

Aspects hydrologique, géochimique et sédimentologique de la crue exceptionnelle de la Dranse du Chablais du 22 septembre 1968

Autor(en): **Hubert, Pierre / Marin, Elizabeth / Meybeck, Michel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Archives des sciences [1948-1980]**

Band (Jahr): **22 (1969)**

Heft 3

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-739157>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

ASPECTS HYDROLOGIQUE, GÉOCHIMIQUE ET SÉDIMENTOLOGIQUE DE LA CRUE EXCEPTIONNELLE DE LA DRANSE DU CHABLAIS DU 22 SEPTEMBRE 1968

PAR

**Pierre HUBERT — Elizabeth MARIN — Michel MEYBECK
Philippe OLIVE — Erik SIWERTZ¹**

INTRODUCTION

L'orage très violent du 21 septembre 1968 qui s'est abattu notamment sur le Chablais, a provoqué une importante crue de la Dranse; le débit de cette rivière a été multiplié par 20 dans l'espace d'une journée. Outre des effondrements en divers points de la route qui emprunte cette vallée, les culées du pont de Vongy ont été affouillées... On peut recenser, depuis le xv^e siècle, une trentaine de crues de cette importance, le pont de Vongy ayant alors été partiellement ou totalement détruit environ une demi-douzaine de fois.

Nous avons pu faire un certain nombre d'observations, de prélèvements et d'analyses, dans des domaines variés (hydrologie, sédimentologie, hydrochimie, géochimie), nous permettant de préciser quelques aspects dynamiques de cette crue exceptionnelle.

LE BASSIN DES DRANSES

Le bassin d'alimentation de la Dranse, d'une altitude moyenne de 1450 m, couvre dans le Chablais une superficie d'environ 535 km². L'exutoire de ce bassin se situe dans le Léman, à l'est de Thonon (figure 1).

Les précipitations (pluie, neige...) sur ce bassin, sont de l'ordre de 1500 mm par an (1539 mm en moyenne à la station d'Abondance de 1951 à 1961), et sont à l'origine d'un débit moyen interannuel de la Dranse de 21,3 m³/s (moyenne établie pour la station de Bioge de 1958 à 1967).

¹ Centre de Recherches Géodynamiques, (Université de Paris) Thonon. Présentés par M. E. Lanterno, membre ordinaire.

L'altitude moyenne de ce bassin étant assez élevée, il en résulte que le régime de la Dranse est de type nivo-pluvial mixte avec un maximum principal en mai, lors de la fonte des neiges, et un maximum secondaire en novembre-décembre (figure 1).

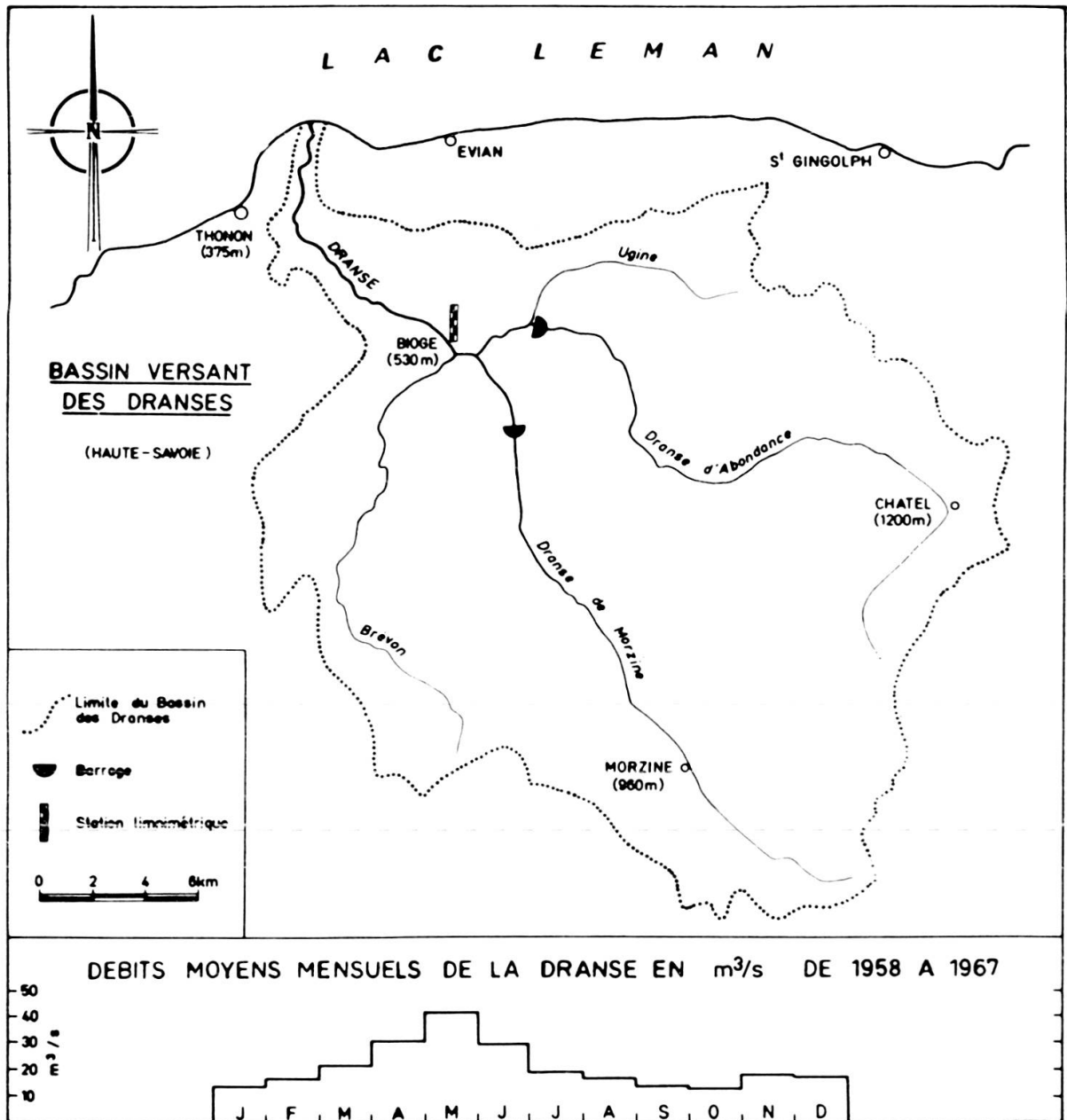


FIG. 1.

On remarque que la crue du 22 septembre 1968 se situe dans la période d'étiage. Cette crue ne rentre donc pas dans le régime habituel de la Dranse, mais a été déclenchée par un violent orage.

L'ORAGE DU 21 SEPTEMBRE 1968

Nous avons pu étudier les précipitations consécutives à cet orage grâce à nos stations pluviométriques et à celles de l'Electricité de France. Le maximum de précipitations a eu lieu sur la région de Morzine. Du 21 septembre à 2 heures au 22 septembre à 4 heures, 176 mm d'eau sont tombés (figure 2). On mesure l'importance de

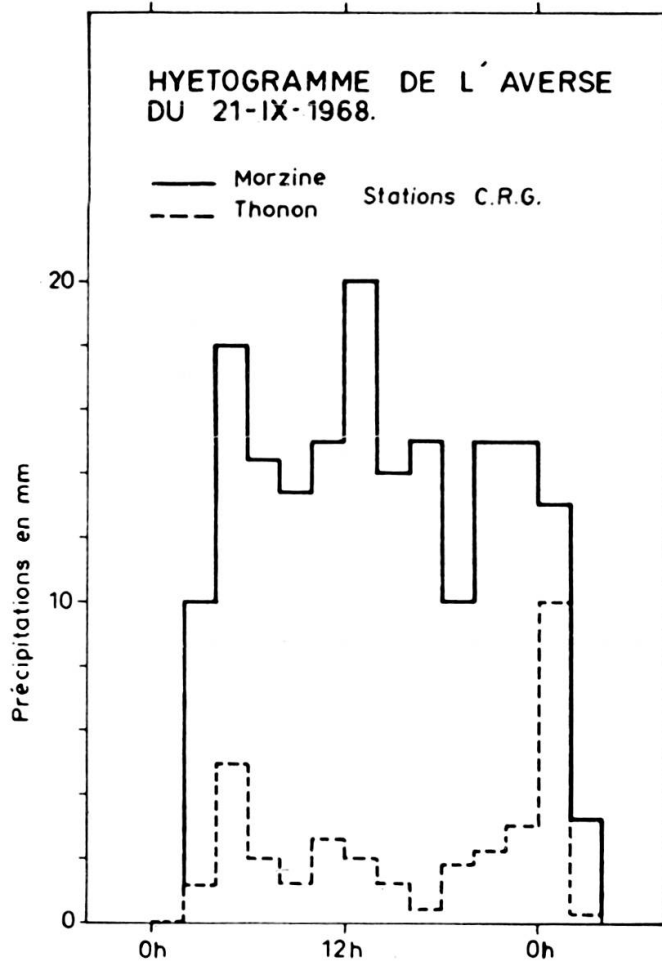


FIG. 2.

cet orage en comparant avec la moyenne des précipitations du mois de septembre à Morzine: 126 mm (moyenne établie de 1935 à 1960). Il est tombé, en 26 heures, 80% des précipitations du mois de septembre 1968; l'intensité de cet orage s'élève donc à $\frac{176 \text{ mm}}{26 \text{ h}}$, soit 6,8 mm/h. On peut comparer cette valeur avec celle de l'orage dévastateur des 2 et 3 octobre 1888 pendant lequel il est tombé 230 mm en 48 heures, l'intensité étant alors de 4,8 mm/h.

