Transports solides en suspension dans les rivières suisses

Autor(en): **Bruschin, J. / Berney, O.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **97 (1971)**

Heft 14

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-71235

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

COMMUNICATIONS DU LABORATOIRE D'HYDRAULIQUE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Transports solides en suspension dans les rivières suisses [1]

par J. BRUSCHIN, chef de section et O. BERNEY, ingénieur

1. Introduction

Ce texte a pour but de faire connaître les résultats d'une analyse portant sur quatre années d'observations exécutées conjointement par LHYDREP et l'Office fédéral de l'économie hydraulique (OFEH) dans trois stations-témoins choisies dans le bassin du Rhône et concernant les matériaux transportés en suspension par la Grande-Eau, la Borgne et la Lonza [1] [2].

Les trois stations citées correspondent aux stations limnigraphiques d'Aigle, de La Luette et de Blatten respectivement. Les mesures de la teneur en matériaux solides ont été faites comme suit :

— les mesures « de routine », soit 8 à 10 mesures à la sonde AW-3 (par intégration verticale) réparties sur chaque mois, exécutées toujours entre 12 et 14 h par les agents de l'OFEH, dans une seule et même « verticale de prélèvement » ;

— les mesures « de contrôle » exécutées par LHYDREP consistant en une série de 22 à 26 prélèvements consécutifs à une heure d'intervalle, faits par le même procédé et sonde dans 3 verticales, dont celle réservée aux prélèvements « de routine », et deux autres observées à six heures d'intervalle, pendant les périodes hydrologiques les plus caractéristiques.

L'analyse de l'ensemble des mesures a été confiée à LHYDREP. Elle devait permettre de tirer le meilleur parti des mesures déjà exécutées et d'élaborer un programme optimisé pour les campagnes futures.

2. Principales caractéristiques des bassins, des stations et de l'équipement

Le tableau n° 1 donne les principales caractéristiques des bassins versants observés. On constate qu'il s'agit de petits bassins assez différenciés par leurs dimensions et leur type hydrologique : glaciaire pour la Lonza, nival-pluvial pour la Grande-Eau et mixte pour la Borgne. Les trois cours d'eau ont un caractère torrentiel assez net, avec des pentes moyennes dépassant dans la règle les 5 %. Les facteurs perturbateurs reconnus sont l'usine des Farettes pour la Grande-Eau, une carrière employant un canon hydraulique et un dessableur du système de la Grande-Dixence pour la Borgne. Dans le cas de la Lonza, il s'agit pratiquement d'un bassin à l'état naturel.

Les figures 1, 2 et 3 montrent les profils en travers et les positions des verticales de prélèvement, V_1 étant la verticale commune à l'OFEH et à LHYDREP. Ces profils sont

TABLEAU N° 1

Cours d'eau	Superficie	Glaciation	Altitude moyenne	Longueur rivière	Coefficient de forme	Pente	Débit moyen
	E	G/E	H_M	L	E/L^2	P	q_m
	km²	%	m	km	—	%	l/s km²
Lonza	78	40,6	2630	env. 10	env. 0,41	env. 8,0	57,7
Borgne	231	25,0	2620	26,2	0,58	6,4	35,4
Grande-Eau	132	1,9	1560	24,4	0,48	4,8	37,4

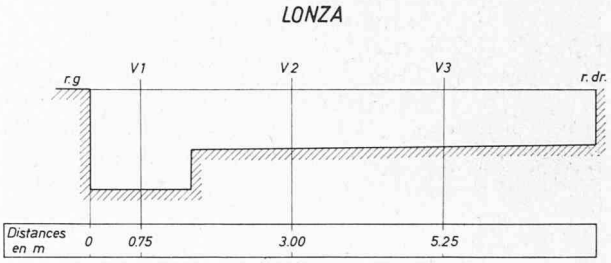

Fig. 1

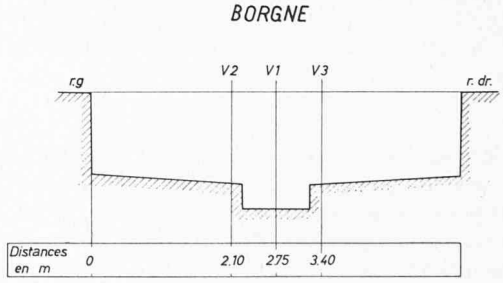

Fig. 2

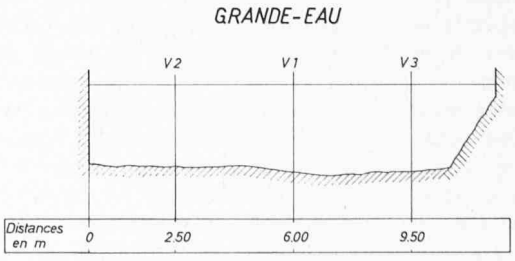

Fig. 3

Fig. 1, 2 et 3. — Sections observées. Profils en travers et verticales de prélèvement.

[1] Cet article fait suite à celui paru sous le même titre dans le *Bulletin technique de la Suisse romande* n° 6, du 21 mars 1970, et signé D. Bonnard et J. Bruschin.

