

# Météorologie et Hydrologie

## Étude générale des variations de débit en fonction des facteurs qui les conditionnent

### QUATRIÈME PARTIE

#### Corrélations thermo-fluviales actuelles Le pouvoir fondant de l'atmosphère — Le débit glaciaire

PAR A. COUTAGNE

*English synopsis p. 5*

##### LE GLACIER

Combien d'hivers a-t-il fallu, pour que s'allonge  
Du faite au creux des Monts, immuable comme eux,  
Ton fantôme immobile?... Et pourtant tu te meus :  
L'apparence, souvent, n'est qu'un grossier mensonge!

Vainement le soleil à la base te ronge,  
Sans cesse tu renaîs, parce qu'au ciel brumeux,  
Père des glaciers blancs et des flois écumeux,  
Tu vas chercher la vie et que ta cime y plonge.

Et quand la Terre a soif, jaillissant de ta chair  
Par ses veines saignant, ton sang pur, ton sang clair,  
Devenu le torrent, la rivière, le fleuve,

Court au loin féconder la Plaine et la Cité,  
— Lorsqu'aux sources du Beau, du Bien, l'âme s'abreuve,  
Elle répand ainsi Joie et Félicité.

#### 1. Préambule.

Les précipitations, avant de se transformer en débits, sont, d'une part, plus ou moins réduites par la température, plus exactement par *le pouvoir évaporant* de l'atmosphère, et, d'autre part, plus ou moins retardées dans leur écoulement, soit par la capacité de rétention géologique et physique du sol, soit par les capacités de rétention nivale et glaciaire, c'est-à-dire par *le pouvoir solidifiant* de l'atmosphère, dont la contrepartie constitue le *pouvoir fondant*.

La température joue donc, en Hydrologie, un rôle considérable. Ce facteur statistique usuel, d'ordre exclusivement climatique — la température de l'air observée sous abri — ne conditionne évidemment pas exclusivement (il y a le vent...) ni directement (il y a l'insolation...) le pouvoir évaporant et le pouvoir fondant de l'atmosphère. Mais à défaut des autres facteurs notamment actinométriques, agissant conjointement et directement — qui ne sont pas d'une pratique commune, nous devons nous contenter, faute de mieux, de ce facteur thermique conventionnel, considéré en somme comme *facteur-témoin* des

facteurs effectifs, avec lesquels il est d'ailleurs en corrélation ou covariation plus ou moins grande.

On notera incidemment que le rôle que joue, dans les écoulements, la température, résulte de ce fait que c'est la chaleur qui, dans l'atmosphère et à la surface de la terre, détermine *les passages de l'eau d'un état à l'autre* (états gazeux, liquide et solide).

L'étude du rôle que joue, en Hydrologie fluviale, la température, comporte trois problèmes essentiellement différents :

- 1° *Sur le plan géographique mondial* : comment la température annuelle moyenne d'un lieu, d'une région, y conditionne-t-elle l'évaporation, le déficit d'écoulement, et par suite, de concert avec les précipitations, l'écoulement?
- 2° *Sur le plan saisonnier moyen* : un bassin hydrographique particulier étant considéré, comment interviennent les douze températures mensuelles moyennes dans le conditionnement des douze débits moyens correspondants?

3° *Sur le plan actuel plus ou moins instantané* : on étudie comment varie, en fonction de la température actuelle correspondante, le débit actuel des périodes successives, la période unitaire étant l'année, le mois, le jour...

Le premier de ces trois problèmes fait partie de l'étude de ce que nous appelons « *les Corrélations et covariations géographiques* » ; le second de l'étude de ce que nous appelons « *les Corrélations et covariations de l'année moyenne hydrologique* », étude se rattachant à celle des Périodicités, la périodicité en cause ici étant la périodicité annuelle. Ces deux problèmes ne sont pas considérés, dans le présent article qui est consacré seulement à l'étude des « *Corrélations ou covariations thermo-fluviales* » dans le cas de l'écoulement glaciaire. De fait, il n'y a que dans ce cas où la température actuelle conditionne presque exclusivement le débit actuel d'un cours d'eau.

Toutefois, pour ce cas particulier, nous étudierons également les variations du débit sur le plan saisonnier moyen.