Cet orage se situe de façon inhabituelle dans la répartition annuelle des pluies. En effet, juin avec une moyenne de 174 mm établie de 1935 à 1960, est le mois le plus pluvieux de l'année.

Afin de déterminer la quantité d'eau tombée sur le bassin, nous avons tracé les courbes d'égale hauteur d'eau (carte des isohyètes: figure 3) pour les 21 et 23 sep-

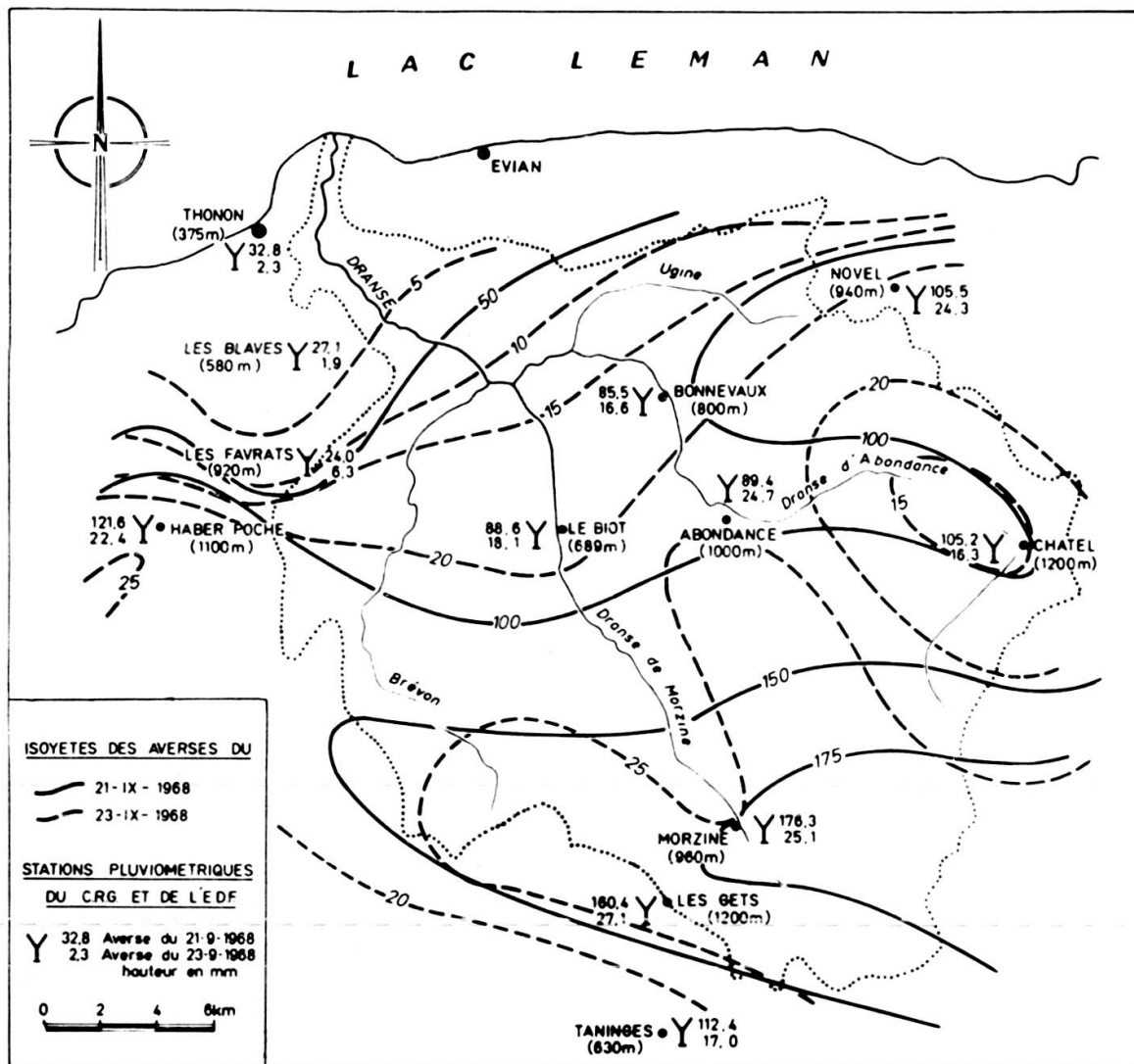


FIG. 3.

tembre. Sachant qu'un millimètre d'eau sur 1 km² représente un volume de 10³ m³, on aboutit au résultat suivant:

Orage du 21 septembre: 60 10⁶ m³

Averse du 23 septembre: 11 10⁶ m³

TOTAL: 71 10⁶ m³

Pour ce calcul, le bassin versant est fermé à la station de Bioge, ce qui représente une surface de 497 km².

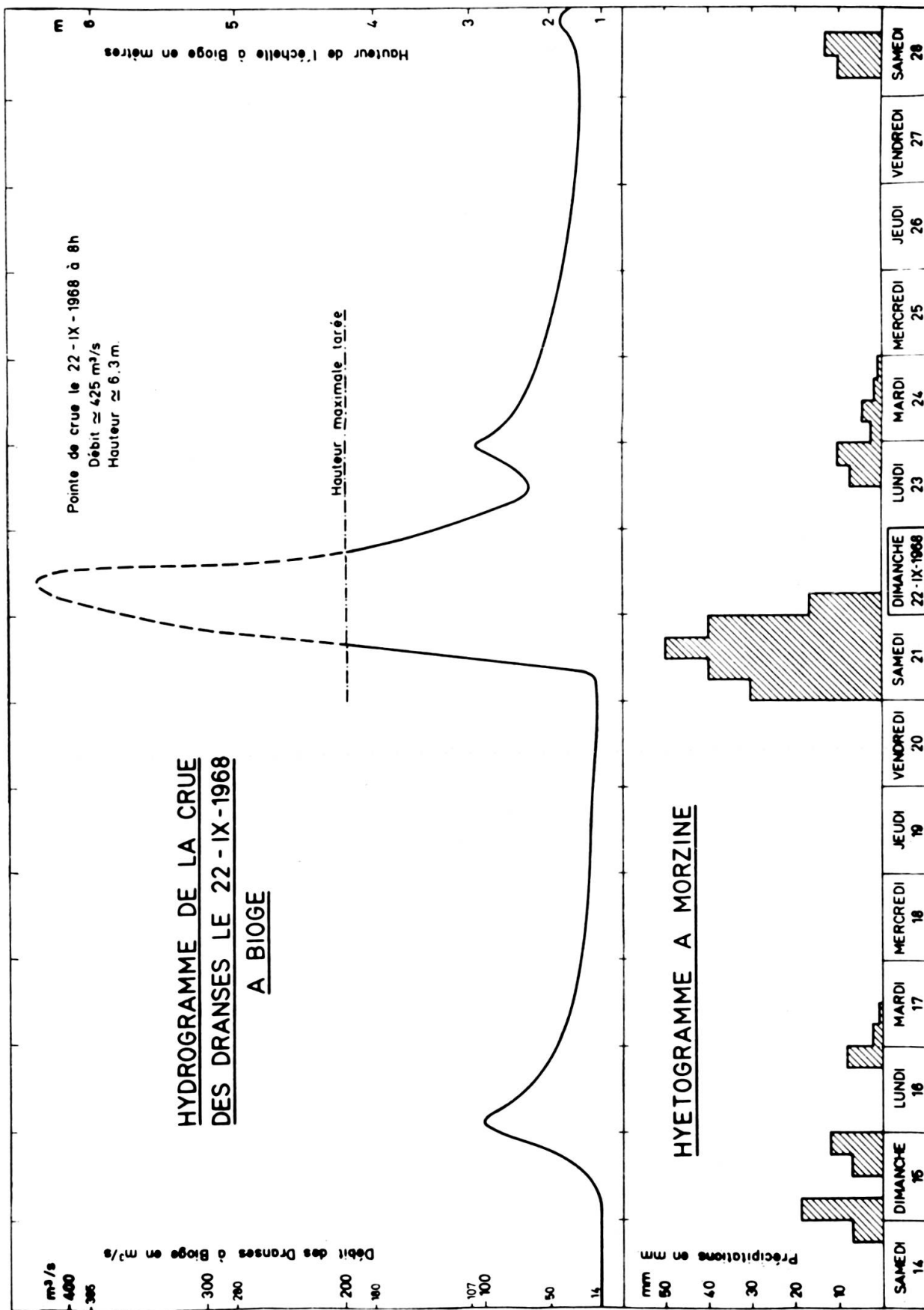


FIG. 4.

