Zeitschrift: Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Annuaire de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 158 (1978)

Artikel: Torrents glaciaires, hydrologie et charriages d'alluvions

Autor: Bezinge, Albert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-90746

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 15.07.2025

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

Torrents glaciaires, hydrologie et charriages d'alluvions

Albert Bezinge

Zusammenfassung

Die intensive Nutzung von Abflussmengen glazialen Ursprungs zur Produktion hydroelektrischer Energie hat die Kraftwerkgesellschaft Grande Dixence S. A. dazu geführt, die verschiedenen damit zusammenhängenden Phänomene seit dem Jahre 1948 bis heute zu studieren. Die bedeutende Wasserkraftanlage der Grande Dixence S. A. in den Walliser Alpen umfasst 35 Einzugsgebiete von 1 bis 80 km² Grösse, mit unterschiedlicher Vergletscherung und Orientierung sowie verschiedenen Mikro-Klimaten. Ihr Betrieb stellt ein wertvolles und weites Experimentierfeld dar, und die zahlreichen Anlagen und Messinstallationen erlauben die Analyse der verschiedenen Einflussgrössen.
Die Abflussmengen sind der Grundstoff für die Energieproduktion, während das transportierte Festmaterial entscheidend ist für die Abnützung der Anlagen und der hydraulischen Maschinen wie auch für die Stauraumverlandung. Diese Gesamtstudie erfasst weitgehend die Mannigfaltigkeit der hydrologischen Daten und der Feststoffführung in alpinen Verhältnissen. Sie gestattet es, die Ergebnisse auf andere Gebiete der Erde mit ähnlichen klimatischen und topographischen Bedingungen wie Kordilleren, Hindukusch und Himalaya anzuwenden.

Résumé

L'utilisation intensive des torrents d'origine glaciaire pour la production d'énergie hydroélectrique a amené la société Grande Dixence S. A. à étudier les différents phénomènes précités depuis 1948 à nos jours. L'important aménagement hydro-électrique de Grande Dixence S. A., situé dans les Alpes valaisannes, comprend 35 bassins versants de 1–80 km² de glaciations et d'orientations différentes, avec des micro-climats divers. Les nombreux ouvrages et installations de mesures permettent d'analyser les différents paramètres, et l'exploitation de l'aménagement représente un précieux et vaste champ d'expériences.
L'hydrologie représente la matière première nécessaire à la production d'énergie hydroélectrique, tandis que les matériaux transportés sont synonymes d'usures des ouvrages et machines hydrauliques et dépôts parasitaires dans les bassins d'accumulation. Cette étude globale permet de mieux saisir la diversité des données hydrologiques et de charriages en régions alpines et peut s'appliquer à d'autres régions du globe à climat et topographie semblables: Cordillère, Indoukouch et Himalaya.

Généralités (fig. 1)

Depuis 1948, la Société hydro-électrique de Grande Dixence S. A. s'intéresse à l'hydrologie et aux matériaux transportés par les rivières glaciaires des vallées alpines de St. Nicolas (Mattertal) et d'Hérens. Dès 1953, les eaux de 35 bassins versants de 1 à 80 km² sont captées et mesurées. Les eaux représentent la matière première nécessaire à la production d'énergie électrique, tandis que les matériaux transportés (par suspension et charriage) sont synonymes d'usures des machines hydrauliques et de dépôts sédimentaires parasites dans les bassins d'accumulation.
Ainsi, l'exploitation de l'aménagement de Grande Dixence S. A. représente un précieux champ d'expériences, du fait que ses bassins glaciaires de haute montagne présentent des différences notables de surfaces et d'altitude, de glaciation, d'orientation, de composition géologique, de topographie, et de microclimat.

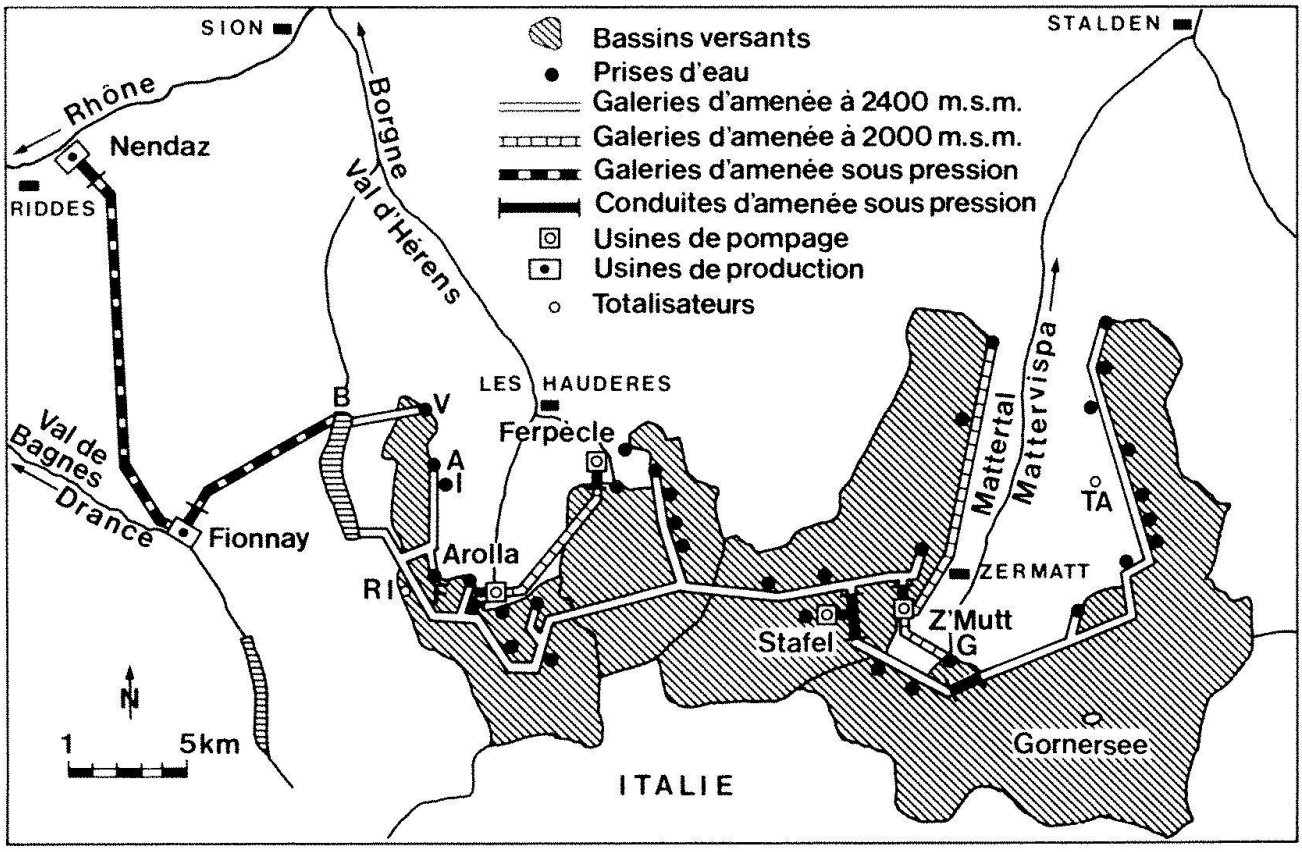

Fig. 1. Aménagement hydro-électrique de Grande Dixence S.A. Les lettres inscrites dans figure 1 signifient: B: Barrage-poids de Grande Dixence, hauteur 284 mètres. Retenue: 400 mio m³ à la cote maximale de 2364 m.s.m. Totalisateur de TA: Täschalp (2200 m.s.m.); RI: Riedmatten (2800 m.s.m.): Prise d'eau de; V: Vouasson; A: Aig^les Rouges; I: Ignes; F: Fontanesses; G: Gorner.

Hydrologie

Comme l'indiquent Kasser et Gignoux, à long terme, l'hydrologie moyenne donne une assez bonne image des précipitations annuelles locales, tout en tenant compte de deux facteurs importants: Variations du volume des glaces (bilan de masse); Pertes par évaporation, généralement admises à 30 cm CE (Colonne d'eau).
Après 12 étés de mesures, de 1966 à 1977, on a pu déterminer les indices estivaux d'écoulement (ou lame d'écoulement = volume été)/(surface du bassin), qui représentent 96–98% des indices annuels d'écoulement.

Pour la vallée d'Hérens on relève (fig. 2):
Des indices d'écoulement élevés, malgré l'avance des glaciers de Tsidjiore-Nouve, Bertol inférieur et de Ferpècle, depuis 1971.
Des indices d'écoulement faibles sur le bassin nival des Fontanesses (pertes par infiltration) et sur Douves et Dent Blanche, à faible glaciation, orientés vers l'ouest. A relever la grande disparité des indices d'écoulement qui donne une image des micro-climats sur ces régions.

Pour la vallée de Zermatt on relève (fig. 3):
De très faibles indices d'écoulement sur les bassins de rives droites, orientés à l'ouest, malgré les hauts sommets et les taux élevés de glaciation. Il s'agit d'une région semi-aride, puisque dans le vallon de Taeschalp, le totalisateur, placé à 2200 m, mesure des précipitations de 60 cm CE/an (très faibles). Il faut relever que les glaciers de Hohberg, Festi et Kin sont en crue depuis 5–6 ans. Les bassins de Rotbach et Langfluh présentent un déficit important par suite d'infiltrations dans des moraines.
Des indices d'écoulement importants pour les bassins de rives gauches et en fond de vallée. Les glaciers de Bis, Trift et Hohwang sont en crue depuis plusieurs années. Ces

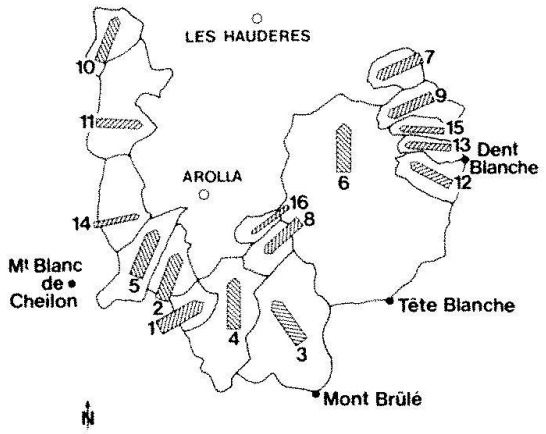

Fig. 2. Indice moyen d'écoulement estival $\bar{E}_{5-9}$ dans la vallée d'Hérens de 1966 à 1977 (été de mai à septembre).

Bassin versant		$\bar{E}_{5-9}$ m CE
1	Vuibé	1.65
2	Pièce	1.63
3	Haut d'Arolla	1.53
4	Bertol inférieur	1.48
5	Tsidjiore Nouve	1.48
6	Ferpècle-Mont Miné	1.32
7	Les Rosses	1.19
8	Bertol supérieur	1.18
9	Bricola	1.11
10	Vouasson	1.08
11	Ignes-Aig^{lles} Rouges	1.02
12	Manzettes	0.92
13	Rocs Rouges	0.90
14	Fontanesses	0.74
15	Dents Blanches	0.60
16	Douves Blanches	0.56

La largeur des flèches représente la valeur de $\bar{E}_{5-9}$.