En ce qui concerne les températures dont on peut faire état, en l'occurrence, elles sont pres-

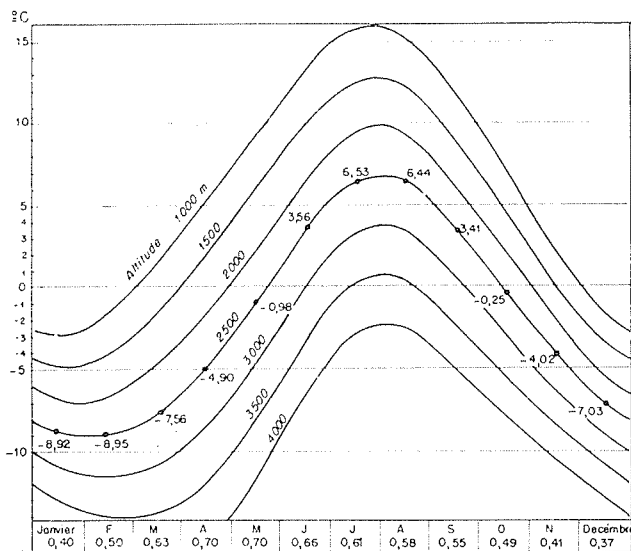


FIG. 1

que toujours interpolées à partir de températures observées dans des localités plus basses, plus ou moins distantes, les observations directes aux altitudes intéressées par la fusion glaciaire n'existant pas le plus souvent. A défaut d'observations plus localisées, on pourra utiliser, par exemple, les données du graphique que nous donnons ici (fig. 1). Ce graphique a été établi d'après les températures mensuelles vraies, calculées par M. BÉNÉVENT, de 10 stations des Alpes françaises, de la Savoie et du Dauphiné [Grenoble, Chambéry,

Albertville, Genève, Annecy, Saint-Jean-de-Maurienne, Bourg-d'Oisans, La Mure, Villard-de-Lans et Chamonix]. Les gradients utilisés sont ceux d'Angot, indiqués au bas du graphique.

On doit d'ailleurs se montrer très prudent et très circonspect dans l'utilisation de données thermiques quelconques plus locales, en provenance de stations situées souvent dans des conditions géographiques particulières et exceptionnelles, par exemple au fond de vallées encaissées. Ces données sont parfois peu représentatives de l'état thermique de l'ensemble d'un bassin, et moins exactes que celles fournies par des observatoires officiels, munis d'appareils contrôlés et servis par un personnel expérimenté. Les observations thermiques constituent des opérations plus délicates qu'on se l'imagine généralement, demandant beaucoup de précautions et de soins, et surtout un choix judicieux de l'emplacement des appareils.

Dans le cas d'observations journalières et surtout horaires, on ne pourra naturellement faire état que de données thermiques très locales, provenant d'observations faites à proximité immédiate de l'endroit où l'ablation glaciaire est mesurée.

On doit enfin noter que la température journalière moyenne des statistiques officielles est établie différemment, suivant les pays, les observatoires et les auteurs (moyenne du maximum et du minimum journaliers, moyenne de 3 températures journalières, moyenne de 24 lectures journalières, etc). Il en résulte que les formules de corrélation que l'on rencontre dans les publications scientifiques ne sont pas absolument comparables entre elles. On ne saurait trop recommander aux expérimentateurs de bien préciser, dans chaque cas, les conditions exactes dans lesquelles ont été observées ou calculées les données thermiques — et autres données — dont ils font état.

## 2. Le cycle annuel thermo-fluvial d'un bassin glaciaire.

L'année moyenne thermo-fluviale d'un bassin quelconque étant définie, numériquement, par les 12 températures mensuelles  $T$ , et les 12 débits correspondants (absolus  $Q$  ou relatifs  $\frac{Q}{Q_0}$ ), nous la caractérisons, graphiquement, par le diagramme, que nous appelons « *Cycle annuel thermo-fluvial* », établi comme il suit :

Chaque mois étant représenté par un point d'abscisse  $T$  et d'ordonnée  $Q$  ou  $\frac{Q}{Q_0}$ , nous joignons les 12 points ainsi figurés, en suivant l'ordre chronologique saisonnier, par une série de segments de droites ou par une courbe continue.