Comme nous le verrons plus loin (figure 4), $62 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ sont passés à la station de jaugeage de Bioge entre le 21 septembre à 8 heures (début de la crue) et le 26 septembre à 24 heures (fin de la décrue). Le coefficient de ruissellement, évalué par le rapport du volume d'eau de ruissellement (volume total écoulé diminué du volume apporté par les eaux souterraines à $20 \text{ m}^3/\text{s}$) au volume des précipitations est de 0,73; environ 70% des précipitations ont donc ruisselé et ont été évacuées vers le lac durant cette période. Généralement 20% des précipitations seulement empruntent ce trajet rapide, le reste s'infiltrant ou s'évaporant. La valeur exceptionnelle de ce coefficient s'explique par le fait que les terrains étaient saturés d'eau à la suite de la pluie du 15 septembre (figure 4).

DONNÉES HYDROLOGIQUES SUR LA CRUE DU 22 SEPTEMBRE 1968

Par chance, le limnigraphe installé au pont de Bioge n'a pas été emporté par le flot. En effet, à cet endroit le niveau de la Dranse est monté de 1 m 20 à 6 m 30 c'est-à-dire jusqu'au niveau du tablier du pont. La courbe de tarage de la Dranse avait été établie jusqu'à une hauteur de 4 m, aussi nous avons dû extrapoler cette courbe au-delà de cette hauteur (figure 4). On peut cependant envisager un débit, lors de la pointe de crue, de $425 \text{ m}^3/\text{s}$, la précision sur cette valeur étant d'environ 20%.

Rappelons (figure 1) que le débit moyen en septembre, calculé de 1958 à 1967, est de $14 \text{ m}^3/\text{s}$, et que les crues ordinaires atteignent seulement des débits de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (par exemple $150 \text{ m}^3/\text{s}$ le 3 août 1968 et le 9 octobre 1968).

Nous avons remarqué précédemment (figure 1) que la montée annuelle des eaux de la Dranse a lieu au moment de la fonte des neiges, vers le mois de mai, et que les crues ordinaires semblent se répartir sur toute l'année. En consultant divers documents historiques, on a pu déterminer les fréquences relatives des crues exceptionnelles ayant retenues l'attention des chroniqueurs (MOUGIN, 1914) (figure 5). On constate que plus de la moitié de celles-ci se produisent de septembre à novembre; les autres se répartissent de façon égale durant le reste de l'année avec une diminution sensible de décembre à février.

Le tableau ci-dessous donne la répartition saisonnière des précipitations à Morzine, établie sur des données de 1935 à 1960 (SAYAR, 1966):

Décembre — janvier — février	423 mm	} TOTAL: 1600 mm
Mars — avril — mai	310 mm	
Juin — juillet — août	483 mm	
Septembre — octobre — novembre	384 mm	

La faible fréquence des crues exceptionnelles durant les mois d'hiver est aisément explicable: les précipitations restent alors bloquées sous forme de neige. Ces crues correspondent à des périodes de redoux (16 et 17 janvier 1739, février 1753...).

Les crues de mars-avril-mai sont dues à la conjonction de la fonte des neiges et d'orages. Les crues de juin-juillet-août s'expliquent par le maximum annuel de pluviosité qui a lieu dans cette région en juin et en août (174 mm en juin et 160 mm en août à Morzine). La fréquence maximale des crues exceptionnelles durant les mois

FREQUENCES RELATIVES, PAR TRIMESTRES DES CRUES EXCEPTIONNELLES DE LA DRANSE DEPUIS LE 15^{ème} SIECLE

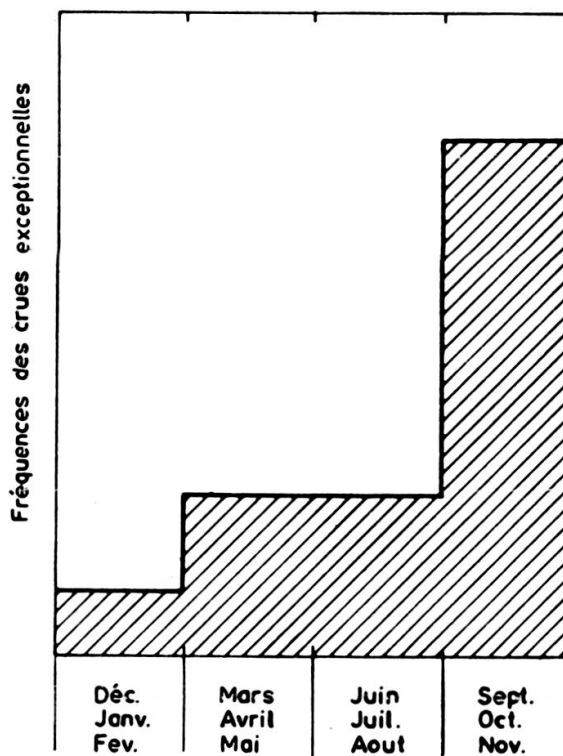


FIG. 5.

de septembre, d'octobre et de novembre s'explique par le fait que les précipitations non négligeables à cette époque, ont lieu sur des terrains saturés en eau après la période pluvieuse estivale. Des précipitations violentes et longues, sur des sols gorgés d'eau, entraînent un fort ruissellement, comparable à celui que nous avons précédemment calculé; toutes les conditions sont alors réunies pour la formation d'une très forte crue. Le maximum de probabilité se situe donc vers la fin de l'été et le début de l'automne: la crue aura lieu à la suite d'une ou deux averses, l'intensité de la dernière étant au moins de 5 mm/h pendant 24 heures.

ÉROSION ET TRANSPORT DES MATIÈRES SOLIDES

La lame d'eau qui a ruisselé sur les versants, l'onde de crue qui en a résulté ont provoqué une érosion mécanique du substratum et une mise en solution d'éléments chi-

miques. Ces matières en suspension et en solution ont été ensuite entraînées vers le lac.

Nous avons pu mesurer la concentration C_s des matières en suspension charriées par la Dranse¹ (tableau I). Il est généralement admis que la charge solide C_s et le débit liquide Q_1 sont liés par une loi de la forme:

$$C_s = A \cdot Q_1^k.$$

Les valeurs des constantes A et k dépendent en premier lieu du bassin étudié, (climatologie, relief, nature des terrains...). D'après une étude détaillée des écarts à cette loi, pour un bassin donné, d'autres paramètres, comme la nature et la violence des crues, semblent avoir une influence secondaire sur les coefficients A et k . Nous avons adopté, pour cette crue, la relation suivante:

$$C_s = 1,6 \cdot 10^{-4} Q_1^{2,85} \text{ avec } C_s \text{ en g/m}^3 \text{ et } Q_1 \text{ en m}^3/\text{s}$$

MÜLLER et FÖRSTNER (1968) ont trouvé une relation comparable pour le Rhin, à son embouchure dans le lac de Constance (Alpenrhein). Il en est de même pour nos propres résultats sur le Rhône affluent au lac Léman. Ceci n'a rien d'étonnant,

TABLEAU I
Suspensions dans la Dranse

Date des prélèvements	Q_1 m ³ /s	C_s g/m ³	C_s corrigé g/m ³	Q_s kg/s
2 août 1968 (12 h)	12,5	110 (O)	143	2
2 août 1968 (17 h)	36	350 (O)	455	16
3 août 1968 (5 h)	150	1800 (+)	2340	350
3 août 1968 (10 h 30)	120	585 (O)	760	90
4 août 1968 (24 h)	36	70 (+)	91	3
21 sept. 1968 (8 h)	50	40 (+)	52	3
21 sept. 1968 (14 h 30)	115	120 (O)	156	18
22 sept. 1968 (24 h)	325	1500 (+)	1950	634
22 sept. 1968 (9 h 30)	425	5500 (+)	7150	3040
22 sept. 1968 (12 h 50)	310	2770 (O)	3600	115
23 sept. 1968 (9 h)	100	100 (+)	130	13

Q_1 : débit liquide en m³/s
 C_s : charge en suspension en g/m³
 Q_s : débit solide en kg/s
(O) valeur mesurée
(+) valeur extrapolée

¹ La mesure de ces charges en suspension a été effectuée par filtration sur filtres Millipore (R) de 0,45 micron, suivie de calcination à 600°C. Ces valeurs, du fait des calcinations, sont donc approchées par défaut.

car Alpenrhein, Rhône et Dranse drainent des régions de relief et de climat analogues. De plus, les débits de l'Alpenrhein, du Rhône et de la Dranse, lors de cette crue, sont du même ordre de grandeur. Le débit solide Q_s de la Dranse a pu ainsi être déterminé (tableau I). Les prélèvements ayant été faits à la surface de la Dranse, les valeurs des charges en suspension ont été affectées d'un coefficient 1,3 pour rendre compte de l'augmentation de la charge solide en profondeur ¹.

