) ont un ( $K$ ) relativement élevé. Le diagramme doit être interprété comme le reflet d'un faible degré du triage et d'une mauvaise division en zones granulométriques des bords vers le centre du lac.

Le diagramme du rapport en ( $K$ ) et ( $S_k$ ) (fig. 8) ne met pas en évidence des distributions qui peuvent indiquer un bon tri. Le fait qu'une grande partie des échantillons analysés soient regroupés autour des valeurs  $S_k = 0$  et  $K = 1$  (ces valeurs indiquent un très

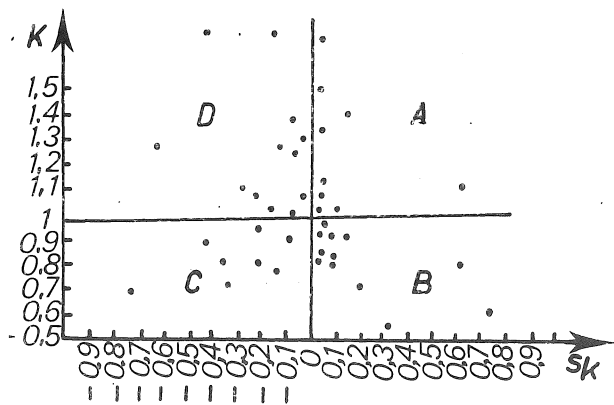


Figure 8.- Diagramme  $K/S_k$

bon tri) montre l'existence dans le lac, de zones sédimentaires présentant un tri poussé. Un bon exemple est la zone Ceahlau - Buhalnita dans laquelle on remarque la disposition zonaire du sédiment à partir de la fraction grossière (rives du lac) à la fraction fine (au centre du lac).

Sur le diagramme ( $K$ ) en rapport avec ( $S_k$ ) on peut distinguer quatre zones avec des significations distinctes :

- La zone A (la population du terme final est le sable et l'asymétrie est positive) représente une zone d'énergie élevée que l'on observe près des rives du lac ou aux débouchés des ruisseaux (Hangu, Schitu, Bistricioara).

Les zones d'énergie élevée qui ne sont pas liées au débouché des ruisseaux se trouvent tantôt sur une rive du lac, tantôt sur l'autre et sont fonction de la direction d'écoulement et de la zone d'érosion du courant principal (fig. 9).

- La zone D (la population du terme final est l'argile et l'asymétrie est négative) représente une zone de faible énergie. Elle constitue la zone d'accumulation des sédiments fins, en suspension et se dispose toujours au centre du lac.
- Les zones B et C représentent des transitions entre les zones A et D et elles reflètent les changements de structure granulométrique des sédiments. La distribution dans ces zones est en concordance avec les oscillations du niveau de l'eau, oscillations qui produisent d'importantes variations dans la valeur et dans la distribution d'énergie. Ces variations d'énergie sont très importantes pour la sédimentation dans les zones à faible profondeur et spécialement pour la zone Ceahlau-Poiana Largu.

#### COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

La composition minéralogique du sable a été examinée sur quelques échantillons prélevés de la zone Ceahlau-Poiana Largu. Pour l'examen minéralogique nous avons choisi la classe granulométrique 0,125 à 0,05 mm., classe prédominante dans tous les échantillons analysés. Dans cette classe le contenu en minéraux