[2] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

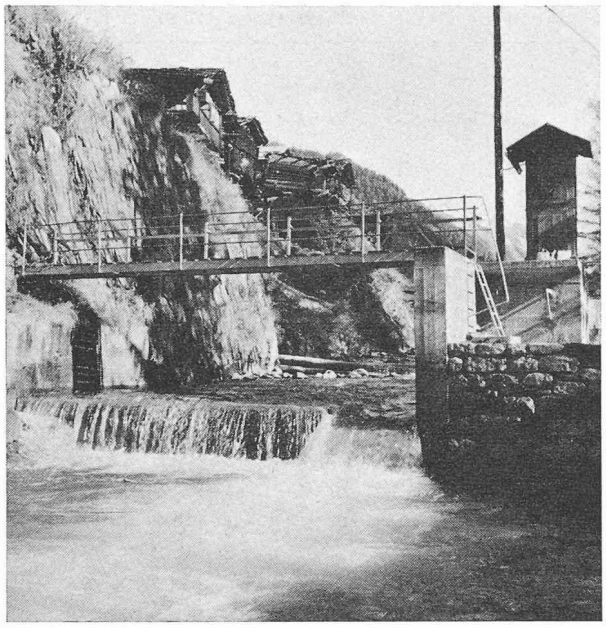

Fig. 4

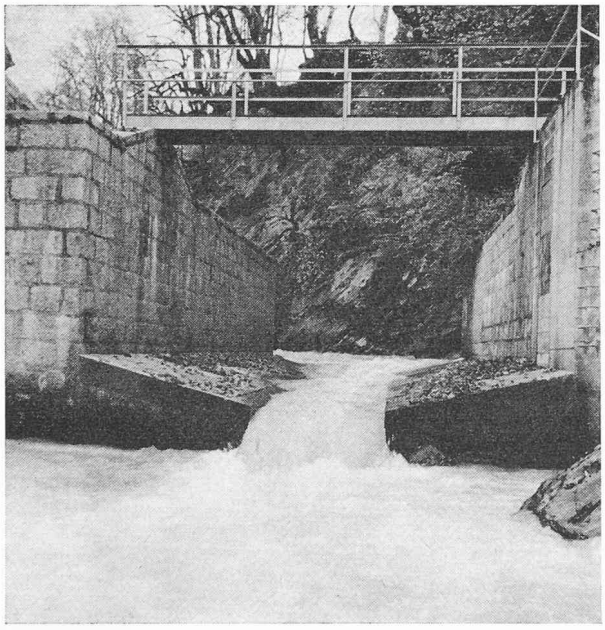

Fig. 5

Fig. 6

Fig. 4, 5 et 6. — Vues des trois stations de jaugeage (limnigraphiques). Dans l'ordre: Lonza, Borgne, Grande-Eau.

aussi les sections de jaugeage, équipées donc de manière traditionnelle : passerelle, perches et porte-perches, etc., utilisés pour les prélèvements en substituant simplement la sonde aux moulinets (voir fig. 4, 5 et 6).

La sonde AW-3 (fig. 7) permet de prélever à la vitesse de l'écoulement un échantillon d'eau d'un litre environ en une seule course surface-fond-surface, effectuée le long d'une verticale à vitesse de déplacement constante. La quantité de matériaux solides prélevée en même temps, rapportée au poids de l'échantillon, est la concentration moyenne instantanée en matériaux en suspension dans la verticale respective « C ». Si cette verticale est représentative de l'ensemble de la section, on peut calculer le débit solide correspondant par la relation $Q_s = CQ$, en poids de matière sèche par seconde. La détermination de C et éventuellement de la granulométrie des matériaux en suspension se font en laboratoire (OFEH et LHYDREP), au moyen d'un équipement standard : filtres à vide, fours, balances analytiques, tubes à soutirage par le fond, etc.

3. Représentativité des mesures de routine

Pour l'essentiel, il s'agit de répondre ici aux deux questions suivantes :

— Lorsque C est la concentration moyenne instantanée de la verticale V_1, le produit CQ représente-t-il correctement le débit solide Q_s de la rivière ?

— Les mesures de routine rendent-elles compte d'une manière satisfaisante des « écoulements solides » ? Ou, plus précisément : peut-on connaître et prévoir les valeurs extrêmes ? — peut-on déterminer avec une approximation suffisante les quantités transportées, par exemple en une année (le stock annuel) ?

Ces questions ont déjà été posées sous une forme générale dans notre publication antérieure et ne comportent pas, malheureusement, de réponse simple. Il serait peut-être utile de répéter ici que dans ce domaine il faudra se contenter, et pour longtemps encore, d'une connaissance permettant plutôt de situer les problèmes que de les poser quantitativement à 10 ou 20 % près. Il reste toutefois vrai, et nous le montrerons, que les techniques actuelles de mesure sont susceptibles d'une exploitation plus rationnelle conduisant à une nette amélioration de la qualité de l'information acquise par les mesures de routine.