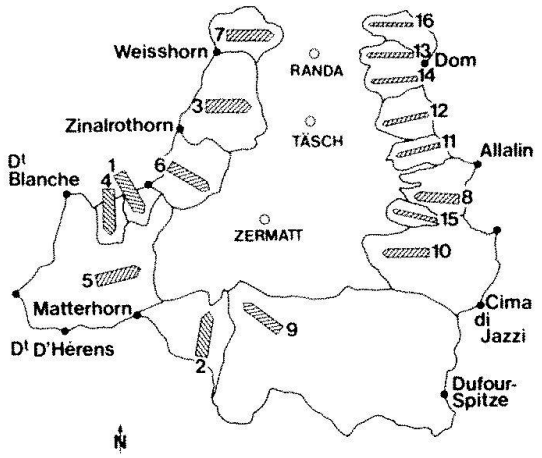

Fig. 3. Indice moyen d'écoulement estival $\bar{E}_{5-9}$ dans la vallée de Zermatt de 1966 à 1977 (été de mai à septembre).

Bassin versant		$\bar{E}_{5-9}$ m CE
1	Arb	1.54
2	Furgg-Obertheodul	1.46
3	Schali	1.45
4	Hohwäng	1.39
5	Z'Mutt	1.35
6	Trift	1.27
7	Bis	1.20
8	Mellichen	1.14
9	Gorner	1.11
10	Findelen	1.03
11	Alphubel	0.55
12	Rotbach	0.51
13	Festi	0.49
14	Kin	0.44
15	Längfluh	0.44
16	Hohberg	0.40

La largeur des flèches représente la valeur de $\bar{E}_{5-9}$.

indices élevés résultent des précipitations importantes locales (débordement du climat méditerranéen, vents locaux, etc.).
Comparé avec le climat de Chamonix, le climat de la région de Zermatt est moins favorable à la glaciation. Si Zermatt subissait le même climat que Chamonix, des glaciers descendraient des sommets de 4000 m et formeraient un glacier unique qui parviendrait à Randa ou St. Nicolas.

Indices d'écoulement maximum à Zermatt	environ 150cm CE
Indices d'écoulement maximum à Chamonix	environ 270cm CE
Limite des névés maximum à Zermatt	3300m
Limite des névés maximum à Chamonix	2800 m

Précipitations et volumes annuels

Les précipitations en haute altitude sont difficiles à mesurer du fait qu'elles se produisent souvent sous forme de neige chassée par le vent.
Par recoupement avec des sondages de neige recouvrant les glaciers, on trouve qu'un totalisateur en haute montagne ne mesure qu'une partie des précipitations nivales, avec un déficit de 10–30%.
Depuis 1960, GD (Grande Dixence) exploite un totalisateur à 2800 m d'altitude dans une large cuvette orientée au sud (Riedmatten). Le bassin versant de 4,85 km², sans glace, permet de mesurer les volumes d'écoulement pratiquement sans distorsion, si l'été est chaud avec fusion totale des neiges (fig. 4 et 5). L'écoulement doit donner a priori une

image assez proportionnelle des précipitations.

Mais deux phénomènes perturbent la corrélation:

1. Certaines années, comme en 1977, où après de grosses chutes de neige hivernales, l'été frais n'a pas réussi à faire fondre toute la neige, dont certaines zones sont restées sous forme de névés. En principe, cette neige doit fondre les années suivantes, si les conditions météorologiques estivales sont favorables.

2. Il existe des infiltrations dans les éboulis et moraines adjacentes, ainsi qu'une percolation importante dans une galerie proche, donc ce sont des eaux qui ne sont pas mesurées à la prise.

Pour 124 cm CE/an de précipitations (octobre–mai: 50 cm CE), on mesure 74 cm CE/an d'indice d'écoulement, soit un déficit de 50 cm CE qui se décompose comme suit: environ 30 cm CE/an évaporation et environ 20 cm CE/an pertes par infiltrations.

Le coefficient de corrélation entre volume et précipitations annuelles (V–P) est de 0,72.

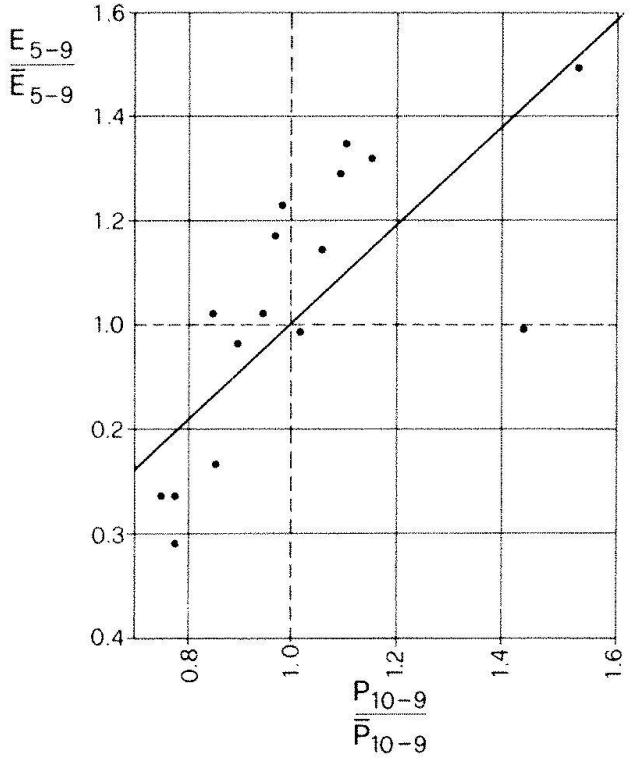

Fig. 4. Corrélation entre l'écoulement estival $\bar{E}_{5-9}$ du bassin versant de Fontanesses (4.85 km², sans glaciers) et les précipitations annuelles P_{10-9} du totalisateur de Riedmatten (2800 m.s.m.), dans la période de 1960/61 à 1976/77. Altitude maximale du bassin 3393 m.s.m. Altitude des prises 2420 m.s.m. Valeurs moyennes: $\bar{E}_{5-9}$ = 70 cm CE, $\bar{P}_{10-9}$ = 124 cm CE.

Si on compare les précipitations annuelles avec les écoulements de bassins glaciaires, on s'aperçoit que plus la glaciation est élevée, plus la corrélation diminue. Ainsi, pour 1964, année sèche et chaude, le bassin nival est fortement déficitaire.

Par contre, pour le bassin de Pièce (67% de glace), le volume d'eau est très supérieur à la moyenne.

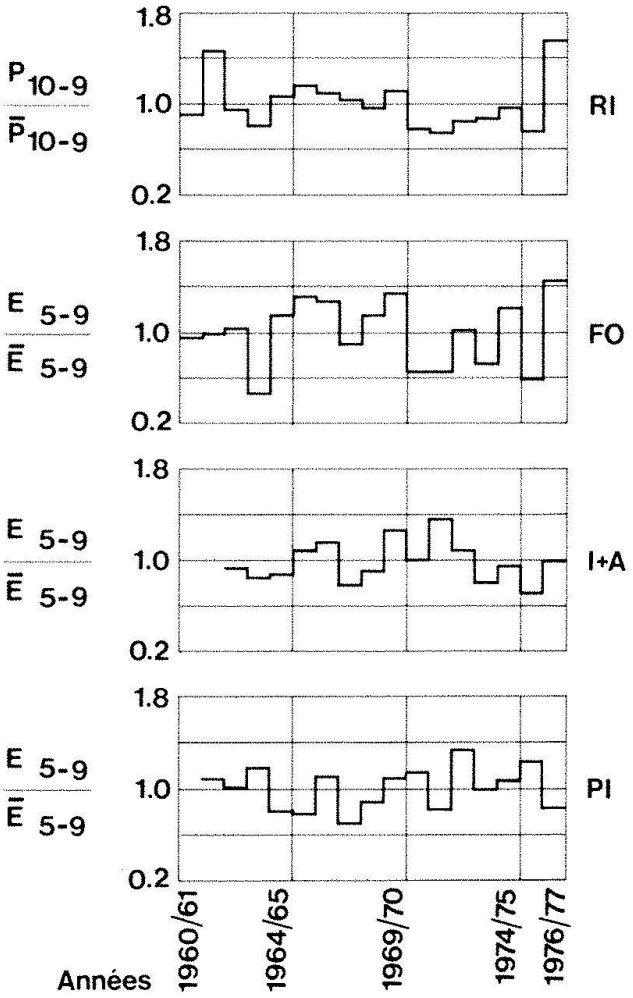

Fig. 5. Précipitations annuelles de Riedmatten et indices d'écoulement estivaux des bassins versants de Fontanesses, d'Ignes et Aiguilles Rouges ainsi que de Pièce. P_{10-9}: Précipitations octobre à septembre. E_{5-9}: Ecoulement mai à septembre. $\bar{P}_{10-9}$ et $\bar{E}_{5-9}$: Valeurs moyennes. RI: Totalisateur Riedmatten, 2800 m.s.m., $\bar{P}_{10-9}$ = 124 cm CE/an.

Bassin versant	Surface km²	Glaciers km²	Glaciers %	Altitude m.s.m. max	Altitude m.s.m. min.	$\bar{E}_{5-9}$ cm CE/an
FO: Fontanesses	4.85	0	0	3393	2420	70
I + A: Ignes et Aiguilles Rouges	7.36	2.03	27	3646	2400	106
PI: Pièce	2.7	1.82	67	3796	2450	165

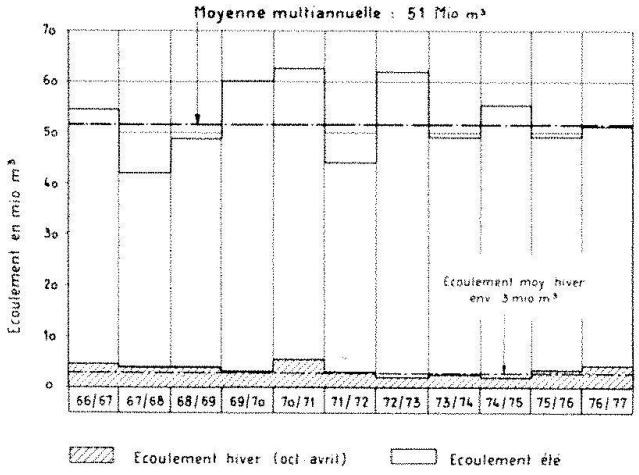

Fig. 6. Ecoulements hivernaux, estivaux et annuels mesurés de 1966/67 à 1976/77 à Ferpècle. Bassin versant: 36 km², Surface glaciaire: 22 km².