A titre de comparaison, nous donnons le débit solide de la Dranse lors d'une crue ordinaire qui a eu lieu le 3 août 1968 (tableau I). Dans ce cas, on peut écrire:

$$C_s = 22,8 Q_1^{0,78}$$

La différence entre ces coefficients et ceux de la crue du 22 septembre est due au changement de régime qui s'est effectué.

En intégrant la fonction $Q_s = Q_1 C_s$ entre le début et la fin de la crue, nous obtenons la masse totale M_s de matières en suspension transportées lors de cette crue:

Crue du 3 août 1968	$M_s = 13.400$ tonnes en 2 jours $\frac{1}{2}$
Crue du 22 septembre 1968	$M_s = 120.000$ tonnes en 2 jours

Ces valeurs montrent bien le caractère exceptionnel de la crue du 22 septembre. Il y a une véritable discontinuité dans la dimension des phénomènes d'érosion et de transport. La Dranse a atteint alors un débit et un transport solide comparable à ceux du Rhône lors d'une crue ordinaire comme par exemple celle du 27 juin 1967 (140.000 tonnes en 2 jours pour un débit maximal de $580 \text{ m}^3/\text{s}$ ²).

L'analyse du prélèvement fait le 22 septembre à 12 h. 50 à la surface de la rivière nous donne une idée de la nature des suspensions.

fraction inférieure à 40 microns	94%
fraction supérieure à 40 microns	6%
teneur en CaCO_3 de la fraction fine	27%

Ces suspensions sont surtout argileuses conformément à la nature géologique du bassin. En effet, le cours moyen et inférieur de la rivière est constitué par des formations tendres fluvioglaciales: galets au sein d'une matrice argilo-sableuse. L'érosion et le transport des matériaux solides ont donc été nettement facilités.

Cette érosion mécanique, superficielle sur les versants et linéaire dans le cours de la Dranse, est liée à la nature du substratum mais dépend aussi de l'énergie cinétique de l'eau.

¹ COLLET (1925) a déterminé un coefficient de 1,3 pour le Rhône, nous l'avons adopté en raison des analogies, citées plus haut, avec ce fleuve.

² Bilan effectué d'après les données de l'Office fédéral de l'économie hydraulique suisse.

On peut appliquer à l'écoulement de l'eau le théorème de Bernouilli:

$$H + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2g} = \text{Constante}$$

$$\text{avec } \begin{cases} H = \text{altitude du lieu} \\ P = \text{pression exercée par cette lame d'eau} \\ \rho = \text{poids volumique du liquide} \\ g = \text{accélération de la pesanteur} \\ V = \text{vitesse de déplacement de la lame d'eau} \end{cases}$$

En un point H , ρ et g sont donnés. Une augmentation de la vitesse V entraîne une diminution de la pression P , ce qui provoque l'arrachement de particules solides. Aussi, toute augmentation de la vitesse du courant augmente la capacité d'érosion et favorise les possibilités de transport de l'eau.

Dans le cas d'une section rectangulaire d'un cours d'eau, de largeur L où s'écoule, avec un débit Q_1 , une lame d'eau de hauteur Z , nous pouvons écrire (d'après la formule de Chézy):

$$Q_1 = KLZ^{3/2} \quad (1) \quad \text{où } K \text{ est une constante}$$

La vitesse moyenne V du courant est égale à:

$$V = Q\rho/LZ \quad (2)$$

En éliminant Z entre (1) et (2), on trouve que

$$V = K' (Q\rho/L)^{1/3}$$

Sous cette forme, on voit dans quelle mesure une augmentation du débit Q_1 ou un rétrécissement de la largeur L du lit provoquent une augmentation de la vitesse du courant et, par conséquent, favorisent un accroissement de l'érosion.

Au pont de Vongy, la vitesse moyenne de la Dranse est ainsi passée de 1,5 m/s avant la crue, à 7 m/s lors de la pointe de crue; on peut alors calculer que la Dranse était capable de déplacer des blocs de quelques tonnes; en temps ordinaire, le courant ne peut transporter que des graviers de quelques grammes.

On a pu observer l'ablation des berges sur plusieurs mètres en certains endroits l'arrachement d'une partie du fond de la rivière et l'affouillement important des piles des ponts routiers et ferroviaires de Vongy.

Il ne nous a pas été possible de mesurer directement le charriage des galets et des blocs sur le fond. COLLET (1925) lui attribue une valeur comprise entre 10 et 60% du débit solide ce qui nous conduit ici, pour la masse transportée sur le fond, à une estimation comprise entre 12.000 et 70.000 tonnes. Ces chiffres peuvent être recoupés par l'observation suivante: un entonnoir de plusieurs dizaines de milliers de m³, situé à l'embouchure de la Dranse, et dû au dragage de la rivière, a été comblé

lors de cette crue; l'apport nécessaire à un tel remplissage correspond à plusieurs dizaines de milliers de tonnes, provenant principalement de la partie inférieure du cours de la Dranse et du remaniement de son delta. Une estimation du charriage sur le fond à environ la moitié du débit solide semble donc être raisonnable.

LESSIVAGE DU BASSIN ET TRANSPORT DES MATIÈRES DISSOUTES

La concentration en sels dissous d'une rivière comme la Dranse résulte de deux phénomènes: on doit considérer tout d'abord, la dissolution des sols et des roches superficielles; elle dépend des facteurs climatiques qui conditionnent les altérations chimiques, de l'intensité des précipitations et du lessivage antérieur des terrains. Il faut ensuite tenir compte de l'apport en éléments dissous provenant des terrains plus profonds et véhiculés par les circulations souterraines des eaux. Ce dernier mode de dissolution s'opère de façon beaucoup plus régulière que le premier mécanisme. Le gonflement des eaux souterraines est rentré pour une faible part dans le débit d'une telle crue, et n'a donc pas provoqué d'évolution chimique importante des eaux de la rivière. Il n'en est pas du tout de même des eaux de ruissellement, la composition chimique des eaux de la Dranse est donc essentiellement variable en fonction du débit.

Nous donnons dans le tableau II les résultats des analyses chimiques effectuées

TABLEAU II
Analyses chimiques de la Dranse et du lac (Concentrations en mg/l)

Date des prélèvements	Débit en m ³ /s	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ en mg/l d'azote
4 décembre 1966	5	3,9	125	10	2,2	1,25	1,7	194	218	1,2
16 janvier 1968	15	—	84	9,8	2,6	1,45	3,5	58,5	223	2,3
17 sept. 1968 (15 h)	38	4,0	56	5,0	1,7	0,9	1,3	25,4	165	0,7
21 sept. 1968 (14 h 30)	115	3,9	51	4,7	1,4	1,0	0,9	22,2	153	0,5
22 sept. 1968 (12 h 50)	310	3,45	55	4,6	0,7	1,25	0,9	14,2	175	—
23 sept. 1968 (9 h)	95	3,8	68,5	5,2	0,9	1,45	1,3	18,2	213	—
28 sept. 1968 (15 h 30)	30	4,2	55,5	5,7	1,2	1,0	0,9	31,6	160	0,8
Lac - L6 - 0 m (16/9/68)	—	0,9	41	5,5	1,8	1,3	2,4	47,1	93,5	0,2
Lac-L6-200 m (16/9/68)	—	2,9	49	5,2	1,7	1,3	2,2	48,7	114,5	0,5

lors de la crue du 22 septembre. Nous avons également porté des mesures effectuées en étiage les 4 décembre 1966 et 16 janvier 1968 et en période de crue ordinaire, le 3 août 1968.