Dans les trois cas qui nous occupent les choses se présentent ainsi :

3.1 *Répartition spatiale des concentrations*

En égalant à l'unité la concentration C_{V1}, mesurée le long de la verticale V_1, on trouve au même instant à :

Blatten (Lonza) :	$0{,}87 < C_{V2} < 1{,}00$
	$0{,}63 < C_{V3} < 1{,}30$
La Luette (Borgne) :	$0{,}67 < C_{V2} < 1{,}14$
	$0{,}68 < C_{V3} < 1{,}55$
Aigle (Grande-Eau) :	$0{,}68 < C_{V2} < 1{,}23$
	$0{,}80 < C_{V3} < 1{,}20$

Les verticales V_1 se trouvant dans l'axe du chenal, on serait tenté de croire que $C_{V1} > C_{V2}$ et C_{V3} ce qui ne semble pas être le cas, quoique les écarts vers le bas soient généralement plus forts que ceux vers le haut. L'approximation que l'on fait en écrivant $Q_s = C_{V1}Q$ dépend évidemment de la répartition des vitesses dans la section, mais elle sera très probablement inférieure à $\pm$ 20 % pour la Grande-Eau et à $\pm$ 30 % pour la Lonza et la Borgne lorsque l'écoulement occupe toute la largeur de la section.

3.2 *Variation des concentrations avec le temps : moyenne et extrêmes*

La connaissance complète d'un phénomène naturel évolutif est possible soit par observation continue, soit par des mesures isolées exécutées à des intervalles tels que l'évolution du phénomène entre deux mesures puisse être exactement décrite par des procédés d'extra- ou d'interpolation selon une loi connue (linéaire dans les cas les plus simples). Or, nous l'avons montré dans notre publication précédente, les mesures de routine, même exécutées chaque jour, ne peuvent donner qu'une description très incomplète du transport solide. Toutefois, une analyse détaillée des mesures devrait permettre d'en retirer des indications supplémentaires, dont la valeur dépendra cependant entièrement de la qualité et de la quantité de l'information comprise dans les mesures mêmes. A cet égard, deux voies nous ont paru prometteuses :

— celle qui consiste à assimiler le débit solide ($C_{V1}Q$) aux variables aléatoires de la théorie des probabilités ;

— celle qui revient à lier par une régression C ou Q_s à un ou plusieurs paramètres observés de manière continue.

Dans le premier cas, les mesures sont les valeurs observées de la variable aléatoire et constituent un « échantillon » d'une loi de probabilité établie par la nature. La valeur de l'échantillon sera d'autant plus grande qu'il contiendra, nous l'avons dit, plus d'informations, c'est-à-dire que le nombre de mesures est grand et que l'information apportée par chaque mesure est indépendante des autres. Or, comme nous nous intéressons aux valeurs moyennes (mensuelles, annuelles, etc.) intervenant dans le calcul des quantités transportées et aux valeurs extrêmes, c'est à ce point de vue que nous analyserons les mesures.

3.2.1 *Concentrations observées et concentrations moyennes*

Les campagnes de prélèvement exécutées par LHYDREP nous permettent de calculer avec une bonne approximation les moyennes journalières de C et de Q_s. Les mesures de routine étant exécutées pratiquement toujours soit autour de midi, soit vers 14 h, nous avons pu établir qu'il existe trois chances sur quatre pour que les concentrations ainsi mesurées soient inférieures à la concentration moyenne de la même journée (probabilité expérimentale sur 16 campagnes). Ce résultat, qui n'est pas vraiment étonnant, est dû à un déphasage systématique entre le moment du prélèvement et la « crue solide journalière », visible aux figures 7 à 9a de notre précédente publication. Toute moyenne calculée à partir des mesures de routine déjà exécutées sera donc presque certainement inférieure à la réalité.

3.2.2 *Concentrations maxima*

Des deux extrêmes possibles, seule la valeur supérieure nous intéresse et les considérations sous 3.2.1 ne peuvent nous laisser à cet égard aucune illusion : les chances de tomber sur les « pointes solides » sont infimes. Si l'on ajoute que la période d'observation est courte, il apparaît qu'une analyse fréquentielle des concentrations maxima mesurées ne fournira aucun renseignement valable.

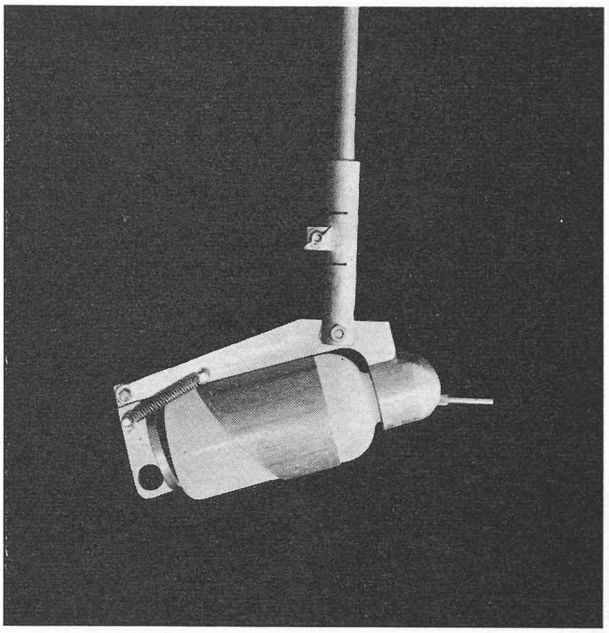

Fig. 7. — Sonde AW-3 pour prélèvements par intégration verticale.