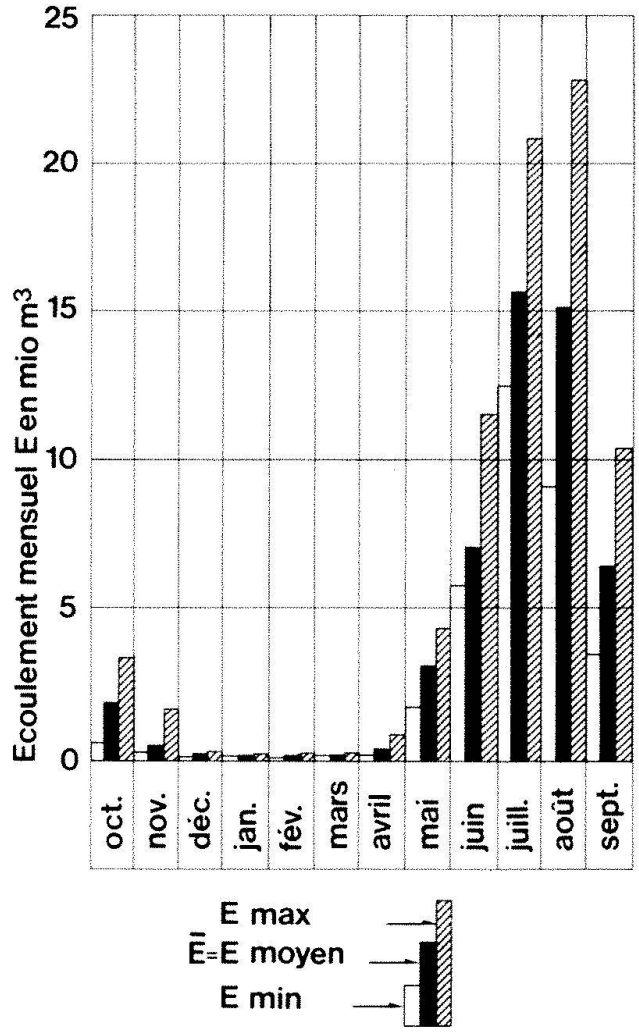

Fig. 7. Ecoulements mensuels moyens, minimaux et maximaux du bassin versant du Ferpècle, de 1966/67 à 1976/77. Bassin versant: 36 km²; Surface glaciaire: 22 km²; Glaciation 64%. Altitude maximale: 3720 m.s.m.; Altitude des prises: 1907 m.s.m. Orientation: Nord. Indice d'écoulement annuel: ~1.42 m CE (été: 1.34 m CE)

Le phénomène inverse se produit pour l'année 1977: précipitations importantes, été frais.

Bassin de Ferpècle

Le volume d'eau annuel d'un bassin glaciaire (64%), prise à 1907 m, se décompose comme suit (fig. 6 et 7): hiver d'octobre à avril environ 5%; été de mai à septembre environ 95%.
Plus l'altitude de captage s'élève, plus la part d'hiver diminue pour arriver à 1% à 2400 m d'altitude.
Les volumes d'eau mensuels fluctuent sensiblement en fonction des conditions météorologiques. De décembre à mars, ils sont assez constants; dispersions très faibles autour de la moyenne. Par contre en octobre, novembre et d'avril à septembre, les fluctuations sont très grandes.

Ecoulements mensuels

La participation mensuelle des écoulements varie selon la glaciation. Ainsi, un bassin nival fournira beaucoup d'eau dès le début de l'été, tandis qu'un bassin glaciaire fournira l'essentiel de l'eau dès le milieu de l'été (fig. 8).

Débits journaliers

Les débits moyens journaliers d'été (fig. 9) varient selon l'enneigement hivernal (couverture neigeuse), les conditions climatiques, les dimensions du glacier, la saison et la limite du névé.
Ainsi, la fig. 9 montre les débits moyens journaliers du grand bassin de Gorner, lors d'une année chaude. Les grands glaciers amortissent les variations climatiques et les débits sont en quelque sorte «freinés» en cas de refroidissement ou de réchauffement, surtout en début de saison. Après un hiver à faible enneigement, on a sur l'ensemble de l'été des rayonnements et des températures élevées, sauf à la fin de chaque mois, avec un nouvel enneigement du glacier dans sa zone d'ablation. A relever l'ampleur du rapport des volumes journaliers maxima et minima lors d'un été chaud.

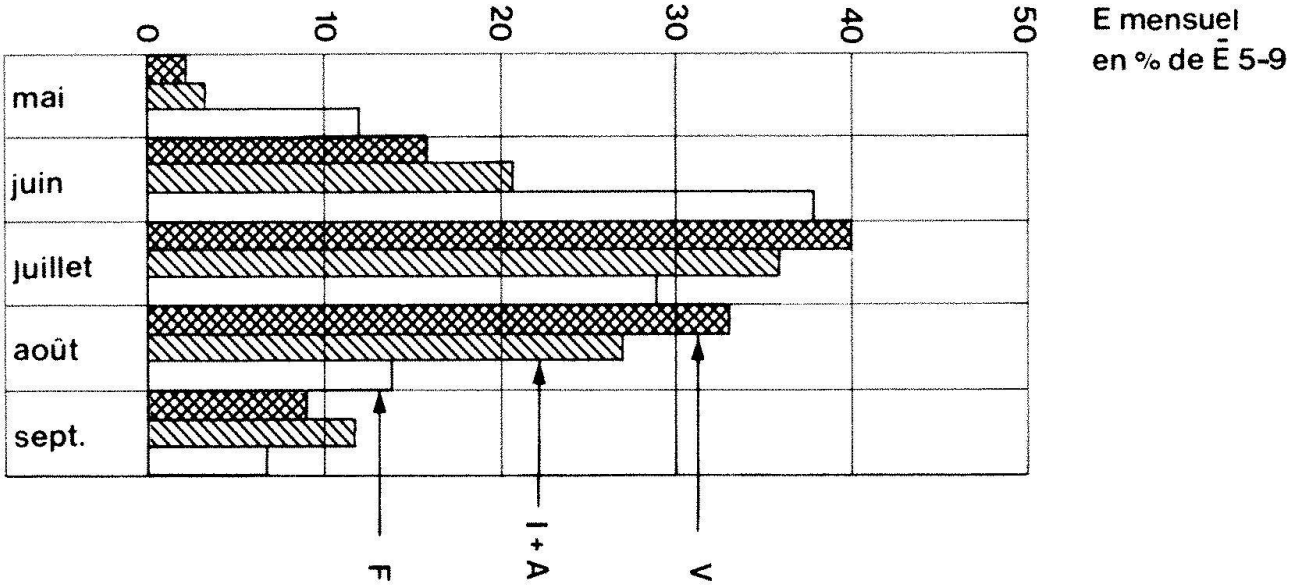

Fig. 8. Indices moyens d'écoulements mensuels Ē de trois bassins versants voisins de glaciation différente, en % des indices moyens d'écoulements estivaux $\bar{E}_{5-9}$ de mai à septembre, de 1963 à 1971.

Bassin versants		Surface km²	Glaciers km²	%	Orientation	$\bar{E}_{5-9}$ cm CE
V	Vouasson	3.14	1.93	61	Nord-Est	105
I + A	Ignes + Aig^lles Rouges	7.36	2.03	27	Est	102
F	Fontanesses	4.85	0	0	Est	71

Remarque: Les débits d'hiver doivent représenter 2 à 3% des volumes d'été pour Vouasson, Ignes et Aig^lles Rouges, et 15 à 20% pour Fontanesses.

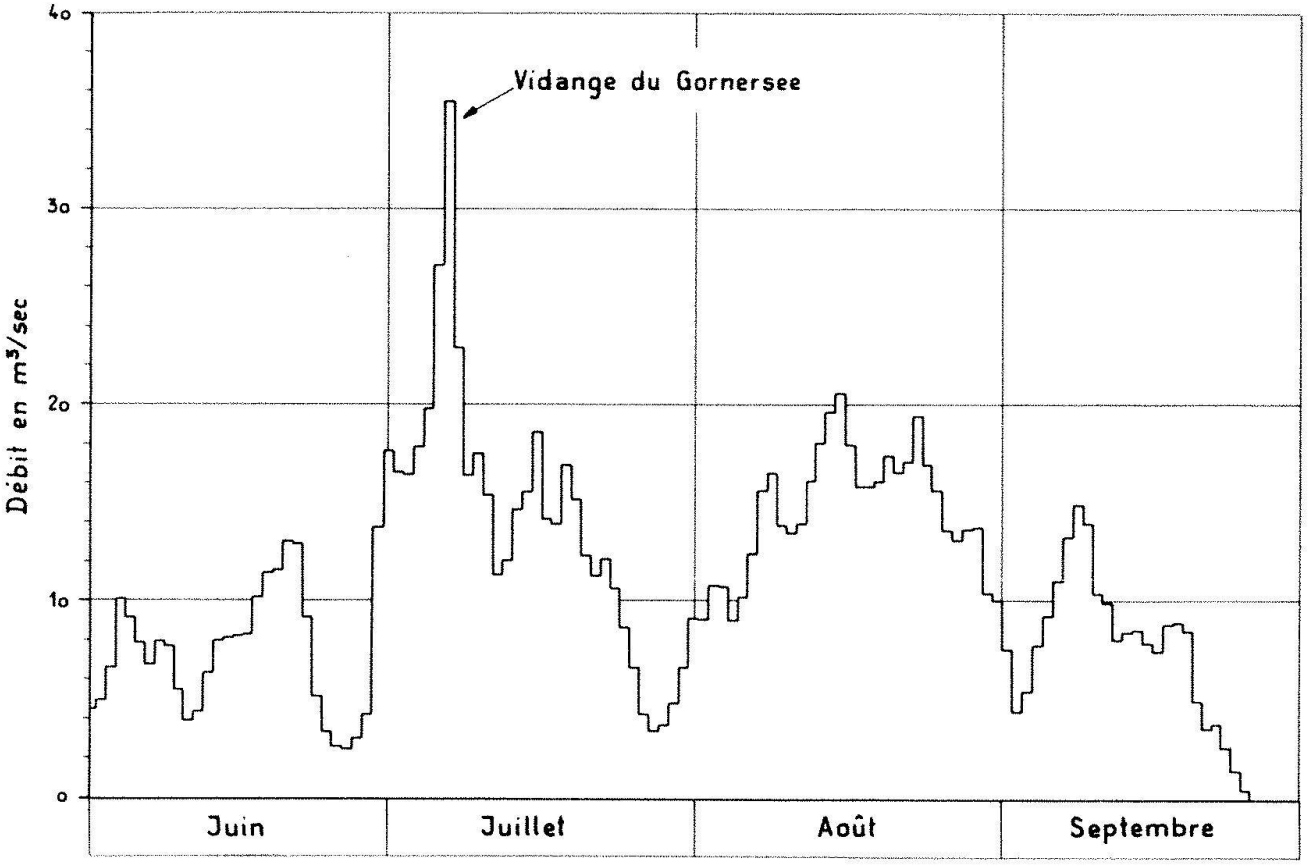

Fig. 9. Débits moyens journaliers mesurés dans la prise du Glacier du Gorner en été 1973. Bassin versant: 80.6 km²; Surface glaciaire: 61.6 km²; Glaciation: 76%.