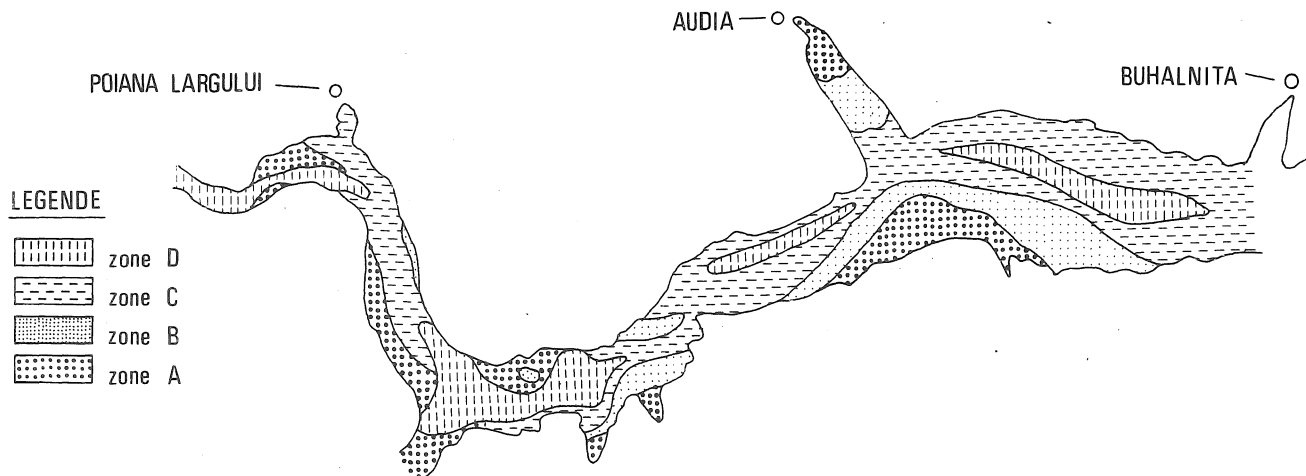


Figure 9.- Distribution des zones A B C D dérivées du diagramme  $K/S_k$



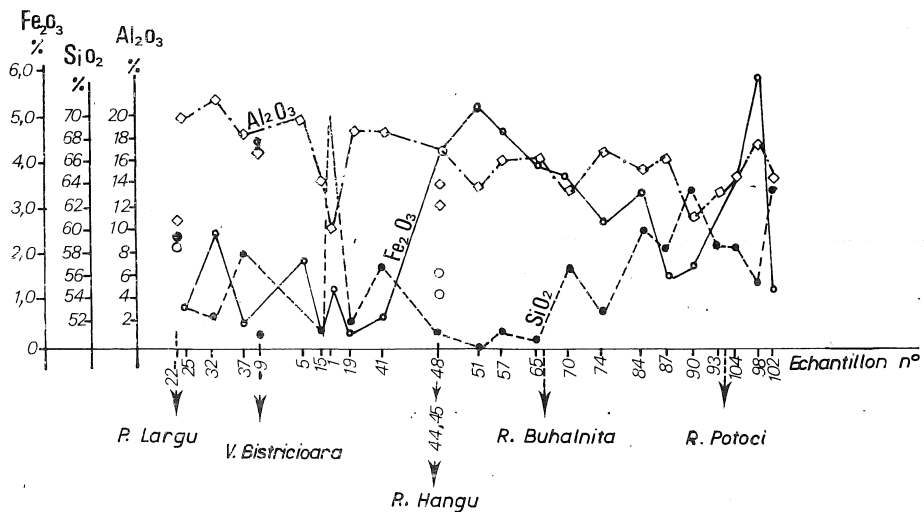
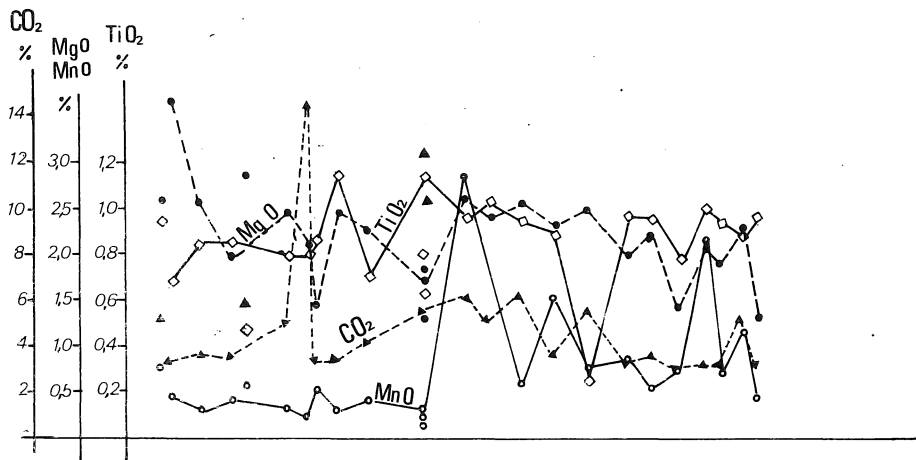
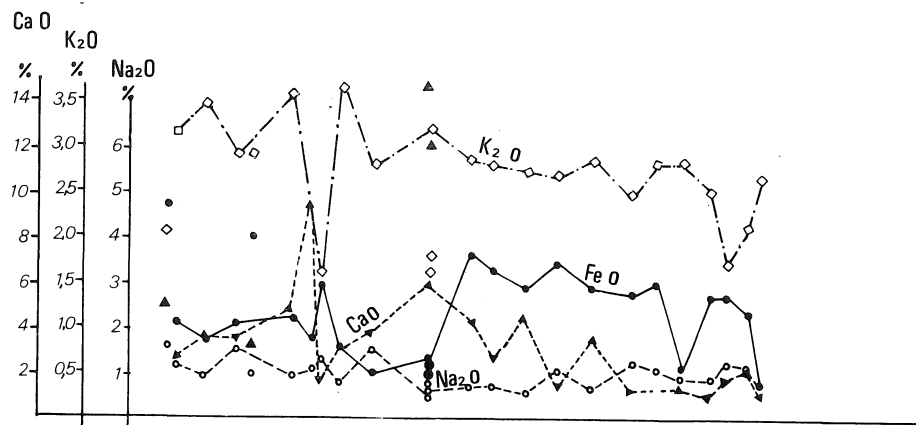