* * *

La voie qui consiste à étudier le débit solide pour lui-même s'avère donc, dans ce cas, d'un assez mince rapport. La conclusion qui se dégage de notre analyse est que les mesures de routine rendent compte avec une approximation acceptable pour les trois rivières des débits solides instantanés, mais que les indications fournies sur les débits moyens et maxima sont affectées d'une erreur systématique (trop faibles) et par ailleurs nettement insuffisantes quantitativement.

4. Dépendance stochastique $Q_s - Q$

La conclusion du chapitre précédent nous conduit à la deuxième voie déjà citée, et qui, à condition que la dépendance $Q_s - Q$ soit prouvée, devrait nous permettre de pallier, dans une certaine mesure au moins, l'insuffisance constatée des observations. Il faut dire d'ailleurs que nous serions bien embarrassés de faire un autre choix, le seul paramètre observé de manière continue dans un réseau hydrographique étant précisément le débit (en fait c'est le niveau, lequel, comme la vitesse moyenne dans le profil de jaugeage qui peut en être déduite, sont propres à une seule section et donc sans intérêt particulier). Or, heureusement, l'expérience [2] et des considérations théoriques [3] montrent que ces deux paramètres sont effectivement liés par une relation ayant la forme :

$$Q_s = AQ^B \qquad (1)$$

On s'accorde généralement sur le fait que A est une constante et que B diminue avec le débit (les résultats connus permettent de supposer que $B < 3$ est que $B \rightarrow 1$ pour les très grands débits). Précisons encore qu'il s'agit des valeurs instantanées de Q_s et Q et que cette relation n'a nullement le caractère d'une loi physique : elle ne fait que définir une tendance.

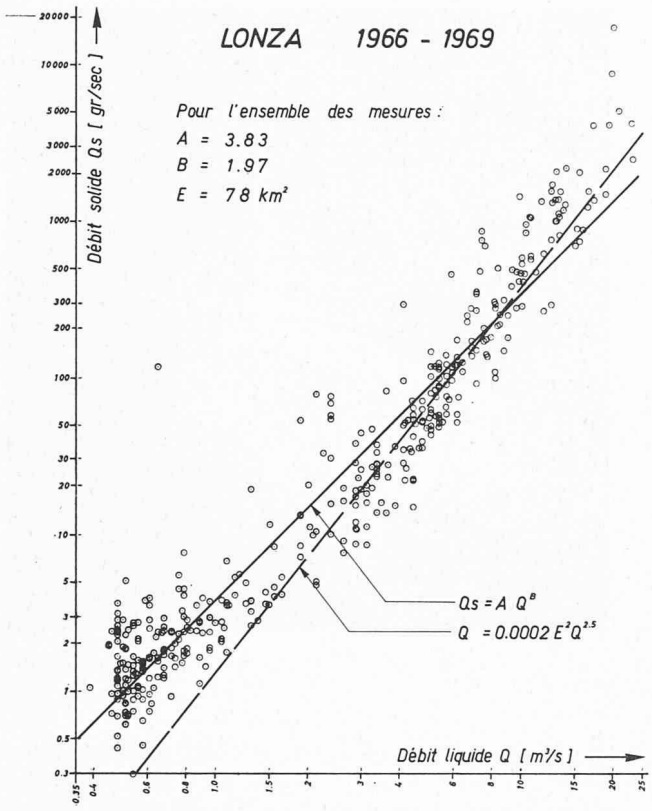

Fig. 8

L'étude des trois cas qui nous occupent montre que la dépendance stochastique $Q_s - Q$ est forte pour les trois cours d'eau, quoique apparemment à des degrés différents. En effet, le coefficient de corrélation « r » qui est un estimateur de cette dépendance ($0 < r < 1$, alors que $r > 0{,}7$ justifie des fortes présomptions en faveur de la dépendance) prend les valeurs suivantes :

TABLEAU N° 2

Rivière	Coefficient de corrélation $Q_s - Q$	
	Toutes les mesures	Mesures du 1.V au 31.X *
Lonza	0,96	0,93
Grande-Eau.	0,85	0,81
Borgne	0,79	0,78

* Nous avons défini un peu arbitrairement la période allant du 1.V au 31.X comme la « saison chaude ».

Ce résultat reflète très bien la présence de facteurs perturbateurs dont ceux signalés, et définit par ailleurs leur importance respective dans l'éventail des débits observés.

Fig. 8, 9 et 10. — Corrélations entre les débits liquide et solide instantanés. La relation $Q_s = 0{,}000\,2\varepsilon E^2 Q^{2,5}$ correspond à la saison chaude.