Débits instantanés

En début de saison, la courbe journalière des débits est relativement plate, puis elle se module selon une sinusoïde déformée avec un rapport d'amplitude $(Q_{max})/(Q_{min})$ qui est très élevé en fin d'été (fig. 10 et 11). De plus, pour le bassin de Stafel, les heures d'écoulement des débits minima et maxima passent respectivement de 11 et 20 h. en début d'été, à 9 et 17 h. en fin d'été.

Ces phénomènes proviennent de la couverture neigeuse qui crée, surtout en début de saison, une rétention d'eau et qui disparaît en fin de saison; limite élevée du névé; et des canaux d'écoulement sous-glaciaires se recréant et s'agrandissant au fur et à mesure, avec l'été, en facilitant le passage de l'eau.

Elliston a remarqué sur le glacier du Gorner qu'en début de saison presque toutes les eaux de fusion s'écoulent en surface, puis par un phénomène régressif, avec la remontée de la limite du névé, elles s'écoulent à l'intérieur du ou sous le glacier.

Martinec, après examen des courbes de débits glaciaires, a établi un coefficient de tarissement. Ainsi on s'aperçoit que sur un grand glacier on peut avoir, dans le débit de sortie du glacier, des eaux qui proviennent de fusion de plusieurs jours en arrière (rétention).

Afin d'illustrer le rapport de modulation des

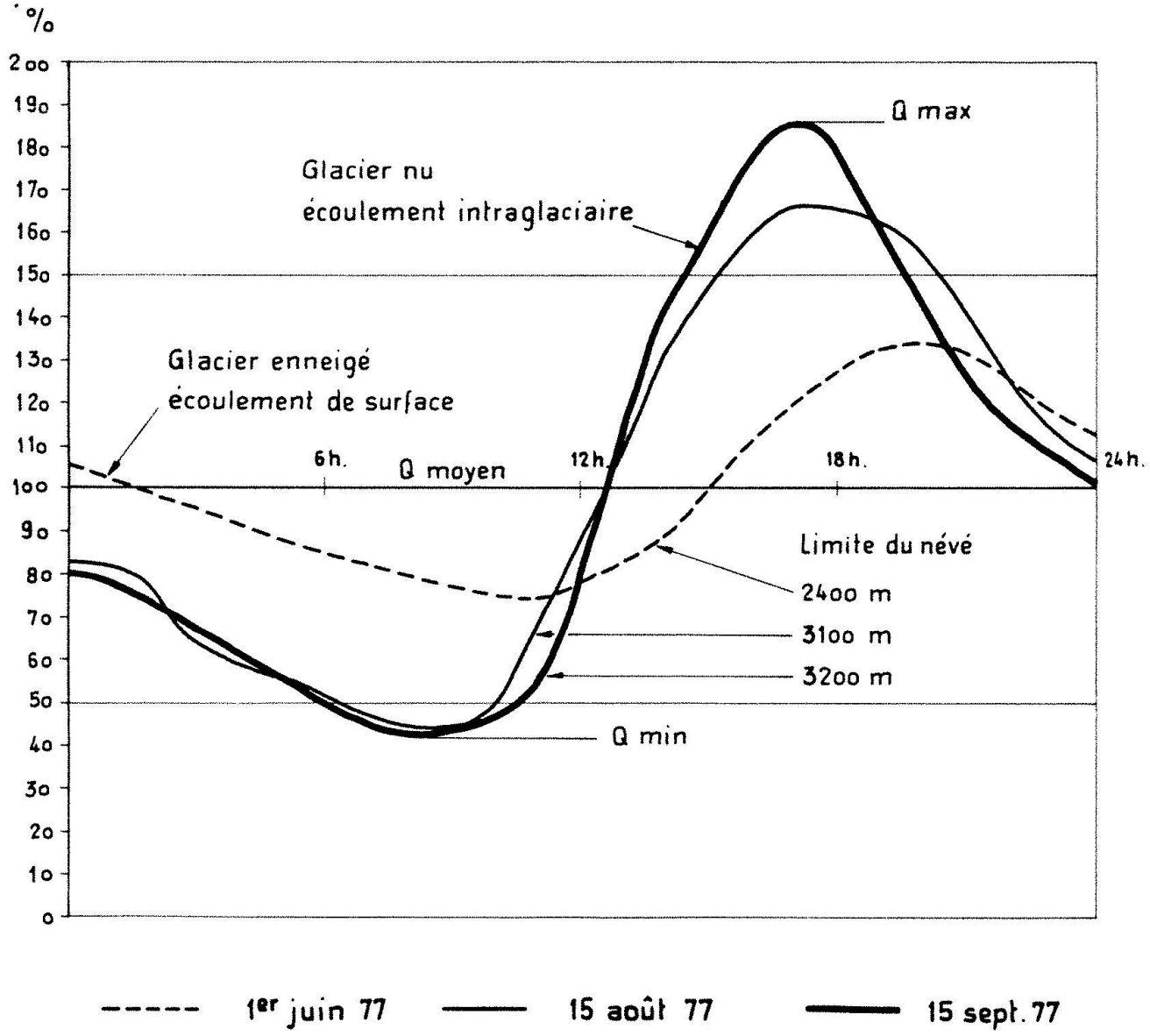

Fig. 10. Débits du bassin versant glaciaire de Z'Mutt en % du débit moyen journalier, les 1er juin 1977, 15 août 1977 et 15 septembre 1977. Surface du bassin: 35.2 km², Surface des glaciers 19.4 km² (en 1955). Orientation: Est.

débits en fonction des saisons, on a reporté le rapport $(Q_{max})/(Q_{min})$ pour le bassin de Stafel (glacier de Z'Mutt) en 1977 et en 1978.
En 1978, du fait des grosses chutes de neige hivernales et de l'été frais, ce rapport est réduit de 30% environ.

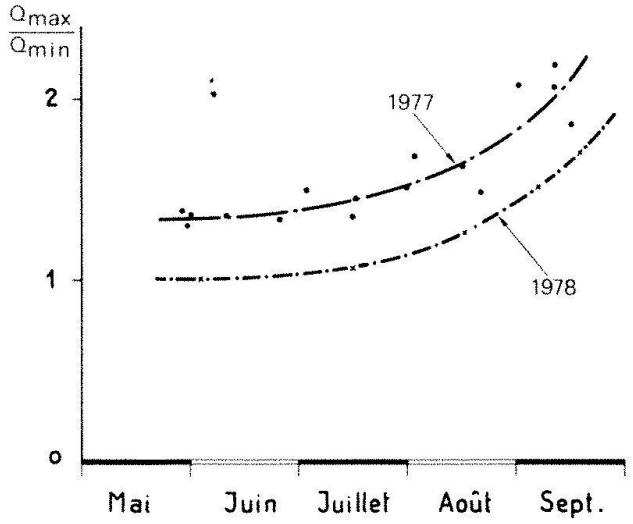

Fig. 11. Rapport des débits Q maximum/Q minimum en fonction de la saison, de mai à septembre, du bassin versant de Z'Mutt, en 1977 et 1978. Limite de névé maximale: ~3200 m.s.m.

Albedo: paramètre important de fusion

L'albedo se définit comme le rapport du rayonnement réfléchi au rayonnement incident, dans la gamme des ondes courtes. En 1965, partant d'expériences faites en Antarctique par Lorius, nous avons équipé un hélicoptère de solarigraphes Morikofer, l'un mesurant le rayonnement total du ciel, l'autre mesurant le rayonnement réfléchi par le sol. Après étalonnage au glacier d'Aletsch, par une équipe du VAW (professeur Kasser) opérant sur la glace, nous avons pu déterminer que la hauteur maximale de mesure pour le rayonnement réfléchi ne devait pas dépasser 50 m et que la rotation des pales de l'hélicoptère ne perturbait pas les mesures de rayonnement total (sans ombre de la cabine).
Le 21 août 1965, nous avons pu effectuer rapidement des mesures d'albedo sur les axes longitudinaux des glaciers de Gorner, de Findelen, de Z'Mutt et de Ferpècle (fig. 12).
A priori, l'albedo d'un glacier varie peu au cours des ans, mis à part des «encrassements» occasionnels de retombées de poussières provenant du Sahara.

Pour Findelen, on a:

	Altitude	Albedo
Glacier dégagé de neige	2500	0,17
Glacier dégagé de neige	2900	0,22
Limite du névé inférieur	3000	0,35
Limite du névé supérieur	3150	0,70
Pour d'autres glaciers:		
Z'Mutt, glacier «noir» (sans neige)	2400	0,18
Z'Mutt, chutes de séracs	2900	0,40

Un glacier dégagé de neige absorbe donc 2,5 fois plus d'énergie de rayonnement qu'un glacier enneigé, d'où grossièrement une fusion de glace 2,5 fois plus importante.

Crues particulières

Certains phénomènes accidentels viennent perturber les débits naturels de fusion.

Précipitations orageuses

Des orages en début ou en fin de saison n'ont pas la même influence. Au début de saison, la neige provoque une rétention des précipitations, d'où un amortissement sur les crues. Par contre en fin de saison les glaciers libres de neige ruissellent et favorisent des écoulements rapides (canaux de drainage agrandis).
En août 1971, lors d'un orage avec des précipitations de 25–35 mm en 12 heures, on a mesuré les débits de crue. On a calculé les débits spécifiques de crue et on a tracé la droite enveloppe de débits maxima spécifiques, en fonction des surfaces, soit 1 m^3/sec./km^2 pour un bassin de 2 km^2, contre 0,4 m^3/sec./km^2 pour un bassin de 80 km^2. Il s'agit de débits de crue rapide sans rétention des précipitations.
Depuis 100 ans, Zermatt a subi 2 fois des précipitations maximales qui ont dépassé 100 mm en 24 heures. Pour ces précipitations on peut s'attendre à des débits de crûe 4 à 5 fois plus élevés. EdF en appliquant la méthode Gradex au bassin de Stafel, trouve une crue centennale de 60 m^3/sec., soit un débit semblable à celui que l'on peut trouver par extrapolation de la droite enveloppe. Toutefois, on est loin des 12–15 m^3/sec./km^2 mesurés sur les bassins de la Melezza et d'Isorno (Tessin), lors de l'orage catastrophique du 7 août 1978.