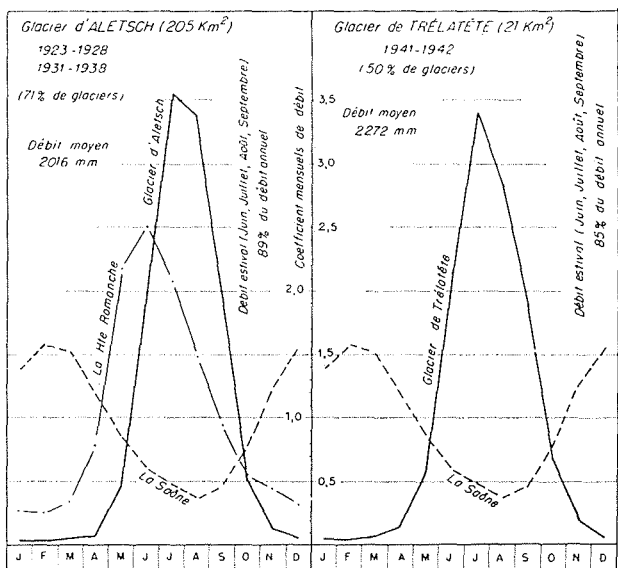


FIG. 2

Nous avons déjà, à maintes reprises, exposé et utilisé cette méthode, tout à fait générale, qui permet d'illustrer la covariation saisonnière moyenne de deux facteurs météorologiques ou hydrologiques quelconques (1).

Dans le cas considéré, on obtient un diagramme tout à fait représentatif du régime saisonnier d'un cours d'eau, et l'on peut utilement baser une classification rationnelle des différents régimes d'écoulement sur la considération des différents types de diagramme ainsi obtenus. Nous reviendrons ultérieurement sur ce point. Notons seulement ici que, dans le cas d'un bassin à forte glaciation (50 % et plus de glaciers), le cycle

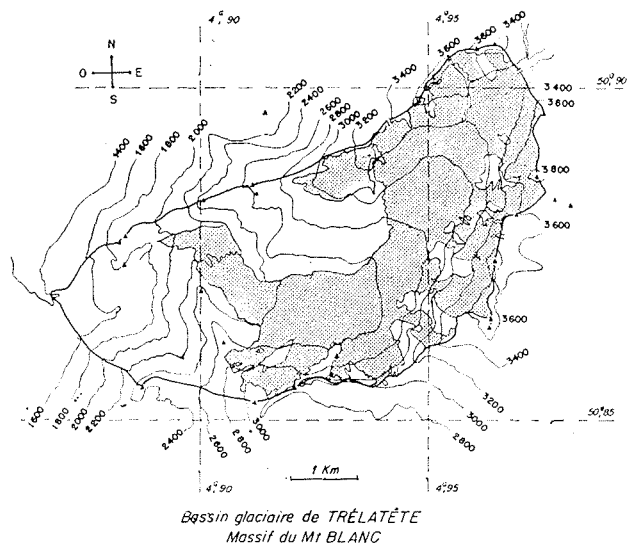


FIG. 3

(1) Cycle annuel d'évolution des différents facteurs du climat. — *La Météorologie*, mais 1935.

thermo-fluvial est caractérisé par une très faible hystérésis, c'est-à-dire que les deux branches constituant généralement le diagramme, l'une correspondant aux températures croissantes, et l'autre aux températures décroissantes de l'année, sont très rapprochées l'une de l'autre, et même souvent à peu près confondues. L'abaque se réduit pratiquement à une courbe  $Q = f(T)$ , et cela d'autant plus que le taux de glaciation est plus élevé. Autrement dit, quelle que soit la période de l'année, il y a corrélation — ou covariation — entre le débit moyen et la température.

La figure 4 illustre ces faits. Elle donne les cycles thermo-fluviaux :