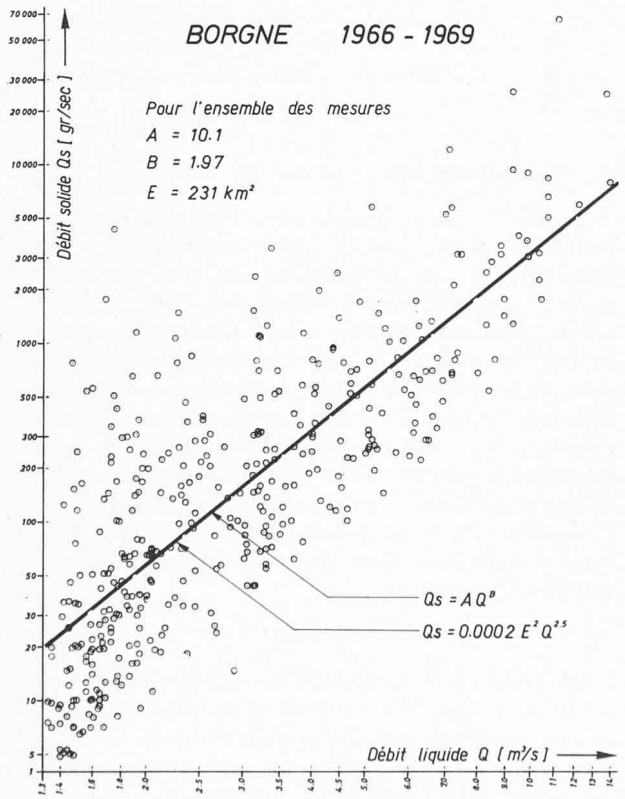

Fig. 9

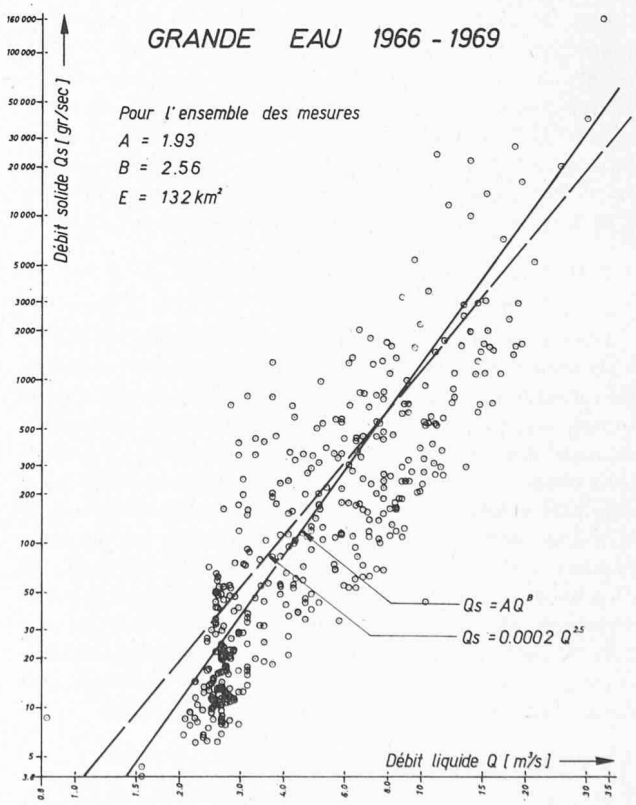

Fig. 10

On remarquera toutefois — fig. 8 à 10 et tableau n° 1 — que le rapport entre le plus grand débit observé et la superficie du bassin versant respectif est inversement proportionnel à l'importance de celui-ci. Cela montre que, malgré le même nombre de mesures, l'information à disposition est moins complète pour la Grande-Eau et encore moins pour la Borgne que ce qu'elle est pour la Lonza.

Il nous paraît ensuite plausible d'admettre dans les limites des observations que l'exposant B de (1) est une constante. Les figures 8, 9 et 10 ne semblent pas inspirer un choix plus heureux pour la Borgne et la Grande-Eau, alors que pour la Lonza il s'impose de lui-même. La dispersion des points expérimentaux (en échelles bilogarithmiques !) qui peut étonner tout autre qu'un habitué de ces problèmes, nous a incités à marquer ce fait dans la relation (1). On pose alors :

$$A = a\varepsilon^{\pm 1}$$

où a = coefficient constant ;

ε = multiplicateur définissant un intervalle de confiance correspondant à un écart type.

Cela veut dire que, pour un débit Q donné, on peut définir un intervalle dans lequel se trouvera, avec une probabilité de 67 %, Q_s mesuré (il y a deux chances sur trois pour que les limites de cet intervalle ne soient pas dépassées). Dans une certaine mesure, ε indique l'ordre de grandeur de l'erreur que l'on peut faire en prenant $A = a$ ($\varepsilon = 1$).