Figure 10.- Composition chimique des sédiments

lourds varie entre 2,47 o/o à 3,40 o/o.

Les échantillons analysés contiennent les minéraux lourds suivants : grenat, hornblende verte et noire, tourmaline, zircon, rutile, titanite, apatite, staurotite, hypersthène, augite, limonite, hematite et ilménite.

Le grenat, d'habitude l'almandin est en grandes quantités dans tous les échantillons analysés, sous forme de fragments angulaires. On trouve de petites quantités de tourmaline dans tous les échantillons. Elle est sous forme de fragments prismatiques ou irréguliers.

Le zircon se présente sous forme de prismes courts, rarement bipiramidés; il en est de même pour le rutile qui apparaît fréquemment sous forme de fragments ou de prisme courts.

Après les grenats, les amphiboles représentent les minéraux lourds les plus fréquents dans les échantillons analysés. Leur pourcentage diminue toutefois du ruisseau Poiana Largu vers Ceahlau, c'est-à-dire de l'amont vers l'aval.

Le groupe des minéraux légers dans la fraction grossière analysée est composé par : du quartz, des feldspaths, de la muscovite, de la biotite, de la chlorite, de l'épidote et par divers fragments de roches.

Le quartz représente 40 à 60 o/o de la fraction analysée; il est souvent sous forme de fragments à extinction ondulante, ce qui indique une origine cristallographyenne.

Fréquemment les feldspaths sont potassiques et plus rarement sodiques (oligoclase-andésine). Localement la biotite peut être très abondante en association avec la muscovite ou encore remplacée totalement par celle-ci. On trouve aussi la chlorite en association avec la biotite.

Les fragments de roches, souvent très abondants, sont formés par des micaschistes, des schistes, des grès et d'autres roches.

D'après l'association des minéraux, les fragments de roches, la configuration du réseau hydraulique et la distribution des sédiments, on peut considérer que la plupart des sédiments détritiques étudiés ont leur source dans la zone des schistes cristallins des Carpathes orientales. L'association des minéraux lourds a comme source probable le massif Rodna, les montagnes Bistrîta, le massif synéctique de Ditrau et le massif éruptif de Calimani.

La composition minéralogique des argiles a été étudiée par analyse thermo-différentielle. Dans tous les échantillons examinés prédomine l'illite à laquelle sont associés, en proportions variables, des hydroxides

de fer, du quartz, de la calcite, de la kaolinite, des sulfures et des substances organiques. La prédominance de l'illite montre que les argiles sont formés par l'accumulation dans le lac Bicaz de produits d'altération des micaschistes (à muscovite), de gneiss, de roches quartzzeuses et à sericite. Cette prédominance de l'illite montre une fois encore, que les schistes cristallins des Carpathes orientales représentent la source principale des sédiments. Cette conclusion est en concordance avec ce qui ressort de l'examen de l'association des minéraux lourds.