L'ion sulfate, dont la concentration se révèle la plus variable en fonction du débit, est celui dont l'étude présente donc ici le plus grand intérêt. Nous avons reporté sur des axes logarithmiques (figure 6) la variation de concentration en sul-

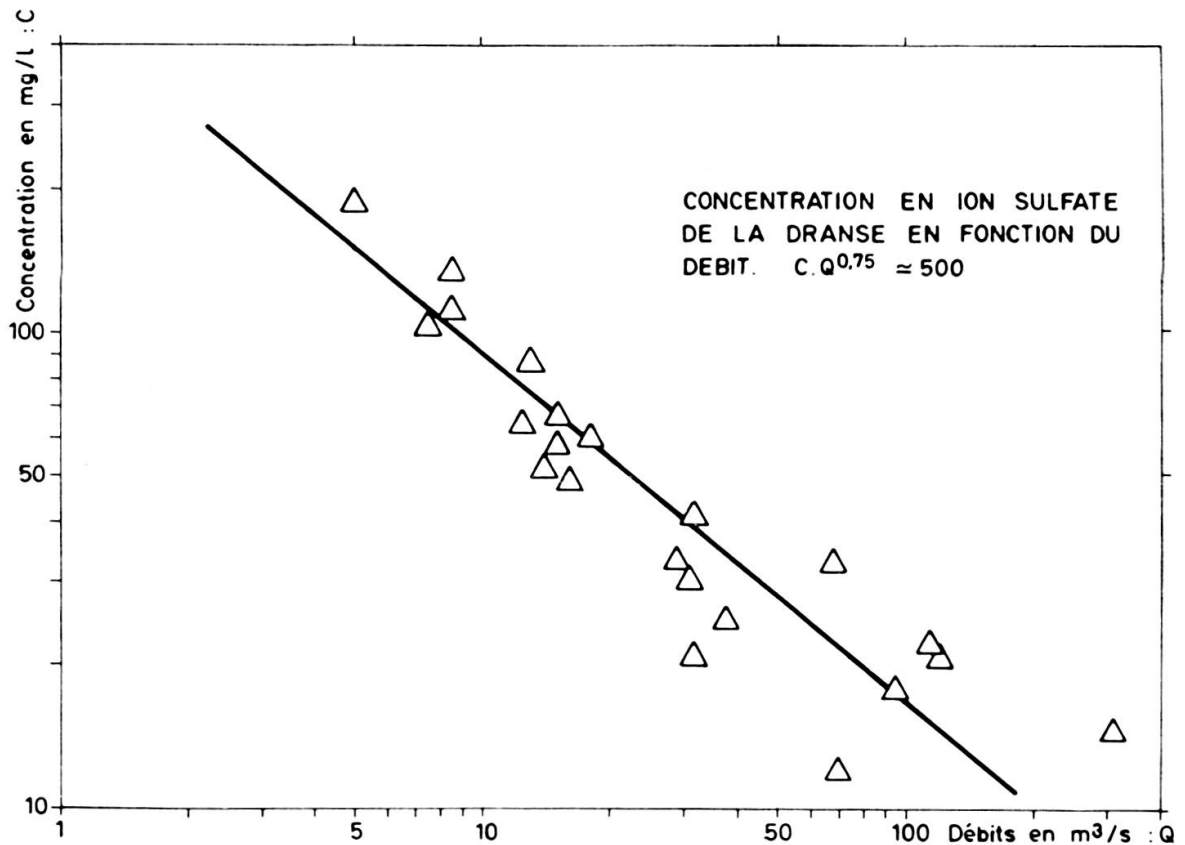


FIG. 6.

fate en fonction du débit liquide. Comme la charge en suspension, la concentration en ion sulfate s'exprime par une loi du type

$$C_{S04} = a Q_1^b \quad \text{avec } a = 500 \text{ et } b = 0,75$$

si C_{S04} et Q_1 sont exprimés respectivement en mg/l et m³/s.

Ici encore, les écarts à cette loi, surtout sensibles pour les gros débits, doivent être attribués à des causes secondaires (violence de la crue...) par rapport au facteur principal qui est le débit. Il nous semble très important de noter que, même au voisinage de la pointe de crue, la teneur en sels dissous de la Dranse, 240 mg/l, (voir tableau III) n'est pas négligeable, alors qu'environ 90% du débit provient alors d'eaux superficielles qui ont seulement ruisselé sur les versants. En période d'étiage, la teneur en sels de la Dranse est de 550 mg/l. Avec une participation des eaux de

TABLEAU III
Sels dissous dans la Dranse

Date des prélèvements	Q_1 m ³ /s	C_d g/m ³	$Q_1 \cdot C_d = Q_d$ kg/s
<i>Crue du 22 septembre 1968</i>			
17. 9. 15 h	38	260 (O)	10
21. 9. 14 h 30	115	230 (O)	26
22. 9. 8 h	425	240 (+)	102
22. 9. 12 h 50	310	260 (O)	81
23. 9. 9 h	95	310 (O)	30
28. 9. 15 h 30	30	265 (O)	8
<i>Crue du 3 août 1968</i>			
2. 8. 12 h 30	12,5	340 (O)	4
2. 8. 17 h	36	308 (O)	11
3. 8. 5 h	150	280 (+)	42
3. 8. 10 h 30	120	295 (O)	36
4. 8. 0 h	55	310 (+)	17
Etiage: 4/12/1966	5	550 (O)	2,8

Q_1 : débit liquide en m³/s
 C_d : concentration en sels dissous en g/m³
 Q_d : débit en sels dissous en kg/s
(O) valeur mesurée
(+) valeur extrapolée

pluies voisine de 90% (compte tenu d'un apport double des eaux souterraines vers la pointe de crue), la teneur devrait être beaucoup plus faible et de l'ordre de 55 mg/l. De même, lors de la crue du 3 août 1968, la concentration en ions dissous était encore de 295 mg/l, ce qui constitue une valeur élevée par rapport à une estimation fondée sur un calcul de dilution de l'eau de la rivière, lors des basses eaux, par de l'eau de pluie non chargée en sels. En un jour, les eaux se chargent, par lessivage, de la moitié des sels dissous par les eaux souterraines en un mois; le temps de transit des eaux souterraines est en effet au moins de l'ordre du mois. D'autre part, cette dissolution semble se produire encore pendant la décrue: les valeurs, lors de la décrue (3 août et 22 septembre) sont nettement plus fortes, à débit égal, que lors de la crue. Comme le ruissellement a alors diminué, il est possible que les eaux attaquent les particules en suspension lors de leur transport.

A partir de ces analyses chimiques, nous avons évalué la quantité totale de sels dissous entraînés par la crue du 22 septembre. Les valeurs sont reportées dans le tableau III. La concentration en sels dissous a été majorée d'environ 5 mg/l pour tenir compte des éléments mineurs que nous n'avons pas dosés. Nous avons ainsi

déterminé un apport de la Dranse au lac de 10.000 tonnes de sels dissous lors de la crue du 22 septembre et 3.500 tonnes à l'occasion de celle du 3 août.

Si nous additionnons les valeurs trouvées pour les différentes formes de transport (transport des solides en suspensions, charriage de fond, transport des sels dissous) pendant la crue du 22 septembre, nous arrivons à un total de matières déversées dans le lac Léman variant de 150.000 à 200.000 tonnes en 2 jours.

Le bassin versant de la Dranse couvre une superficie de 535 km². Si nous supposons la densité moyenne des terrains de ce bassin égale à 2,5, on peut estimer une ablation de l'ordre de 0,1 mm sur tout le bassin. COLLET estime à 0,6 mm l'ablation annuelle moyenne dans les Alpes. La valeur de 0,1 mm pendant 2 jours peut donc sembler énorme. Mais pour notre part, cela nous incite à penser que l'érosion se produit, pour l'essentiel, lors des crues exceptionnelles.

INFLUENCE DE LA CRUE SUR LE LÉMAN

1. HYDROLOGIE

En temps normal, les crues ordinaires (fonte des neiges ou orage), ne se remarquent que fort peu et sont complètement amorties par l'énorme masse et la grande profondeur du lac Léman (volume total: 89 10⁹ m³, profondeur en face de l'embouchure de la Dranse: 250 m). Le 23 septembre, au contraire, l'état superficiel du lac était modifié (figure 7): un fort courant boueux superficiel se dirigeait vers l'ouest à partir de l'embouchure. D'abord d'une largeur très faible le long du delta de la Dranse, il s'est ensuite rapidement étalé dans la baie de Thonon. Des débris divers, notamment d'arbres, entraînés jusqu'à une distance de 6 km attestaient de la puissance du courant.