Voici les résultats * :

TABLEAU N° 3

Rivière	Toutes les mesures			Mesures du 1.V au 31.X		
	a	ε	B	a	ε	B
Lonza	3,83	1,97	1,97	1,14	1,81	2,61
Grande-Eau .	1,93	2,69	2,56	3,02	2,84	2,36
Borgne . . .	10,1	3,06	2,49	9,85	2,58	2,46

* Ajustement par la méthode des moindres carrées.

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

— $1{,}8 < \varepsilon < 3$ correspond à une erreur d'estimation de Q_s à partir de Q allant de 80 % à 200 %. Cela situe parfaitement le niveau actuel de la connaissance quantitative des transports solides. La présence de facteurs perturbateurs est encore plus manifeste ici que dans les valeurs des coefficients de corrélation ;

— on remarque que pour la saison chaude seulement, l'exposant « B » est voisin de 2,5 et le coefficient « a » proportionnel au carré de la superficie du bassin « E » :

$$\frac{a_{GE}}{a_L} \simeq \left(\frac{E_{GE}}{E_L}\right)^2 \text{ et } \frac{a_B}{a_L} \simeq \left(\frac{E_B}{E_L}\right)^2$$

où GE = Grande-Eau, L = Lonza et B = Borgne.

On serait alors tenté d'écrire pour les trois bassins :

$$Q_s = \varepsilon K E^2 Q^{2,5} \qquad (2)$$

où K serait analogue à un coefficient d'érosion.

Avec Q en m³/s et E en km² on obtient alors :

$$Q_s \simeq 0{,}000\,2\varepsilon E^2 Q^{2,5} \qquad (3)$$

où Q_s est obtenu en g/sec.

Divisant par Q on obtient la concentration C :

$$C \simeq 0{,}000\,2\varepsilon E^2 Q^{1,5} \qquad (4)$$

Si l'on tient compte de la dispersion des points expérimentaux et des faibles apports solides hivernaux, les formules (2) à (4) revêtent une certaine importance pratique pour les trois bassins étudiés et ont en plus le mérite de faire apparaître les principaux paramètres physiques et statistiques du phénomène. La comparaison avec les expressions donnant la capacité de transport d'une rivière [3] est intéressante :

Transport effectif		*Capacité de transport*	
$Q_s = AQ^{2,5}$	(5)	$Q_s = A'Q^2$	(7)
$C = AQ^{1,5}$	(6)	$C = A'Q$	(8)

avec $A = \varepsilon K E^2$ et $A' = f(K_{St}, J, w, B)$

où K_{St} = coefficient de Strickler du lit

J = pente du lit ;

w = vitesse de chute des grains en suspension dans l'écoulement ;

B = largeur du lit (assimilé à un lit rectangulaire).

On constate que les formules (5), (7) et (6), (8) ont la même structure et que les exposants sont plus forts à gauche qu'à droite. Ceci traduit, à notre avis, la tendance d'un cours d'eau naturel de rejoindre sa capacité de transport aussi longtemps que les disponibilités du bassin sont suffisantes. Manifestement, il doit y avoir une limite. En effet, si nous calculons un « coefficient de saturation » c_s :

$$c_s = \frac{A}{A'}\sqrt{Q} \qquad (9)$$

admettant que le rapport A/A' est une constante, ce qui n'est pas tout à fait exact :

$$c_s \sim \sqrt{Q}$$

or

$$c_s \leqq 1 \qquad (10)$$

d'où logiquement l'exposant de Q tend vers zéro lorsque Q augmente vers $(A'/A)^2$.

Un contrôle des écarts logarithmiques entre les valeurs expérimentales et « théoriques » (calculées par les régressions) de Q_s (fig. 14 à 16) montre que seule la Lonza est caractérisée par une répartition normale, pratiquement centrée, répondant à un test d'adéquation (χ^2) avec un niveau de signification élevé. C'est une confirmation supplémentaire que dans ce cas le débit est bien le seul paramètre significatif et que les autres paramètres, sans doute nombreux, n'ont que des influences relativement restreintes.

5. Stocks annuels

Les régressions $Q_s - Q$ une fois établies et acceptées avec la marge d'approximation qu'elles comportent, nous pouvons évaluer les quantités de matériaux transportés par les rivières. Deux aspects nous intéressent plus spécialement :

— l'importance du transport solide ;

— la répartition de ce transport en cours d'année.