### COMPOSITION CHIMIQUE

Pour compléter les connaissances concernant la composition des sédiments superficiels du lac Bicaz, nous avons effectué 25 analyses chimiques totales pour les oxydes :  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$  et 102 analyses spectrales quantitatives qui ont permis l'identification de 25 éléments chimiques (Si, Fe, Al, Ti, Mn, Ca, Mg, Na, K, Zr, Cr, Pb, Zn, Cu, Co, Ni, Sn, V, W, Ag, Ga, Bi, Sr, Mo).

Dans les échantillons analysés le contenu en  $\text{SiO}_2$  varie entre 50 à 60 o/o. Sur le diagramme (fig. 10) du contenu on peut distinguer trois tronçons :

- le tronçon en amont de l'embouchure du ruisseau Hangu (échantillon 41), correspondant aux sédiments détritiques grossiers et dans lesquels le contenu en  $\text{SiO}_2$  montre une faible diminution de l'amont vers l'aval.
- le tronçon situé entre les embouchures des ruisseaux Hangu (Audia) et Buhalnita, correspondant aux sédiments argileux et dans lesquels le contenu en  $\text{SiO}_2$  est le plus faible.
- le tronçon s'étendant en aval du ruisseau Buhalnita dans lequel le contenu en  $\text{SiO}_2$  augmente progressivement. Cette augmentation correspond à la zone des hautes valeurs d'entropie et des sédiments argilo-détritiques dans lesquels le quartz est abondant.

Le diagramme du contenu en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  montre un abaissement continu de celui-ci en direction du barrage. Il est étonnant de constater que dans le tronçon Hangu-Buhalnita où les sédiments argileux sont prédominants et bien triés, le contenu en alumine ne révèle pas d'augmentation notable. Au contraire dans les zones d'embouchure des ruisseaux Hangu (échantillon 51) et Buhalnita (échantillon 70) on constate un abaissement brusque de la teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Cet aspect du diagramme en corrélation avec les autres diagrammes des contenus en oxydes nous oblige à considérer qu'il existe, outre l'argile, d'autres minéraux dans les sédiments fins du lac Bicaz.

Très intéressant est le diagramme du contenu en  $Fe_2O_3$ . Sur celui-ci l'embouchure du ruisseau Hangu constitue la limite de deux zones distinctes. Dans la zone amont, avec un contenu moyen en  $Fe_2O_3$  plus réduit que dans la zone aval, chaque embouchure de ruisseau (Poiana Largu, Bistricioara, Schitu) est marqué sur le diagramme par une brusque augmentation du contenu en  $Fe_2O_3$ . A peu de distance de l'embouchure le contenu en  $Fe_2O_3$  diminue rapidement. La zone aval du ruisseau Hangu, est caractérisée par des contenus en  $Fe_2O_3$  beaucoup plus élevés que la zone amont. Sur cette partie du diagramme au niveau du ruisseau Hangu, le contenu en  $Fe_2O_3$  augmente brusquement (échantillon 51) pour diminuer progressivement après l'embouchure.

D'autres augmentations brusques du contenu en  $Fe_2O_3$  correspondent au ruisseau Isvoru Alb et plus spécialement au ruisseau Potoci.

Le contenu élevé en  $Fe_2O_3$  de la zone aval s'explique par les importantes quantités de solutions riches en Fe amenées dans le lac par les ruisseaux Hangu, Buhalnita, Potoci, qui traversent les "schistes noirs", formation géologique riche en Fe et en Mn. Les grosses fluctuations de contenu en  $Fe_2O_3$  marquées sur le diagramme par des augmentations brusques au niveau des embouchures des ruisseaux peuvent être expliquées par une intense précipitation dans la zone de contact entre les eaux des ruisseaux et l'eau du lac, précipitation éventuellement déterminée par le changement de pH. Cette explication est soutenue par le fait que les sédiments accumulés dans la crique Audia (échantillons 44 et 45) ont des contenus plus bas que les sédiments accumulés à l'avant de celle-ci. L'eau de la crique Audia a un pH plus proche de celui du ruisseau Hangu.

Sur les diagrammes MnO et FeO on peut distinguer les deux zones existantes sur le diagramme du  $Fe_2O_3$  (fig. 10). Dans la zone amont du ruisseau Hangu les contenus en MnO et FeO sont faibles, sans fluctuations importantes on n'observe pas d'influence des apports latéraux. La zone aval du ruisseau Hangu est caractérisée par des contenus élevés en MnO et FeO, et par de grandes fluctuations par suite d'apports latéraux très importants. Comme dans le cas du  $Fe_2O_3$ , les ruisseaux Hangu, Buhalnita et Potoci apportent de grandes quantités de Mn et de Fe en solution, qui sont immédiatement précipitées dans les zones de changement de pH.