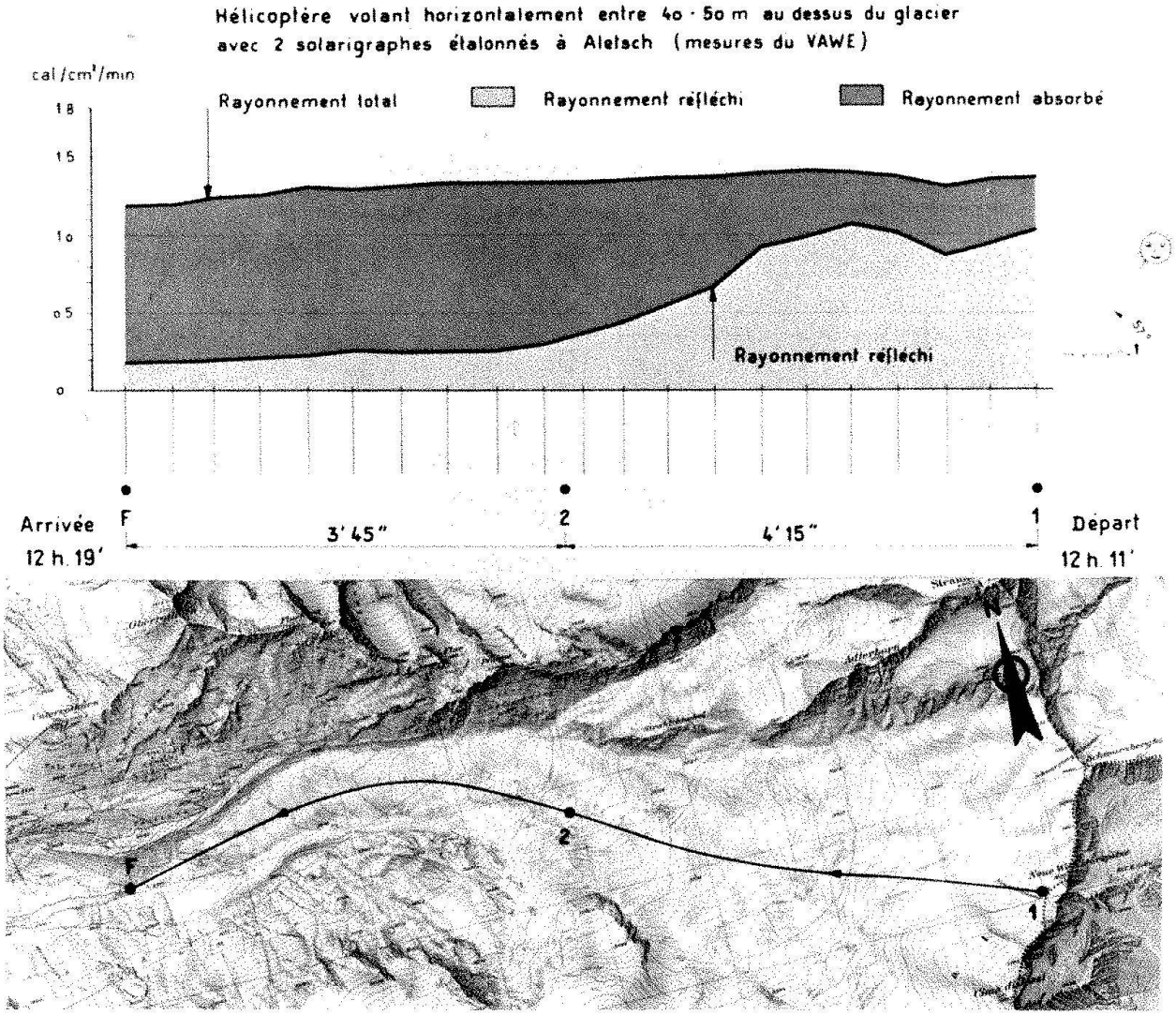

Fig. 12. Mesure d'albedo sur l'axe longitudinal du Glacier de Findelen le 21 août 1965.

Débâcles glaciaires

Les sinistres débâcles glaciaires de Gietroz et de l'Allalin sont encore en mémoire. Ce qui l'est moins, ce sont des débâcles de faible importance provenant de petits glaciers, en général en crue et qui en été et quelquefois en hiver, laissent s'écouler 1-3 m³/sec. pendant quelques heures. Ces eaux peuvent s'accumuler (intra ou sous-glaciaire) pendant des années à la limite des névés (Hohberg 1966) et se vidanger de façon aléatoire, après plusieurs années de rétention.

La débâcle glaciaire la mieux connue et la plus régulière est celle provenant du lac du Gorner (2600 m) (fig. 13), situé à la confluence des glaciers du Gorner et du Grenz. Ce lac, observé par Lambien en 1680 déjà, se vidange chaque année de fin juin à début septembre, avec des débits élevés dont le maximum connu est celui de 1944, avec un débit maximum de 200 m³/sec. (croix de la Douane de Zermatt: plan d'eau jusqu'à mi-hauteur).

Depuis 1965, GD mesure le niveau de montée des eaux dans le lac et le débit à la sortie du glacier.

La courbe de vidange de 1969 montre les débits qui augmentent de façon irrégulière pendant 3 jours et qui brusquement diminuent pour revenir au débit normal de fusion du glacier. Dès le premier jour de vidange, les eaux sont chargées de sédiments jaunes caractéristiques. Ensuite, des «gravillons» de glace et des blocs importants sont arrachés par les écoulements intenses intra ou sous-glaciaires (mis en charge hydro-statique du glacier) (fig. 13).

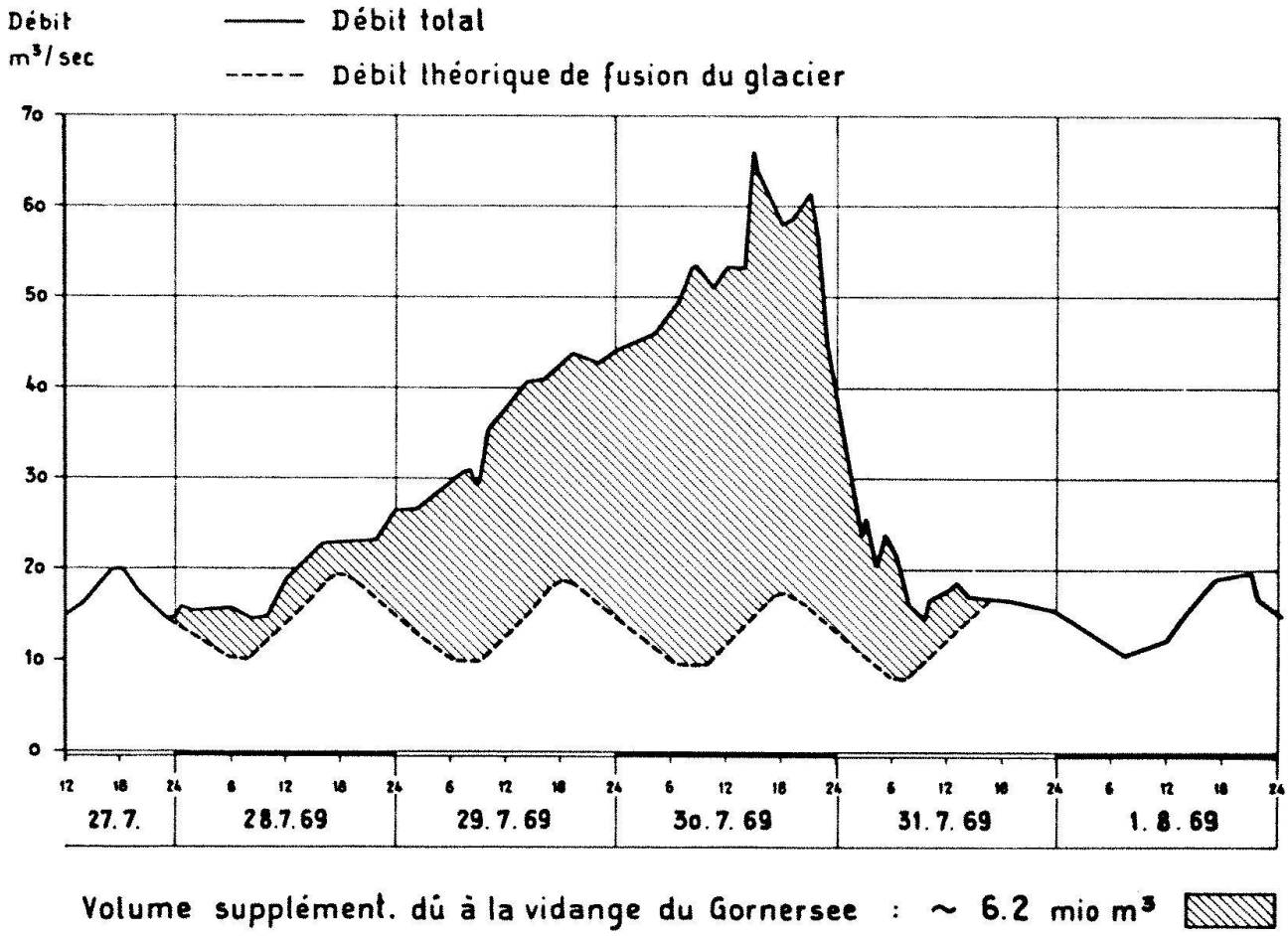

Fig. 13. Vidange du Gornersee en juillet 1969. Débits mesurés à la prise de Gornera.

Quelquefois, par suite d'un refroidissement estival, le lac se remplit à nouveau et peut créer une deuxième vidange de faible importance en fin d'été (septembre 1977).
Le mécanisme d'obstruction et d'ouverture des canaux n'est pas encore éclairci mais les influences de différents phénomènes permettent d'émettre des hypothèses plausibles:
Glace froide du Grenz −2, −3°C (H. Röthlisberger).
Surcreusement important du bed rock au droit du Gornergrat, avec existence d'un plan d'eau important à l'intérieur du glacier.
Ecoulement continu des glaces dans la zone d'accumulation, en opposition avec les écoulements différentiels de la zone d'ablation (élevés en été, faibles en hiver).
Les fluages verticaux de la glace sans eau sous-glaciaire, donnent l'hypothèse la plus favorable pour expliquer l'obstruction des canaux. A relever qu'en 1976, des employés GD ont pu pénétrer dans des galeries naturelles sous 150 m de la surface glaciaire, en aval du lac du Gorner.

Remarques

L'hydrologie des bassins versants alpins est très variable et n'est par régulière au cours des ans. De plus, les variations de surfaces glaciaires influencent l'hydrologie à long terme.
A titre documentaire, les glaciers valaisans, entre 1915 et 1968, ont diminué de surface, soit environ de 160 km². Kasser a calculé qu'à des conditions climatiques semblables, le volume estival du Rhône présente un déficit de 700 mio de m³ environ. Ce phénomène s'est aussi produit sur les bassins analysés dans cette étude. Relevons encore que le débit d'eau annuel d'un bassin glaciaire représente environ 1 à 2% du volume des glaces stockées.

Matériaux en suspension et charriages: alluvions

Les glaciers et les torrents glaciaires érodent les terrains et les matériaux arrachés vont des

blocs les plus gros (100 m³) aux grains les plus fins. Ces transports solides sont très sensibles aux orages, aux débits de crue et à leurs répartitions, ainsi qu'aux moraines résiduelles et à la géologie.