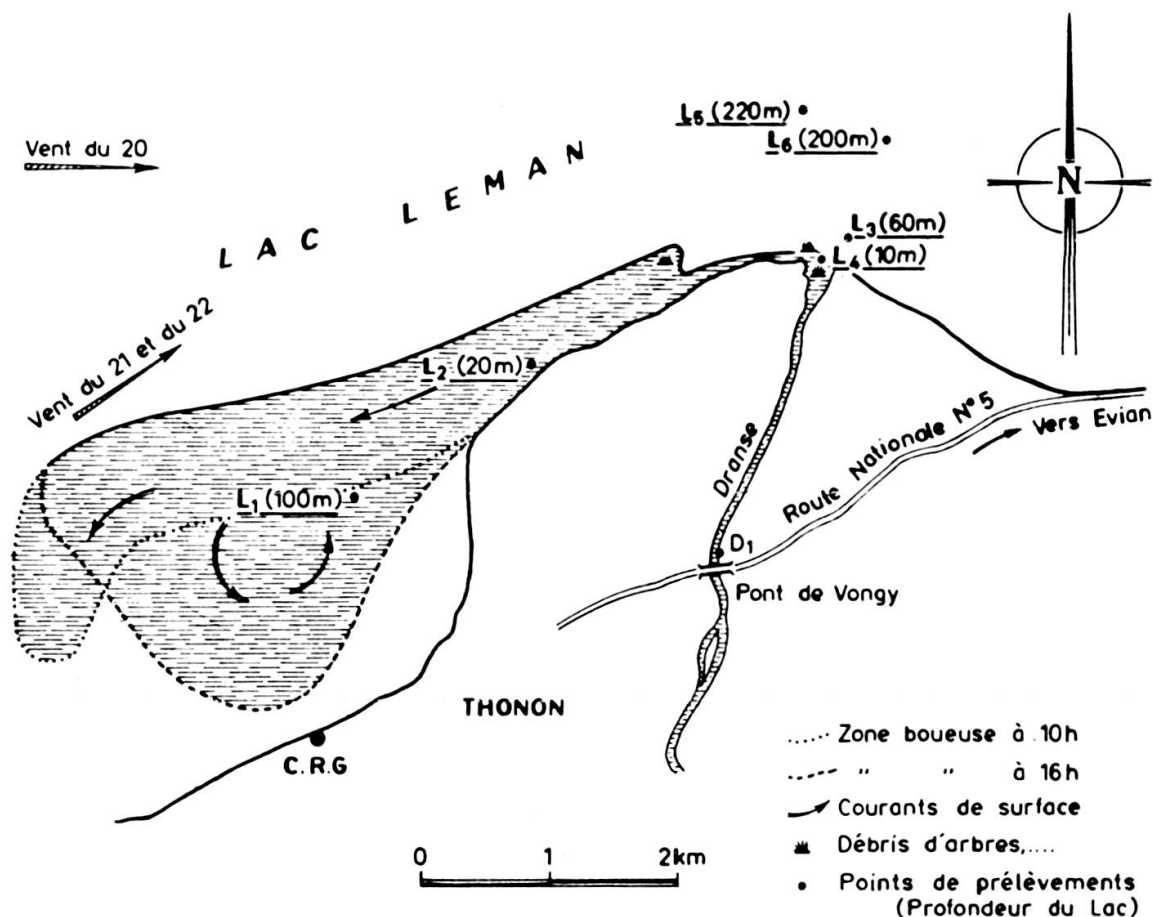
L'observation du développement dans le temps de la zone boueuse s'étendant vers Thonon, nous conduit à estimer à environ 10 cm/s la vitesse du courant entre le 21 et le 22 septembre. Cette valeur comparée aux courants superficiels normaux limités à des vitesses de l'ordre du cm/s, rend bien compte de la violence du phénomène.

Le vent soufflait d'ouest en est à une vitesse de 5 m/s depuis 2 jours donnant naissance à un courant superficiel rétrograde, phénomène bien connu des pêcheurs du Léman. On doit penser que ce courant, relativement faible, a d'abord orienté les eaux de la Dranse; la vitesse de ce courant a été ensuite décuplée par le flot de la crue dont la vitesse a atteint environ 5 m/s.

Nous avons procédé à des mesures de charge en suspension qui ont donné les résultats rassemblés au tableau IV. Si nous comparons ces valeurs à celles du lac au voisinage des côtes, qui sont de l'ordre de 0,5 mg/l, nous voyons clairement le change-

ment radical dans l'état du lac. La Dranse se divise en deux branches: une circulation superficielle rapide, limitée aux 50 premiers mètres et dirigée d'est en ouest, et un écoulement profond vers le nord.

Nous pouvons avoir une idée de l'importance des matières en suspensions apportées au lac en répartissant la masse totale amenée par la Dranse en deux jours sur



PENETRATION DE LA DRANSE DANS LE LEMAN LE 22.IX.1969

ETAT EN SURFACE

FIG. 7.

une zone d'influence directe de la Dranse estimée à 50 km². Le dépôt ainsi calculé correspond à une pellicule moyenne de sédiments secs d'au moins 1 mm. Sans tenir compte de la teneur en eau de ce sédiment fraîchement déposé, cette valeur est déjà de l'ordre de grandeur de la sédimentation moyenne annuelle dans le Léman (SERRUYA, 1967).

TABLEAU IV
Suspensions dans le Léman le 23/9/1968

Points de prélèvements	Profondeur du prélèvement en m	Charge en suspension en mg/l
L ₁	0	3,5
L ₂	0	2,5
	10	2,5
	20	15 (+)
L ₃	0	2
	30	3,5 (O)
L ₄	10	1640 (O)
L ₅	30	4
	80	0,5
	150	1

(O): échantillons filtrés et calcinés à 600° C, les autres sont filtrés et séchés à 100° C.

(+): valeur trop élevée due à la remise en suspension de la vase du fond lors du prélèvement.

2. DONNÉES ISOTOPIQUES

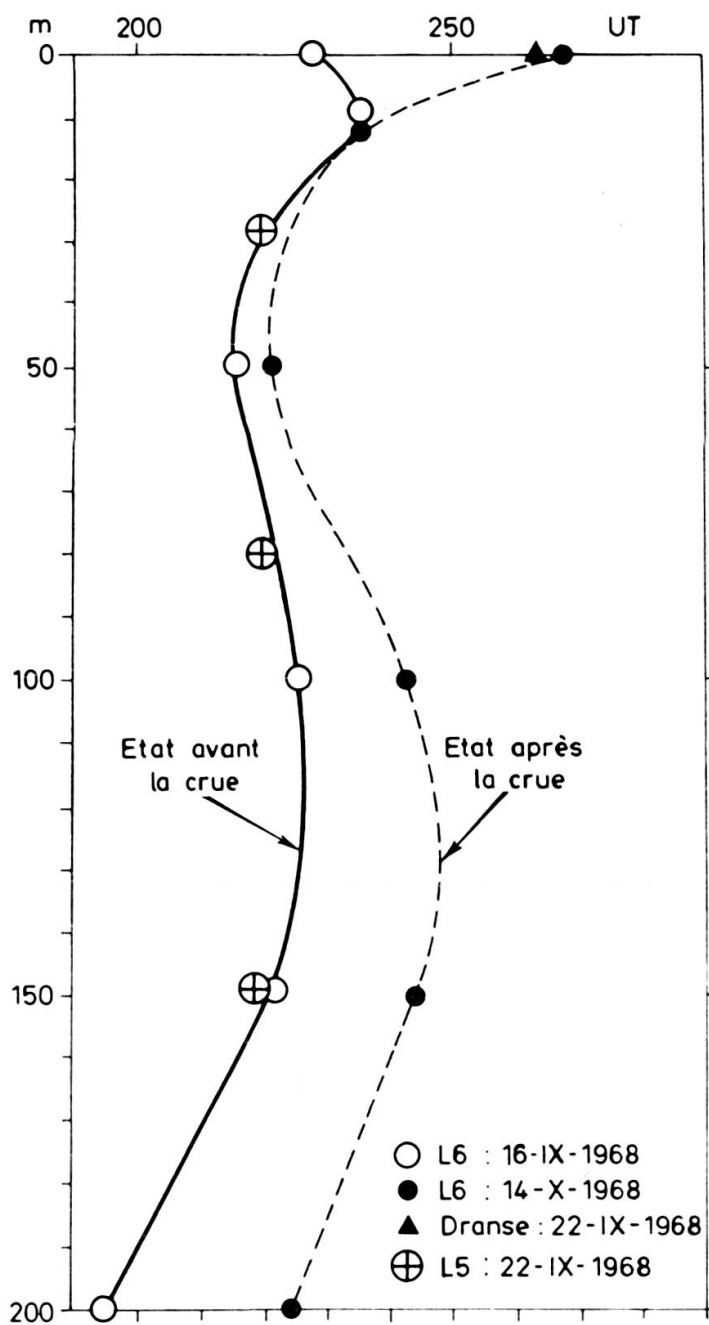
Afin d'étudier de manière plus précise cette pénétration de l'eau de la Dranse, dans le Léman, nous avons effectué des analyses de teneur en tritium. On sait que cet isotope radioactif de l'hydrogène est présent en quantité mesurable dans l'hydrosphère depuis 1952, date de la première explosion thermonucléaire. Les valeurs sont rassemblées dans le tableau V et la figure 8. Le point de prélèvement L₆ correspond à une station de mesures et d'analyses (C.R.G. 21) du réseau d'échantillonnage régulier du C.R.G.; il nous a donc été permis de connaître l'état du lac en face de l'embouchure de la Dranse avant et après la crue.

Nous pouvons avancer les conclusions suivantes, sachant que les eaux de la Dranse en crue avaient une teneur de 265 UT:

1) La zone turbide s'étendant vers Thonon, correspond bien à une circulation rapide: les teneurs superficielles en tritium, qu'on peut estimer à environ 200 UT avant la crue, enregistrent une augmentation très notable dès le 22 septembre, notamment à 10 m pour L₂ et en surface pour L₁.