Les oxydes alcalins, spécialement Na, ont des contenus remarquablement constants. Cette constance montre une très bonne distribution des éléments dans les sédiments du lac; les faibles venues latérales doivent compenser les quantités précipitées en amont.

Le diagramme en MgO, de l'amont à l'aval du lac, montre une décroissance progressive se faisant en trois parties. La première concerne la zone du lac en amont du ruisseau Hangu et représente les apports de la rivière Bistrita. La deuxième et la troisième parties du diagramme concernent la zone du lac en aval du ruisseau Hangu. Leurs pics sur le diagramme mettent en évidence les importantes quantités de MgO déversées dans le lac par les ruisseaux Hangu et Potoci, et qui précipitent immédiatement après l'arrivée de ces solutions dans le lac.

Les diagrammes en CaO et  $CO_2$  sont similaires. Sur les deux diagrammes, on remarque des fluctuations entre 1,12 % et 14,70 %. En général, les valeurs sont faibles (moins de 6 %) mais seulement 3 analyses (échantillons 15, 44 et 45) ont des valeurs élevées comparativement aux autres. Le faible contenu en CaO et en  $CO_2$  indique la nature argileuse des sédiments analysés et de faibles valeurs en  $CaCO_3$ . Des valeurs élevées sont enregistrées au niveau des ruisseaux Schitu et Hangu qui traversent des roches riches en  $CaCO_3$  (marnes, couches marneocalcaires, conglomérats, etc. ...) appartenant aux "couches de Sinaia" aux "couches de Bistra", aux "couches de Hangu" et aux "conglomérats" de Ceahlau.

La corrélation entre les diagrammes des contenus en  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , MnO, MgO, FeO et du CaO permet de tirer quelques considérations sur les sédiments superficiels qui s'accumulent au centre du lac, entre Ceahlau et Buhalnita. Les analyses granulométriques nous ont permis de définir ces sédiments comme argileux, bien triés, relativement homogènes, qui par diagénèse peuvent aboutir à une roche schisteuse. Les analyses chimiques totales ont permis de partager ce sédiment argileux en deux zones. Une zone située en amont du ruisseau Hangu, pauvre en Fe, Mn et Mg et qui, par diagénèse, peut donner un schiste argileux et localement (la zone d'échantillon 15) des marnes. En aval du ruisseau Hangu, les mêmes sédiments argileux contiennent moins d' $Al_2O_3$  et de  $SiO_2$ , mais ils sont riches en Fe, Mn et Mg, ainsi qu'en Ca et  $CO_2$ . La roche qui, par diagénèse, sera formée à partir de ces sédiments aura probablement un autre caractère pétrographique que celle de la zone précédente. Il est possible que, par diagénèse, ces sédiments pourront évoluer vers un schiste sidéritique, ou vers une roche riche en Mn et en Mg.

Les analyses spectrales semi-quantitatives ont mis en évidence dans les sédiments du lac Bicaz, la présence

d'une série d'éléments chimiques pouvant avoir un certain intérêt économique (Ti, Zr, Co, Ni, V, B, Ga, Ar, La). La distribution du contenu de chaque élément chimique dans le lac montre que, pour la plupart de ces éléments, la source se trouve en amont du lac, sans doute dans la zone d'affleurement des schistes cristallins des Carpathes orientales. Cependant, la distribution du V et du Ga (plus riches dans les sédiments du lac en aval du ruisseau Hangu) suggère que les "schistes noirs" puissent être une source supplémentaire pour ces deux éléments chimiques.

Les concentrations de ces éléments chimiques dans les sédiments du lac diffèrent d'un élément à l'autre, en fonction de leurs affinités, de l'état physique. Les concentrations de Ti et de Zr sont liées aux sédiments détritiques, les concentrations en Ni, Co, Mn, V, Ga, aux sédiments fins.

### CONCLUSION

L'étude des sédiments accumulés dans le lac du barrage Bicaz nous a permis de mettre en évidence la granulométrie et la distribution spatiale de divers types de sédiments, leur composition minéralogique et la présence de plusieurs éléments chimiques.