Matériaux en suspension sur torrents glaciaires

Ces matériaux fins proviennent essentiellement du frottement du glacier sur son lit rocheux et de l'abrasion élevée du torrent glaciaire en été. La détermination des concentrations et des matériaux transportés intéressent les sociétés hydro-électriques, car elle permet de déterminer l'importance des dépôts sédimentaires.
Dès 1961, Grande Dixence, en prévision des ouvrages de décantation, a exécuté des mesures de concentrations sur les eaux du glacier du Gorner. Avec 3 mesures par jour, on s'est aperçu de la grande variabilité des concentrations pas du tout corrélées avec les débits (fig. 14).
Dès 1972, Grande Dixence partant des expériences réalisées par Collet et Bruschin, a mesuré les concentrations sur différents torrents. Pour ne pas travailler avec de l'appareillage délicat elle a mis au point un cône décanteur de 50 l muni d'un tube réservoir volumétrique en plexiglas qui récupère les sables et limons. Chaque jour à 13 h (passage au débit moyen), on prélève 50 l d'eau dans le torrent où les écoulements sont torrentiels, et on laisse décanter pendant 24 h. On procède à la mesure des sables déposés et à la vidange et on recommence l'opération. Après étalonnage de l'appareil, on a pu tracer des droites de corrélation entre concentrations et débits pour différents torrents.
Il est certain que ces résultats ne sont pas parfaits. Les erreurs proviennent de l'horaire du prélèvement, de l'emplacement du prélèvement, du prélèvement journalier unique.
D'après Collins (fig. 15), qui depuis 4 ans exécute des mesures détaillées, soit heure par heure (avec des bouteilles de 1 litre), soit par enregistrement continu (turbidigraphe) ou encore en recoupant ces mesures avec le cône de 50 l (prélèvement à 13 h.), il apparaît que pour les volumes moyens journaliers de sédiments cette méthode est la meilleure, car elle présente deux facteurs positifs:
Fiabilité excellente et importance des volumes en jeu. De plus, il existe une compensation des mesures extrêmes par l'effet de statistique.
Les mesures d'eau brutes sur le torrent glaciaire du Gorner indiquent des concentrations maxima de 5 à 6 gr/l. Collins a trouvé quelques valeurs sporadiques maxima de 12 gr/l pendant la vidange du lac du Gorner du 31 juillet 1974, valeurs à mettre en regard avec les 4,5 gr/l trouvés par Bruschin sur la Borgne 1966–1969.
Le record de concentration, mesuré en 1909 sur la Drance, est de 36 gr/l. Pardé a mesuré sur l'Isère 150 gr/l.
La densité de l'alluvion déposée dans l'eau, dont il faut tenir compte pour les calculs de colmatage, est le rapport (poids matériel sec)/(volume du dépôt sédimenté) sans tenir compte des effets de tassement à long terme.
Après des étalonnages on a relevé la densité de 1,6 comme Collet et d'autres.
Pour comparer les transports solides en suspension on a pris deux années de débits différents, soit l'été 1973, chaud et à gros débits, et l'été 1974, frais et à faibles débits, et a trouvé les valeurs suivantes:

Glacier	Surface du bassin versant en km²	Débit solide en suspension en m³/km² en été		en T/mio m³ d'eau en été	
		1973	1974	1973	1974
Gorner	80	1320	835	1470	1070
Stafel	36	400	500*	430	610*
Bertol inférieur	8.2	110	65	93	83
Tsidjiore Nouve	4.8	500	120	510	180

* Stafel: Influence de plans d'eau saturés ou pas en amont de la prise.

A relever la grande dispersion des résultats de Tsidjiore, car chaque année des poches glaciaires de 1–1,5 m³/sec. transportent beaucoup de «fines». A titre documentaire, la vidange du lac de Gorner en 1974, pendant 4 jours, a transporté environ 25 000 m³ contre un total estival de 67 000 m³. Pour 1975 (été frais), Collins a mesuré sur le Gorner environ 30 000 m³ (environ 48 000 t) et 5000 t pour la dissolution des roches.

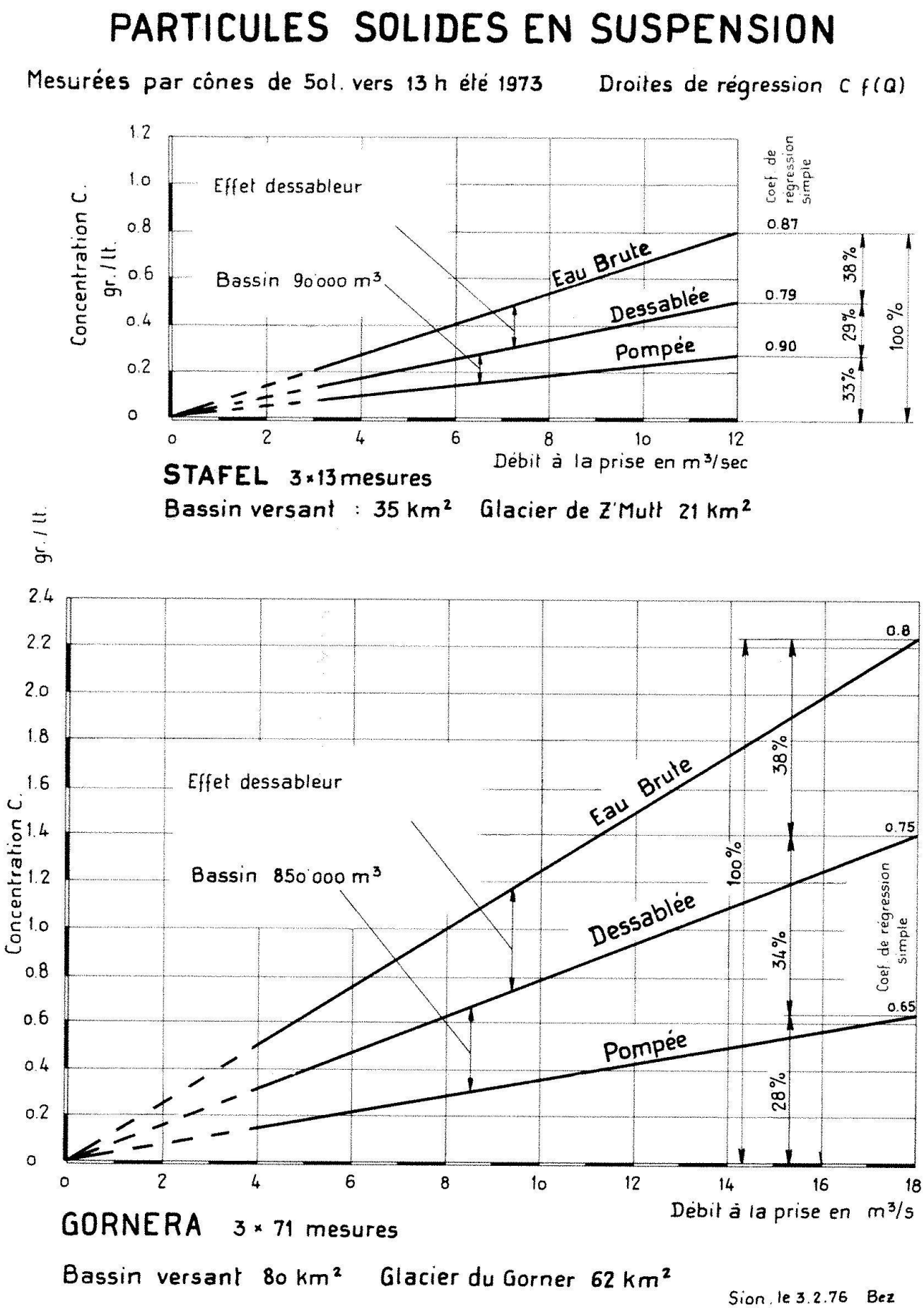

Fig. 14. Concentration de particules solides en suspension en fonction des débits aux prises de Stafel et de Gornera.

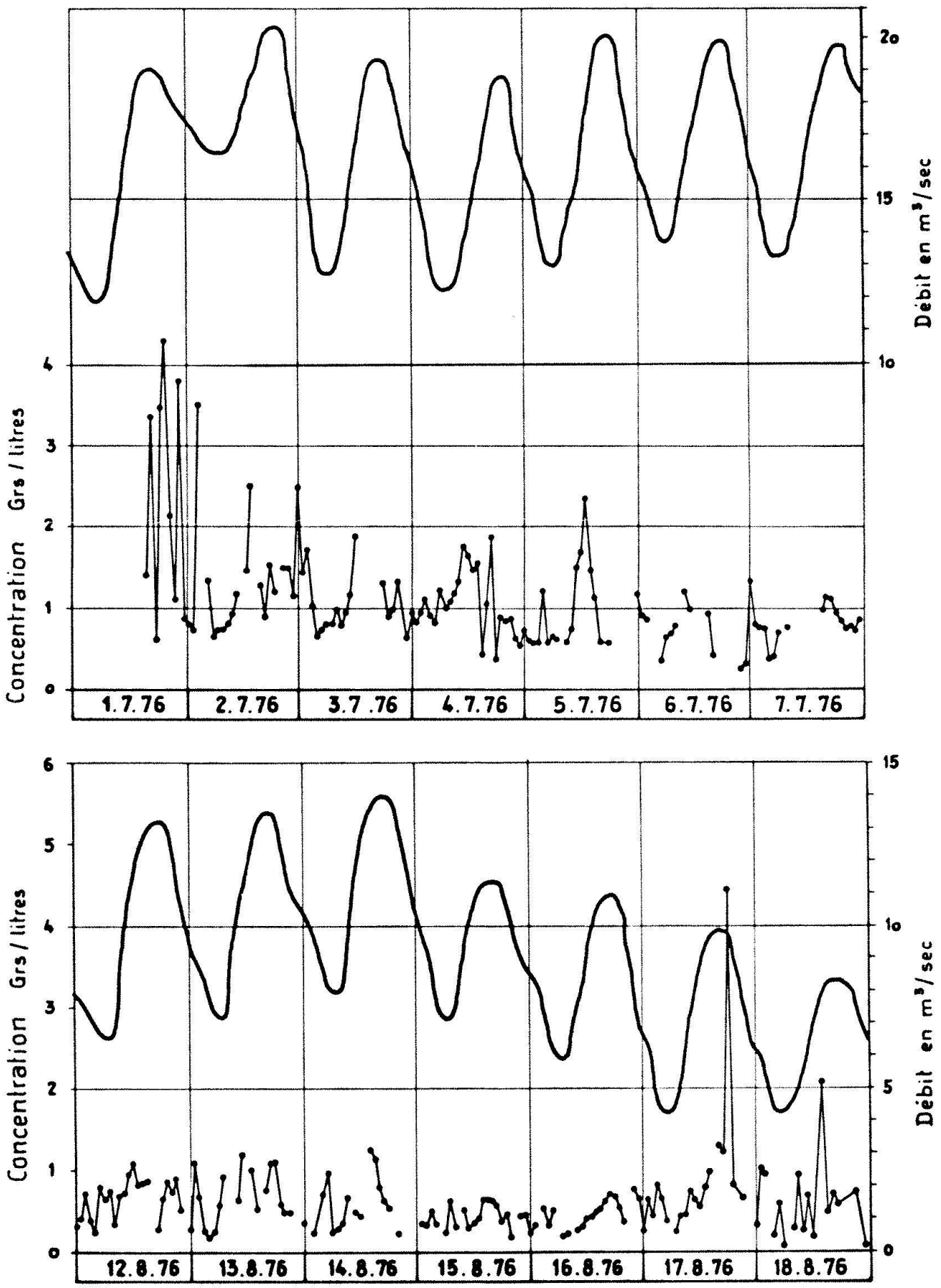

Fig. 15. Débits et concentration des matériaux en suspension à la prise du Glacier du Gorner, mesurés par Collins (University of Manchester).