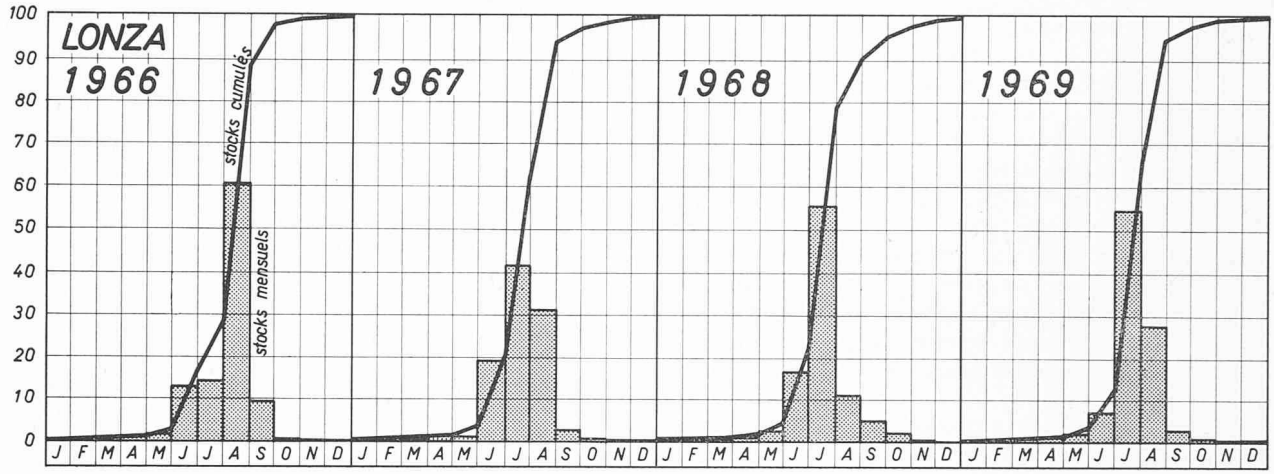

Fig. 11

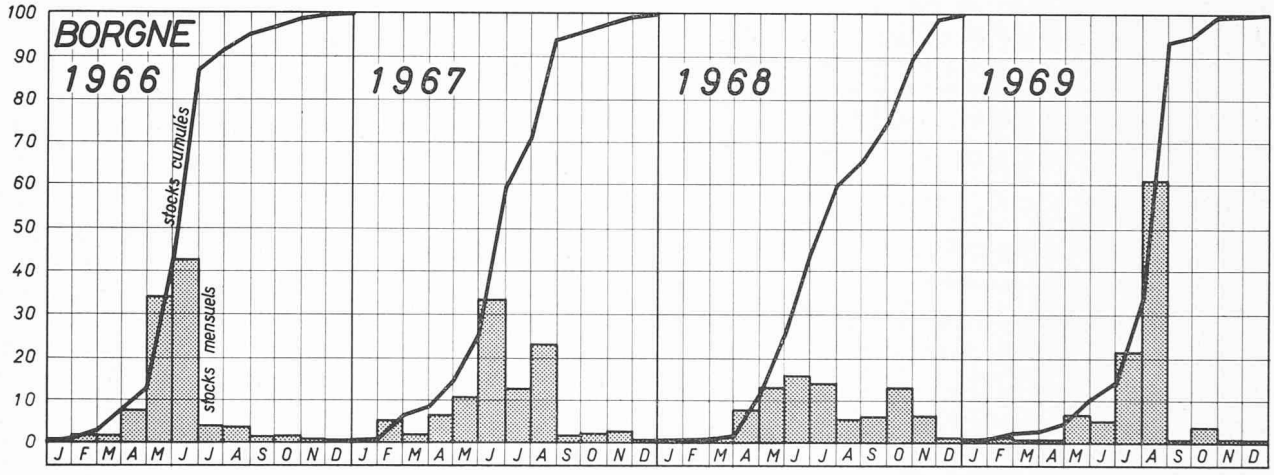

Fig. 12

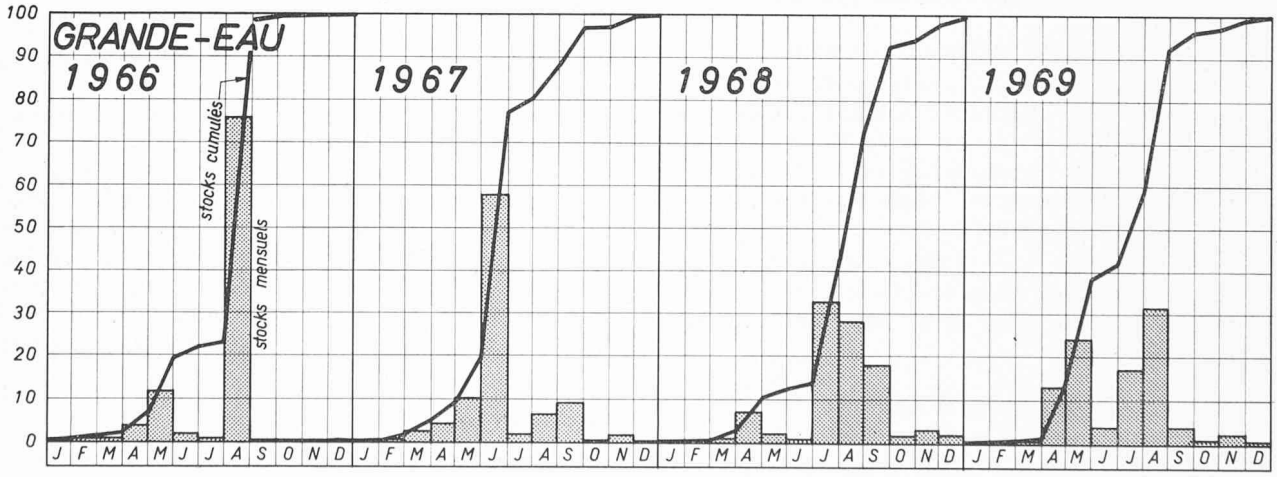

Fig. 13

Fig. 11, 12 et 13. — Répartition des stocks annuels dans les trois stations de mesure.