Le régime sédimentation du lac Bicaz a un caractère complexe qui permet de définir trois régime de sédimentation bien distinctes :

- un régime à sédimentation très variable, contrôlé par les oscillations du niveau du lac, par les vagues et par la topographie. Dans les zones à faible profondeur, il n'y a pas d'accumulation annuelle continue des sédiments. Ce régime de sédimentation caractérise la zone lacustre en amont du village de Ceahlau, zone où s'accumulent la plupart des sédiments transportés par les rivières Bistrita et Buhalnita. Les vagues et les oscillations du niveau remobilisent et redistribuent les sédiments, spécialement les sédiments fins, empêchant la répartition granulométrique zonale classique, c'est-à-dire les sédiments grossiers vers les rives et les sédiments fins vers le centre du lac.
- un régime à sédimentation constante contrôlé par des facteurs de sédimentation qui restent relativement constants pendant la durée d'une année. Ce régime de sédimentation est matérialisé par la distribution granulométrique zonale des sédiments, de la fraction grossière à la fraction fine des bordures au centre du lac. Ce schéma est caractéristique de la zone Ceahlau-Buhalnita, zone où le lac devient de plus en plus profond et a la plus grande largeur. Ce régime est spéci-

fique des grands lacs et a été mis en évidence par les études des sédiments superficiels dans les lacs Léhman, Ontario, Erie.

- en aval du village de Buhalnita jusqu'au barrage, par suite de la forte diminution de la largeur du lac, le régime de sédimentations est mixte, avec des caractères qui appartiennent aux régimes de sédimentations distinguées plus haut. On observe que dans cette zone la distribution des sédiments est zonale, spécifique d'un régime à sédimentation constante, mais avec une distribution entropique spécifique d'un régime de sédimentation variable.

Les schistes cristallins des Carpathes orientales sont la source de la plus grande partie des sédiments accumulés dans le lac Bicaz, spécialement dans la zone en amont du village de Ceahlau. En aval de celle-ci le bassin versant entourant le lac fournit une grande partie des sédiments qui s'y accumulent.

### BIBLIOGRAPHIE

- BERTHOIS, L., & FILIPESCU, M., 1939. Sables de la Bistritza et de la Bistricioara. Bull. Sect. Scient. Acad. Roum., XXI : 9-10.
- CAILLEUX, A., & TRICART, J., 1959. Initiation à l'étude des sables et galets, C.D.U., Paris.
- COLBY, B.R., 1963. Fluvial sediments. A summary of source, transportation, deposition and measurement of sediment discharge. Geol Survey Bull., 1081 - A.
- CRONAN, D.S., 1972. Skewness and Kurtosis in polymodal sediments from the Irish Sea. J. Sed. Petrology, 42, nr 1.
- DAVIS, W.M. & EHRLICH, R., 1970. Relationship between measures of sediment size. Frequency distributions and the nature of sediments. Geol. Soc. Am. Bull., 81.
- FOLK, L.R. & WARD, W.C. 1957. Brazos River bar : a study in the significance of grain size parameters. J. Sed. Petrology, 27.
- KRUMBEIN, W.C. & SLOSS, L.L., 1963. Stratigraphy and sedimentation. Freeman and Co., San Francisco.
- MILLER, L.R. & KAN, S.J., 1962. Statistical geological sciences. John Wiley and Sons, N.Y.-London.
- PARFENOFF, A., POMEROL, C. & TOURENQ, J., 1970. Les minéraux en grains. Méthodes d'étude et détermination. Ed. Masson, Paris.
- SHEPARD, F.D., 1963. Submarine geology. Harper and Row., N.Y.
- SUTTON, R.G., LEWIS, T.L. & WOORDROW, D.L., 1974. Sand dispersal in eastern and southern lake Ontario. J. Sed. Petrology, 44, nr 3.
- THOMAS, R.L., KEMP, A.L.W. & LEWIS, C.F.M., 1972. Distribution, composition and characteristics of the superficial sediments of lake Ontario. J. Sed. Petrology, 42, nr 1.
- 1973 : Carte géologique de la République Socialiste de Roumanie, échelle 1 : 200.000. Feuilles n° 12 Toplita et n° 13 Piatra Neamt. Institut géologique, Bucarest.