Ces valeurs recoupent certaines mesures anciennes:

Massa	500 m^3/an/km^2
Dixence	650 m^3/an/km^2
Drance	850 m^3/an/km^2
Arve, Genève 1890 année moyenne	500 m^3/an/km^2

Pardé cite des transports solides en Italie de 4000–5000 m^3/an/km^2.

A Palagnedra (Tessin), l'unique orage du 7 août 1978 a donné environ 15 000 m^3/km^2 en matériaux sédimentés et charriés.

Relevons qu'à débits égaux, les concentrations sont plus élevées en début qu'en fin d'été (fonte des neiges, moraines gorgées d'eau).

Des mesures comparatives de concentrations montrent l'influence approximative d'ouvrages hydro-électriques, tels que dessableurs classiques (vitesse de translation à débit nominal 20 cm/sec., efficacité 35–50%, selon les débits) et bassin de compensation de 100 000 à 800 000 m^3, (efficacité 30–40%).

Matériaux en suspension dans des lacs

Les concentrations de matériaux en suspension dans le lac d'eau glaciaire de Z'Mutt, 800 000 m^3, ont été déterminées par 2 méthodes:

Mesures instantanées par prélèvement de 1 litre (bouteilles de Friedinger) à différentes profondeurs, avec filtrat et pesage.

Il existe un courant de densité à partir de 11–12 m^3/sec. qui par recoupements s'écoule à une vitesse de 0,4–0,5 m/s.

Les concentrations sont 3 à 4 fois plus élevées en profondeur qu'en surface. Par contre, les concentrations de fond sont 2 fois plus faibles que les eaux d'arrivée, ce qui met en évidence un phénomène de dilution partielle (fig. 16).

Mesures de sédimentations de plusieurs jours dans des tubes placés à différentes profondeurs du lac: Les concentrations sont relatives, mais elles intègrent bien les variations. Elles confirment les mesures instantanées et donnent des concentrations de fond 4 à 7 fois plus élevées qu'en surface. De plus, en analysant les fines récupérées, on s'aperçoit que les courbes granulométriques varient. Ainsi, tous les grains supérieurs à 40 μ (plus de 60%) qui s'écoulent dans le fond du lac ne se retrouvent plus 30 m plus haut (fig. 17).

La macrophotographie des sédiments par microscope électronique permet l'analyse de détails des particules en suspension, en majeure partie des grains de silices, aux surfaces très rugueuses, aux aspects brisés et éclatés et en formes généralement lamellaires.

Du fait des eaux à basses températures (1–2°C), la viscosité cinématique est élevée. Ainsi les particules soumises à des forces importantes de viscosité (forces gravitaires faibles) ne se décantent que très lentement; c'est pourquoi tous les lacs glaciaires sont troubles et de couleur différente, déterminée par la roche locale (fig. 18).

L'examen des courbes granulométriques des sédiments à différents endroits démontre bien ces phénomènes: Les dessableurs ne sont efficaces qu'à partir de 30 μ jusqu'à 200 μ. Le lac de Z'Mutt, long et profond, est efficace de 10–15%, dans toute la gamme de granulométrie.

Pour le lac de Grande Dixence, contenance 400 mio m^3, profondeur maximum 200 m, l'efficacité pour la sédimentation est très grande. Ceci provient surtout de l'arrivée des eaux à l'extrémité amont du lac, tandis que le soutirage de l'eau se fait au barrage, 5,5 km en aval. Pour l'été 1975, année hydrologique moyenne, on a mesuré une concentration moyenne de 0,4 gr/l sur l'arrivée des eaux. Compte tenu des 350 mio m^3 d'eau, ce sont environ 140 000 t de sédiments qui se sont déposés dans le lac, soit environ un volume de 90 000 m^3.

Les importants soutirages d'eau ne se produisent qu'en hiver et on a mesuré des concentrations de 0,004–0,01 gr/l sur les eaux turbinées, soit un volume très faible de matériaux évacués du lac.

On peut estimer les volumes annuels extrêmes de sédiments déposés dans le lac de Grande Dixence entre environ 50–60 000 m^3 pour un été frais et environ 120–150 000 m^3 pour un été chaud.

Charriages

Reste le problème des charriages des matériaux roulés sur le fond du torrent ou en saltation. Les estimations que nous avons faites sont tirées du nombre de purges annuelles que nous exécutions sur les bassins de prédégravage.

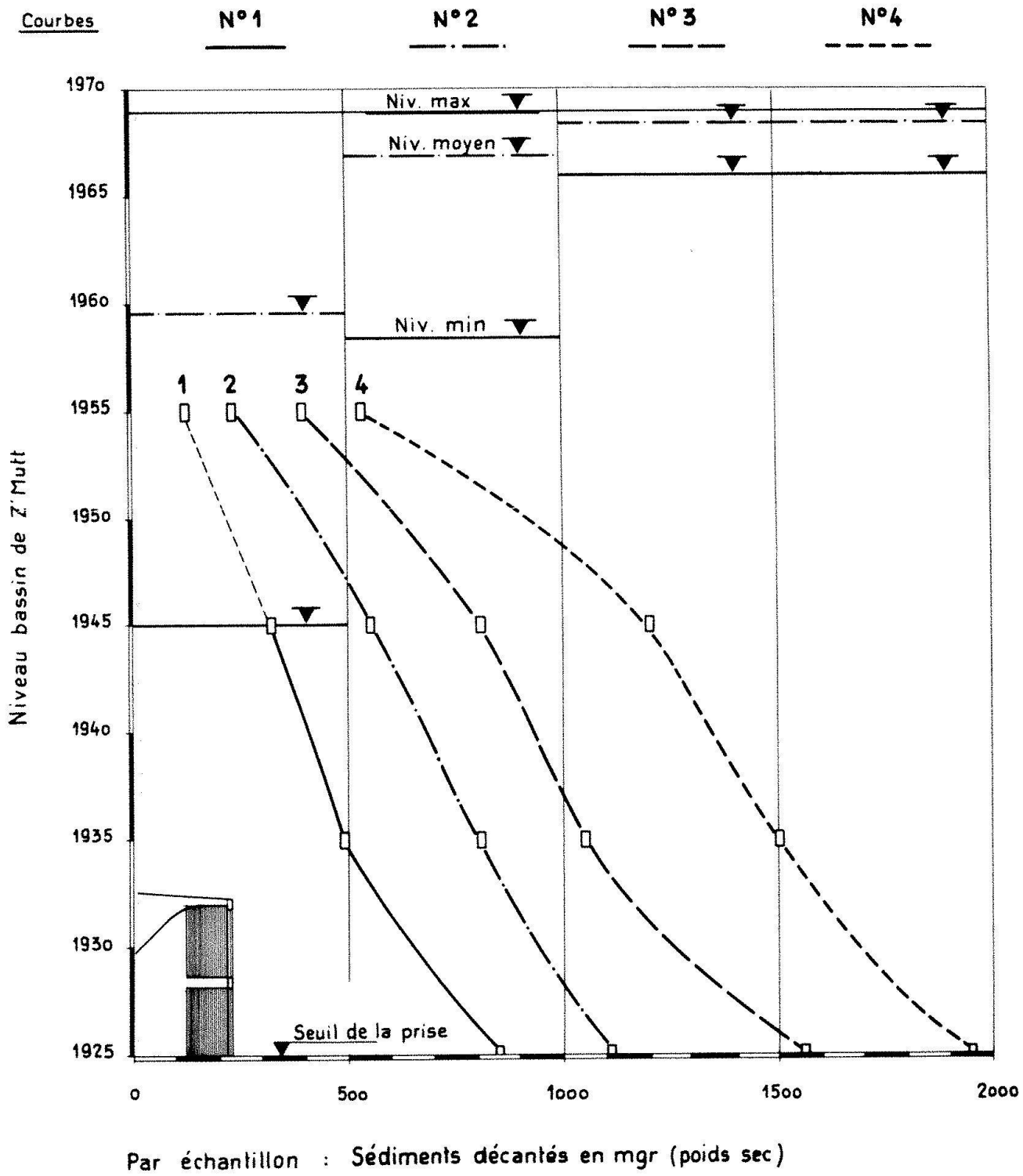

Fig. 16. Prélèvement des sédiments dans le lac de Z'Mutt en été 1977. Courbes ramenées à 10 jours.

Courbes No.	Période des mesures	Pompes No.	Marche des pompes
1	14.6.–7.7.	No. 1 + 2 + 5	intermittent
2	13.7–27.7	No. 1 + 2	permanent
3	8.7–13.7	No. 5	intermittent
4	7.7– 8.7		