2) Le point L₅ qui devait avoir, avant la crue, des teneurs en tritium comparables à celles du point L₆, n'est pas affecté le 22 septembre par la crue. C'est seulement plus tard, que les masses d'eau de la Dranse s'écoulant vers le nord atteignent

ce secteur, ainsi que le montre l'augmentation des teneurs en tritium au point L₆ particulièrement de 0 à 10 m, et de 50 à 200 m (figure 9). Nous mettons donc en évidence, outre une circulation superficielle vers le nord, une circulation lente vers



EVOLUTION DE LA TENEUR EN TRITIUM DU LAC AU LARGE DE L'EMBOUCHURE DE LA DRANSE.

FIG. 8.

le fond. Cette importante circulation profonde doit être attribuée à la forte densité des eaux de la Dranse très chargées en suspensions et en matières dissoutes.

TABLEAU V
Teneurs en tritium des eaux

Date	Précipitations	Dranse	Léman
15/09/1968	Thonon: 158 ± 30		
16/09/1968	Thonon: 155 ± 29		Point 6 { 0 m: 227 ± 19 10 m: 236 ± 19 50 m: 216 ± 19 100 m: 226 ± 18 150 m: 223 ± 18 200 m: 196 ± 17
17/09/1968		Dranse à l'embouchure: 237 ± 19	
21/09/1968	Thonon 101 ± 19 82 ± 9 Les Favrats: 115 ± 29	Dranse à l'embouchure: 267 ± 21 (14 h 30)	
22/09/1968	Thonon: 103 ± 20 Les Favrats: 164 ± 41	Pont de Vongy: 263 ± 21 (12 h)	Point 1 0 m: 240 ± 17 Point 2 0 m: 198 ± 15 — 10 m: 218 ± 16 — 20 m: 198 ± 15 Point 3 0 m: 211 ± 16 — 30 m: 257 ± 21 Point 4 10 m: 232 ± 19 Point 5 30 m: 220 ± 18 — 80 m: 220 ± 18 — 150 m: 221 ± 18
28/09/1968		Pont de Vongy: 216 ± 18	
14/10/1968			Point 6 { 0 m: 268 ± 22 10 m: 236 ± 20 50 m: 222 ± 19 100 m: 243 ± 20 150 m: 245 ± 21 200 m: 225 ± 19

1 UT = 1 unité tritium = 1 atome de tritium pour 10¹⁸ atomes d'hydrogène

3. DONNÉES HYDROCHIMIQUES

Nous avons cherché, d'autre part, à voir si la crue de la Dranse a eu une influence sur le chimisme du lac. Comme nous l'avons vu auparavant, la teneur en sels dissous de la Dranse est deux fois plus faible en période de crue que pour des débits ordinaires; elle se rapproche alors beaucoup de celle du lac pour tous les éléments, sauf

les bicarbonates. On peut donc penser que la crue a eu une faible influence sur le lac. En effet, au point L₆, où nous effectuons des analyses mensuelles, la concentration des différents ions est restée sensiblement constante, les variations n'étant pas

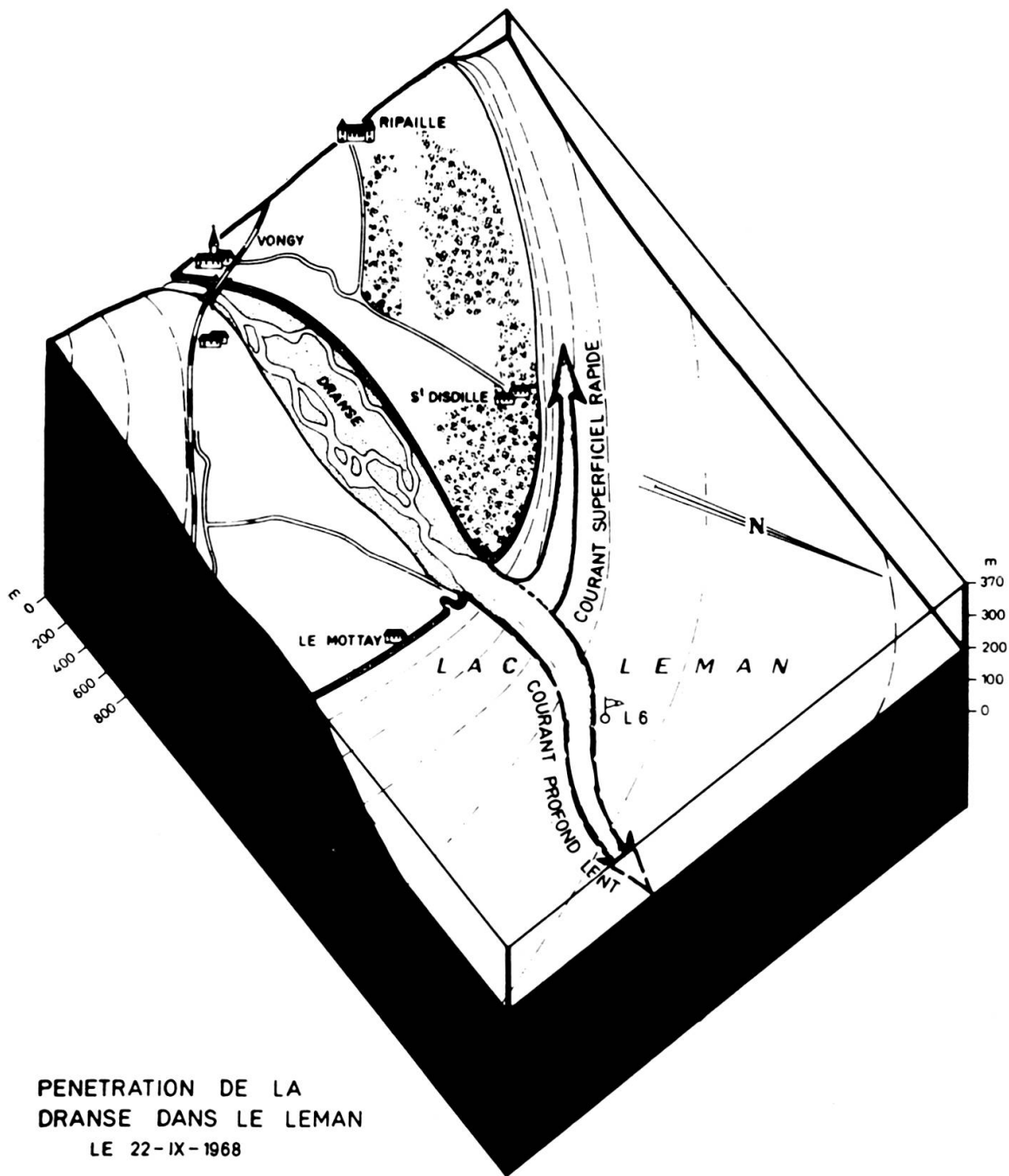


FIG. 9.

significatives par rapport à celles de nos autres stations d'étude du lac (tableau II). Néanmoins, pour les bicarbonates, nous avons pu déceler une légère variation: la teneur des eaux de la Dranse était de 160 mg/l contre 114,5 mg/l pour les eaux profondes de L₆ le 16 septembre 1968. Cette valeur des eaux du fond est passée à

120 mg/l le 14 octobre 1968. Or, cette augmentation ne se vérifie pas pour le reste du lac à des profondeurs comparables de 200 m. Il semble donc que cette différence soit due à la crue de la Dranse bien qu'elle reste faible par rapport aux variations saisonnières du chimisme des eaux du Léman.

CONCLUSIONS

Cette étude d'un phénomène exceptionnel par l'emploi de techniques variées (pluviométrie, mesure de débits, granulométries, calcimétries, analyses chimiques et géochimiques) nous conduit à 3 séries de conclusions. Une série de conclusions spécifiques portent tout d'abord sur les résultats obtenus à la suite de la mesure des divers aspects du phénomène. Nous envisageons ensuite des conclusions d'ordre pratique quant aux effets de ce phénomène et aux possibilités de les prévoir et de s'en rendre maître. Enfin, nous abordons les conclusions d'ordre méthodologiques sur l'importance de ce phénomène dans le contexte plus général de la géodynamique externe, ainsi que l'examen critique des moyens employés dans ce travail.

1. CONCLUSIONS SPÉCIFIQUES

Nous avons vu qu'un orage de 176 mm, d'une intensité de 6,8 mm/h tombant sur le Haut Chablais, dont les terrains étaient relativement saturés à la suite d'un précédent orage, a provoqué, par un ruissellement de 70%, l'augmentation du débit de la Dranse de 20 m³/s à 425 m³/s en 26 heures.