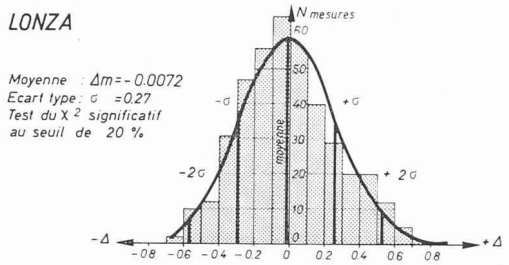

Fig. 14

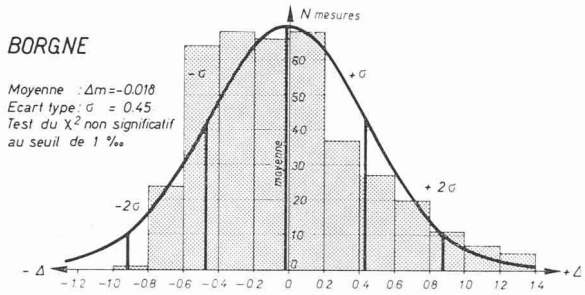

Fig. 15

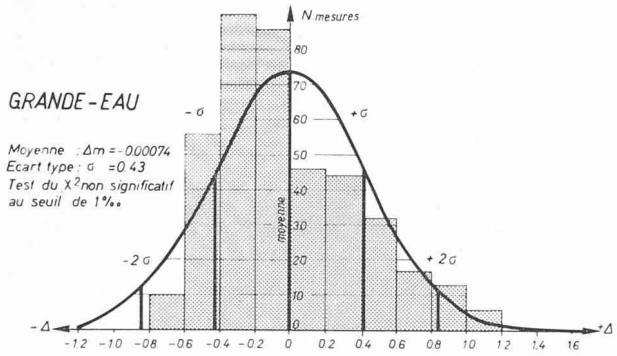

Fig. 16

Fig. 14, 15 et 16. — Répartition des écarts logarithmiques entre les valeurs déterminées à partir des régressions et les valeurs réellement mesurées de Q_s.

Les figures 11 à 13 répondent entièrement aux problèmes ainsi formulés. Elles montrent que dans les bassins de type alpin la quasi-totalité du stock annuel est transportée en l'espace de 2 à 4 mois, pendant la saison chaude, l'exposant de la relation (1) exagérant encore ce phénomène déjà bien connu pour le stock liquide. Cette dernière constatation reste bien entendu vraie, quel que soit le type de bassin : un « solidogramme » sera toujours dans les grandes lignes une reproduction distordue de l'hydrogramme correspondant.

6. Conclusions

L'étude des transports solides en suspension dans les rivières revient, pour le moment du moins, à déterminer d'une manière satisfaisante les paramètres $A \sim \varepsilon K$ et B de la relation

$$Q_s = AQ^B$$

Pour obtenir des résultats acceptables aux moindres frais et pour une période relativement courte d'observation, il faudrait :

— concentrer les mesures sur la période de l'année la plus significative pour les transports solides. Nous pensons qu'il est raisonnable de la fixer sur la base d'un rapport entre le « stock contrôlé »[1] et le stock annuel de 0,7 à 0,9 ;

— imposer un horaire de prélèvements mobile avec des déphasages de 1 à 3 heures entre deux jours de prélèvements successifs ;

— doubler les mesures « de routine » par des mesures « de contrôle » telles que déjà décrites ;

— observer dans toute la mesure du possible les événements hydrologiques exceptionnels ;

— faire le point tous les 2 à 5 ans en fonction du volume de l'information acquise.

Il nous paraît important de relever le fait qu'une description plus précise des matériaux transportés par les rivières, par exemple au moyen de courbes granulométriques, peut devenir une nécessité chaque fois qu'il s'agit de résoudre un problème de séparation des deux phases, solide et liquide. Un certain travail a déjà été fait en ce domaine ; ce n'est, à notre avis, qu'un début.

Enfin, il serait d'un grand intérêt de pouvoir élucider certaines hypothèses ($Q_s \sim E^2$, la nature de K, $B = 2{,}5$) par extension des observations à d'autres bassins éventuellement de types différents. Nous espérons que les années à venir nous fourniront cette occasion.

Bibliographie

[1] *Rapport sur les transports solides dans la Lonza, la Borgne et la Grande-Eau*, LHYDREP et OFEH, août 1970. Non publié.

[2] *Task Committee for the Sedimentation Manual : Sediment Sources and Sediment Yields*. JHD (Journal of the Hydraulics Division de l'ASCE), June 1970.

[3] J. Bruschin : *Discussion to* [2]. JHD, February 1971.

Adresse des auteurs :
Laboratoire d'hydraulique de l'EPFL,
67, rue de Genève, 1000 Lausanne.

[1] Quantité de matériaux transitant pendant la période choisie pour l'exécution des mesures.