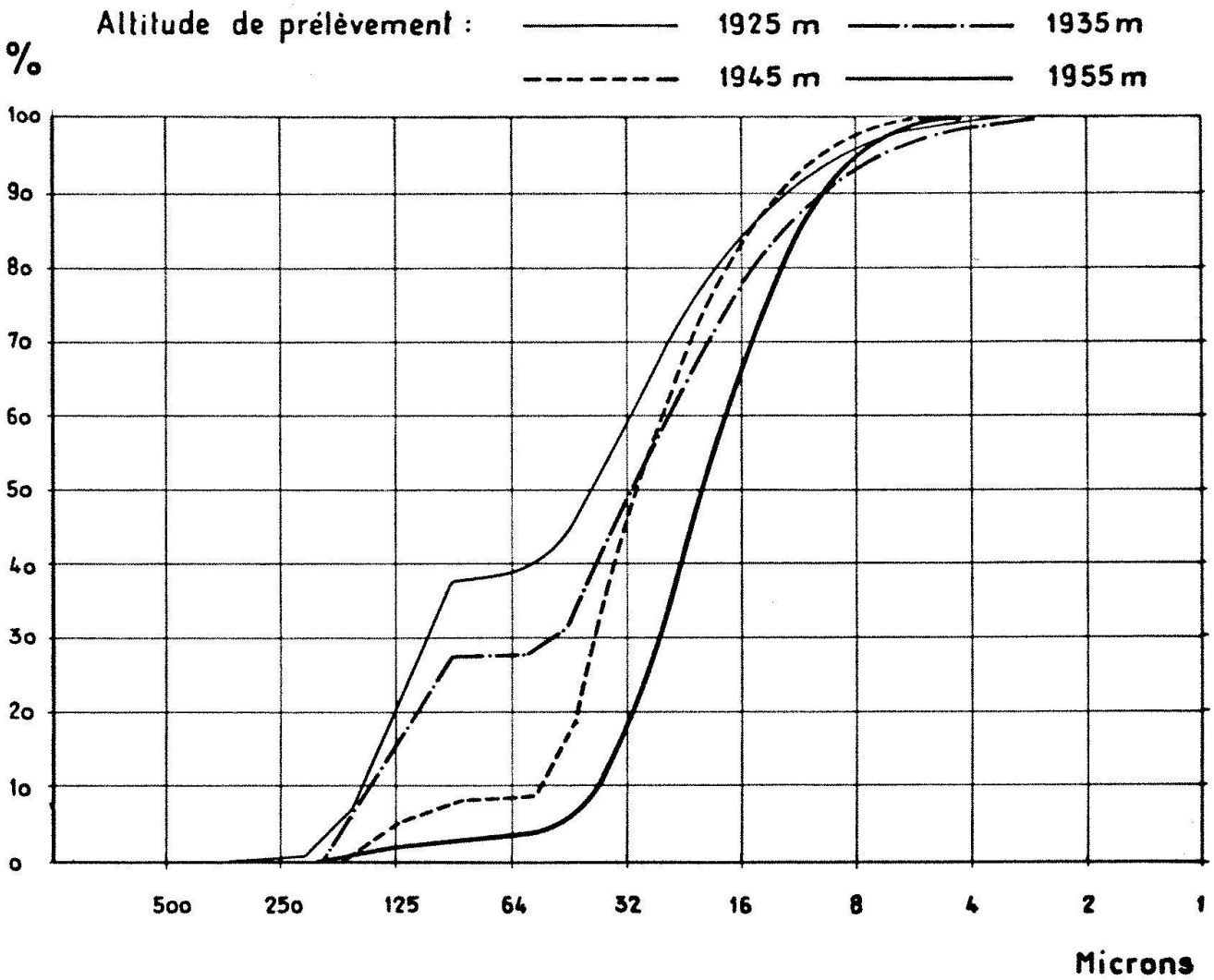

Fig. 17. Granulométrie des matériaux fins en suspension prélevés à différentes profondeurs du lac de Z'Mutt (niveau maximum à 1970 m.s.m.).

Gorner 80 km²	17000 à 35000 m³/an
soit	200 à 450 m³/km²/an
Stafel 36 km²	8000 à 15000 m³/an
soit	215 à 420 m³/km²/an
Ferpècle 36 km²	5000 à 12000 m³/an
soit	140 à 330 m³/km²/an
Bertol inf. 8,2 km²	1200 à 4000 m³/an
soit	150 à 500 m³/km²/an
Tsidjiore 4,8 km²	400 à 2000 m³/an
soit	80 à 400 m³/km²/an

Lorsqu'on compare les volumes spécifiques des matériaux transportés par suspension avec les matériaux transportés par charriage, on relève:
Pour Stafel et Tsidjiore, des volumes semblables.
Pour Gorner, les matériaux fins sont trois à quatre fois plus importants que les graviers.
Pour Bertol, qui reçoit les matériaux de trois bassins supérieurs, ainsi que la disposition de grandes moraines latérales instables, expliquent la dispersion des résultats: graviers deux à trois fois plus élevés que les matériaux fins.

Remarques

Certains bassins glaciaires comme Arb, Trift, Bis et Festi, présentent très peu de matériaux charriés ou en suspension. Seuls des orages localisés comme aux Rosses ou à Vouasson (schiste) peuvent déclencher des coulées morainiques ou de boue de plusieurs milliers de m³.
Un phénomène semblable se produit lors de débâcles glaciaires, comme à Kin où avec 100000 m³ d'eau écoulés (débit de pointe 4–5 m³/sec.), on a retrouvé 70–80000 m³ de matériaux transportés sur la route et la voie de chemin de fer Viège–Zermatt. Ils prove-

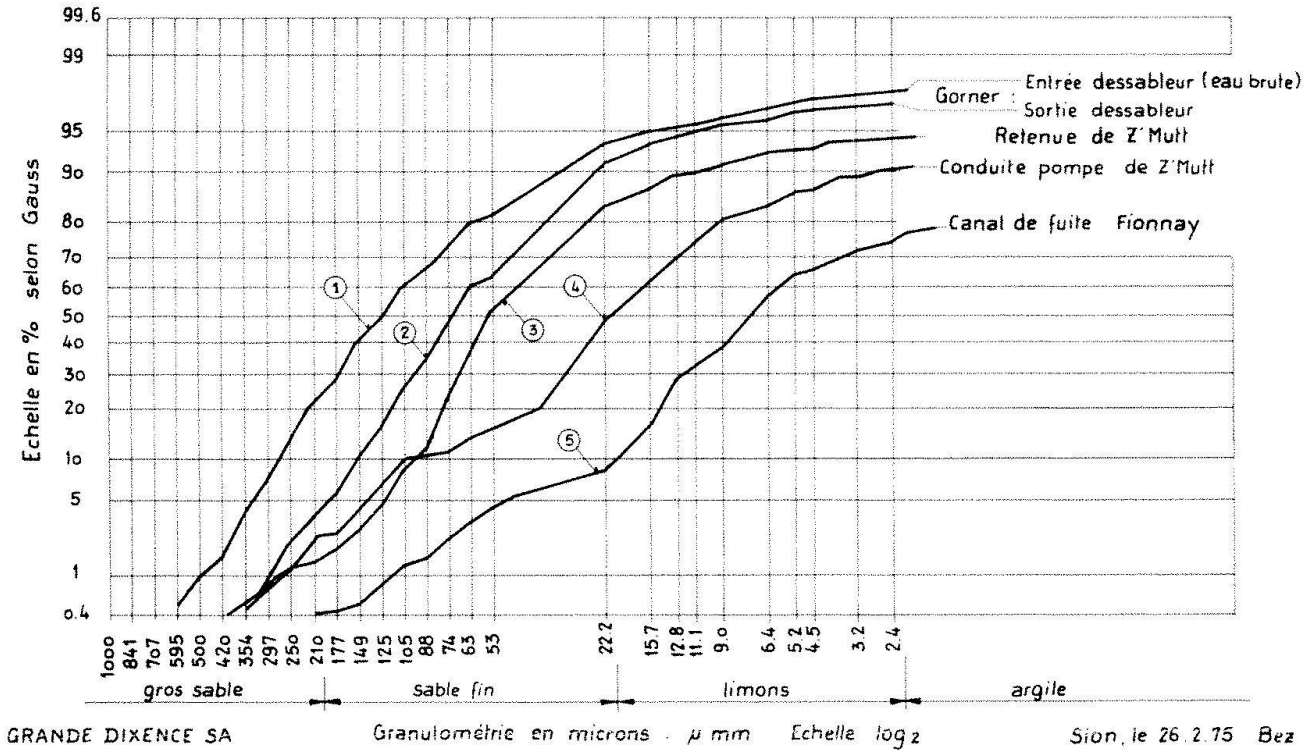

Fig. 18. Courbes granulométriques des matériaux déposés en été 1972 dans les ouvrages de Gorner, de Z'Mutt et de Fionnay (Analyses effectuées par le Laboratoire de Géomorphologie de l'Université libre de Bruxelles).

naient d'écoulements et d'érosions de 2800 m à 1400 m d'altitude.

Relevons les phénomènes de paroxysme où lors d'un orage en octobre 1977 sur le bassin versant de Ferpècle un lac naturel de 2 ha a été comblé par des charriages de matériaux comparables à quatre ou cinq ans de transports normaux.

Il est certain que tous les grands cônes de déjection que l'on rencontre dans les vallées alpines proviennent de phénomènes extrêmes: orages intenses, débâcles glaciaires importantes, etc.

A notre avis, au vu de l'importance des moraines résiduelles et de leur dégradation très aléatoire, il est exclu de calculer l'érosion d'un bassin versant glaciaire à l'aide des matériaux transportés annuellement, comme cela ce fait couramment.

Références

Bezinge A. et Schafer F. 1968: Pompes d'accumulation et eaux glaciaires. Bulletin technique de la Suisse romande no 20 282–290.

Bezinge A. 1971: Déglaciation sur les vals de Zermatt et d'Hérens. Etude présentée à la section glaciologique de la Société Hydrotechnique de France, Grenoble, les 4 et 5 mars 1971.

Bezinge A. 1972: Etude descriptive d'une forte averse sur les Alpes, présentée à la section de glaciologie de la Société Hydrotechnique de France, Paris, les 2 et 3 mars 1972.

Bezinge A. 1973: Image du climat sur les Alpes. Etude présentée à la section glaciologique de la Société Hydrotechnique de France, Grenoble, les 22 et 23 février 1973.

Bezinge A. et a. 1973: Phénomènes du lac glaciaire du Gorner, par A. Bezinge, J.-P. Perreten et F. Schafer, Union Géodésique et Géophysique Internationale. Association Internationale d'Hydrologie Scientifique. Commission de Neiges et Glaces. Symposium on the Hydrology of Glaciers, Cambridge, 7–13 Septembre 1969, 65–78 (Publication no 95 de l'Association Internationale d'Hydrologie Scientifique).

Bezinge A. 1976: Eaux glaciaires, sédimentations et usures de pompes. Etude interne Grande Dixence S.A. à Sion.

Bruschin J. 1971: Transports solides en suspension dans les rivières suisses. Bulletin Technique de la Suisse Romande, 97e année, no 14, 10 juillet 1971, 337–343.

Collet L.-W. 1916: Le charriage des alluvions sur certains cours d'eau de Suisse. Annales suisses d'hydrographies. Département suisse de l'intérieur, Berne, 1916, volume II.

Collet L.-W. 1925: Les lacs. Eléments d'hydrogéologie. Gaston Douin, Paris.

Collins D.-N. 1978: Hydrology of an Alpine glacier as indicated by the chemical composition of meltwater. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. 13, Ht. 1–2, 1977, 219–38.

Gaudet F. 1975: Les cours d'eau alpins de régime glaciaire. Thèse de doctorat Université de Lille III, 1975.
Kasser P. 1959: Der Einfluss von Gletscherrückgang und Gletschervorstoss auf den Wasserhaushalt. Wasser-Energiewirtschaft, 51. Jahrgang, Nr.6, 155–168.
Kasser P. 1973: Influences of changes in the glacierized area on summer runnoff in the Porte du Scex drainage basin of the Rhône. Publication no95 de l'AISH, 219–225.
Lugeon J. 1928: Précipitations atmosphériques. Ecoulement et hydro-électricité. Publication de l'Institut fédéral de la météorologie. Dunod, Paris.
Lutschg O. 1926: Über Niederschläge und Abfluss im Hochgebirge. Sekretariat des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes. Zürich.
Remenieras G. 1960: L'hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles, Paris, 274–413.
Singh B. and Shah Cr. 1971: Plunging phenomenon of density currents in reservoirs. Revue la Houille Blanche no 1, 1971, 59–64.
Vivian R. 1973: Les glaciers des Alpes Occidentales. Thèse de doctorat Université de Grenoble, Allier, Grenoble, 288–354.

Adresse de l'auteur:

Albert Bezinge, Ing. SIA
Chef de l'Exploitation Grande Dixence S.A.
Av. des Creusets 13
CH-1950 Sion