Le passage de cette lame d'eau a entraîné, dans le lac Léman, sous différentes formes: suspension, transport sur le fond et dissolution, une masse de matière que l'on peut estimer entre 150.000 et 200.000 tonnes.

Cette masse de 62 millions de m³ d'eau, a pénétré dans le Léman en se divisant en un courant rapide et superficiel et un courant lent et profond (figure 9).

2. CONCLUSIONS PRATIQUES

Nous avons vu que le maximum de probabilité, pour que la Dranse ait une crue de cette intensité, se situe en automne après une averse ayant une intensité minimum de 5 mm par heure, maintenue pendant 24 heures. Un système d'alerte essentiellement constitué par 2 pluviographes implantés dans les vallées de Morzine et d'Abondance, pourrait être facilement mis en place.

Si nous sommes actuellement impuissants pour agir sur l'intensité des averses il est par contre possible de minimiser le coefficient de ruissellement en limitant le déboisement, les surfaces dénudées favorisant considérablement le ruissellement.

Nous avons vu que les zones où le lit de la rivière est étroit, sont particulièrement touchées par les crues. Or, pour d'évidentes raisons de commodités techniques

et d'économie, les ponts sont en principe édifiés en ces endroits. Leur protection doit être assurée par des blocs de masse importante suffisamment ancrés pour ne pas devenir, en période de crue, de redoutables projectiles.

3. CONCLUSIONS MÉTHODOLOGIQUES

Tout au long de cette étude, nous avons pu constater les différences considérables entre les caractères de la Dranse à l'état ordinaire, qui restent similaires même lors de crues, et ceux de la Dranse lors de cette crue exceptionnelle. Nous avons

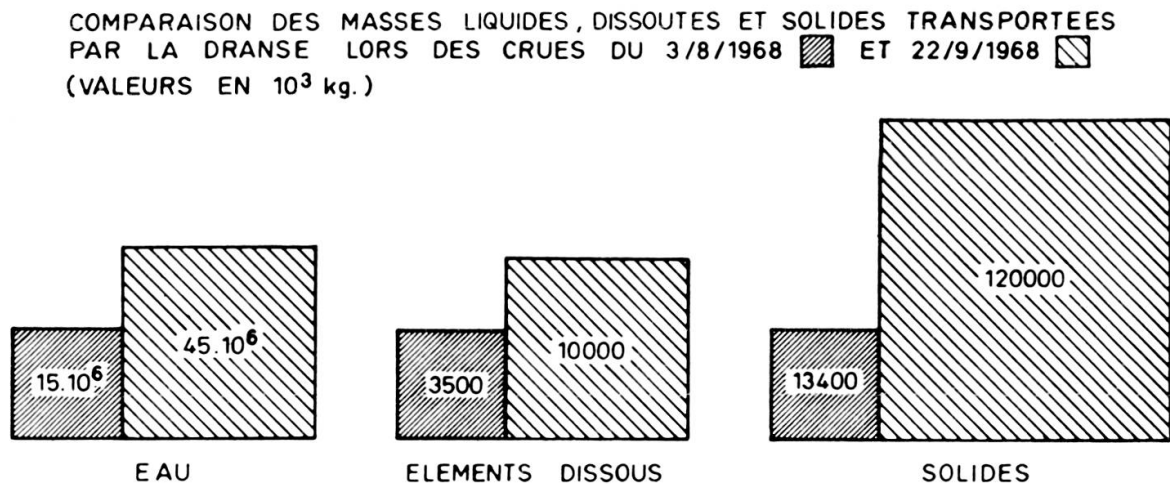


FIG. 10.

porté (figure 10), à titre de comparaison, les masses liquides, dissoutes et solides transportées par la Dranse lors des crues du 3 août 1968 et du 22 septembre 1968 pendant les deux jours de montée des eaux.

En 2 jours, la Dranse a donc apporté au lac: 8 fois plus de matières dissoutes, 13 fois plus d'eau et 650 fois plus de matières en suspension que la « Dranse moyenne de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ » pendant le même temps. Les masses susceptibles d'être déplacées ont été multipliées par un facteur 10^6 .

Il n'est plus possible d'extrapoler linéairement ce que l'on connaissait de la Dranse habituelle pour obtenir ce que l'on a pu mesurer. Le changement n'a pas été seulement quantitatif mais aussi qualitatif. Il y a une réelle coupure entre ces 2 états. L'état habituel est constitué par ce que l'on pourrait appeler par analogie avec les mesures des physiciens: le « bruit de fond ». On en connaît relativement bien les variations (crues ordinaires, montées des eaux en mai...). Au sein de ce « bruit de fond » est arrivé, le 22 septembre, un « signal » constitué par cette crue exceptionnelle. L'étude de ce « signal » a permis de nombreuses observations dont les plus importantes sont, tout d'abord, la mise en évidence que les eaux de ruissellement se chargent très fortement en ions dissous; lors des crues, cette mise en solution es

fait 10 à 100 fois plus vite que celle effectuée par les eaux souterraines. Par ailleurs, il faut insister sur la détermination du trajet sous lacustre de la Dranse par la mesure des teneurs en tritium et des charges en suspensions. Enfin, nous avons vu l'importance des crues sur la sédimentation dans cette partie du Léman. Ce dernier point montre bien que l'étude de la sédimentation d'origine terrigène des lacs est essentiellement liée à l'étude des crues.

Tout ceci a de grandes répercussions sur les méthodes à employer dans ce genre d'étude. Il est évident qu'il est nécessaire d'être toujours à pied d'œuvre pour étudier de tels phénomènes: ils se produisent généralement à l'improviste et une étude s'effectuant sur un programme établi a priori, sans possibilité d'adaptation aux conditions nouvelles qui peuvent surgir à tout moment, les ignore le plus souvent. Or, nous avons vu leur rôle important en ce qui concerne les bilans régionaux et leur application (protection, pollution...). C'est l'intérêt des Centres de Recherches Géodynamiques du professeur Glangeaud de pouvoir ainsi adapter leurs programmes pour étudier les phénomènes dans leur intégrité.

Enfin, cette étude nous ayant permis de hiérarchiser les phénomènes, il nous est possible de procéder à une revue critique des méthodes employées. Si la mesure de la quantité d'eau tombée, vu le nombre de stations météorologiques, est relativement satisfaisante, la mesure du débit l'est un peu moins: nous ne disposons que d'un limnigraphe, de plus, ce type d'appareil, du fait de sa conception, enregistre difficilement des montées aussi rapides du niveau d'eau. Aussi, mettons nous actuellement au point une méthode indirecte basée sur les teneurs en tritium dans les précipitations les rivières et les sources, pour mesurer le débit lors des crues. Si les prélèvements destinés aux analyses chimiques ne présentent pas de trop grosses difficultés, il n'en est pas de même pour la mesure en profondeur de la charge en suspension. De même, le transport sur le fond des galets et des blocs ne peut actuellement être apprécié qu'à 100% près. La solution consisterait peut être à disposer en permanence de galets marqués à l'aide d'un traceur radioactif. En conclusion, si les techniques pour les cas habituels sont relativement au point, elles restent à imaginer pour les crues. Et ceci est d'autant plus nécessaire, ainsi que nous avons pu le voir, que les phénomènes les plus importants, tant du point de vue quantitatif que qualitatif se produisent lors de grandes crues; le reste du temps les phénomènes, par ailleurs bien connus, restent de plusieurs ordres de grandeur inférieurs.

Aussi, et ce sera notre conclusion finale, ce travail est une illustration du fait que dans la nature les phénomènes progressent par bonds et non d'une façon continue.

Nous remercions notre collègue J. C. Fontes pour la lecture de ce travail.

Les recherches ont été réalisées par le Centre de Recherches Géodynamiques, avec en particulier la collaboration de G. Olivier (prélèvements), L. Ferrari et O. Contamine (analyse physique des suspensions), P. Blanc et A. Noir (analyses chimiques) et S. Chessel (analyses tritium).

BIBLIOGRAPHIE

- COLLET, L. W. 1925. *Les Lacs*, 320 p., Paris.
- MOUGIN, P. 1914. Les torrents de Savoie, *Soc. Hist. Nat. Savoie*, 1250 p., Grenoble.
- MULLER, G., U. FORSTNER. 1968. General relationship between suspended sediments, concentration and water discharge in Alpenrhein, *Nature*, 217, pp. 244-245.
- OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉCONOMIE HYDRAULIQUE SUISSE, 1969. *Débits liquides et solides du Rhône à la Porte de Scex*. Berne.
- SAYAR, M. 1966. *Etude géologique, hydrologique, hydrogéologique, limnologique, hydrochimique du bassin de la Dranse de Morzine*. Thèse 3^e cycle, Paris.
- SERRUYA, C. 1969. *Les dépôts du Lac Léman en relation avec l'évolution du bassin sédimentaire et les caractères du milieu lacustre*. Thèse, Genève, *Arch. des Sciences Genève*, 22, 1, pp. 125-250.