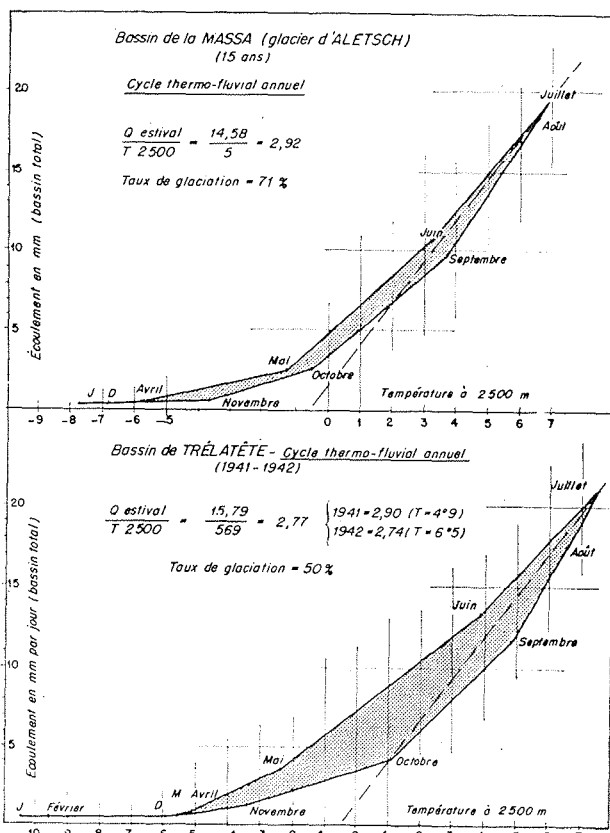


FIG. 4

Du bassin de la Massa (205 km<sup>2</sup> — dont 71 % de glaciers — Aletsch).

Du bassin de Trélatête (21 km<sup>2</sup> dont 50 % de glaciers).

Les températures sont celles du centre de gravité de la zone de dissipation estivale — 2.500 mètres en moyenne pour les Alpes françaises et suisses — calculées d'après les températures observées à Lyon-Fourvière (la Massa) ou à Saint-Genis-Laval (Trélatête). Les débits (15 années pour la Massa et 2 années 1941-1942 pour Tré-

latête) sont exprimés en mm d'eau par jour (bassin total).

L'hystérésis est plus forte pour Trélatête que pour la Massa, le taux de glaciation étant plus faible pour le premier bassin que pour le deuxième bassin.

Si on limite le diagramme au débit estival, c'est-à-dire aux débits des quatre mois : juin-juillet-août-septembre, représentant 85 à 90 % du débit annuel (89 % pour la Massa, 85 % pour Trélatête), on constate qu'il y a, à peu de chose près, proportionnalité entre le débit et la température.

La Massa . . . . .  $Q = 2,92 T$   
(plus exactement  $Q = 2,60 (T + 0,59)$ )

Trélatête . . . . .  $Q = 2,77 T$

Et de même :

Le Rhône à Gletsch . .  $Q = 3,28 T$

Le Fiescherbach . . . .  $Q = 3,05 T$

L'Arve à Chamonix . .  $Q = 2,84 T$

Ensemble des glaciers  
suisses (d'après LU-  
GEON . . . Moyenne :  $Q = 3,25 T$

Les températures sont toutes rapportées, indistinctement, à l'altitude de 2.500 m, dans ces quatre derniers exemples, et sont celles de la figure 1.

Notons que pour la Massa, si l'on fait état de ces températures, on obtient un diagramme d'écoulement parfaitement curviligne.

On a, en particulier, pour les 4 mois d'été :

Juin . . . .  $T = 3^{\circ}56 \quad Q = 10,54 \text{ mm} \quad \frac{Q}{T} = 2,96$

Juillet . . .  $T = 6^{\circ}53 \quad Q = 19,38 \text{ mm} \quad \frac{Q}{T} = 2,97$

Août . . . .  $T = 6^{\circ}44 \quad Q = 18,49 \text{ mm} \quad \frac{Q}{T} = 2,87$

Septembre  $T = 3^{\circ}41 \quad Q = 10,32 \text{ mm} \quad \frac{Q}{T} = 3,02$

Pour l'ensemble du diagramme (12 mois), le coefficient de corrélation entre  $Q$  et  $T$  est  $R = 0,92$  et la droite moyenne de corrélation.

$$\frac{Q}{Q_0} - 1 = 0,21 (T - T_0).$$

La corrélation, effectivement, n'est pas linéaire. Pour les 6 mois mai-octobre, le coefficient de corrélation entre  $\log \frac{Q}{Q_0}$  et  $T$  est  $R = 0,97$ , et la formule de corrélation, parabolique :

$$\frac{Q}{Q_0} = 1,46 \left( \frac{T + 10}{12,78} \right)^{3,44}$$

Nous donnons également les diagrammes d'écoulement saisonnier des bassins de la Massa et de Trélatête (fig. 2), particulièrement étudiés dans le présent article, ainsi que la carte hypsométrique du deuxième (fig. 3).

### 3. Le débit estival et la température.

Nous étudierons successivement, du point de vue des corrélations thermo-fluviales actuelles, le débit estival total (juin + juillet + août + septembre), le débit mensuel individuel (estival), le débit journalier (estival) et le débit horaire (estival).

Nous n'avons pas considéré le débit annuel total, ce débit n'étant pas en grande corrélation avec la température annuelle correspondante, cette dernière étant trop influencée par les températures hivernales, qui peuvent être

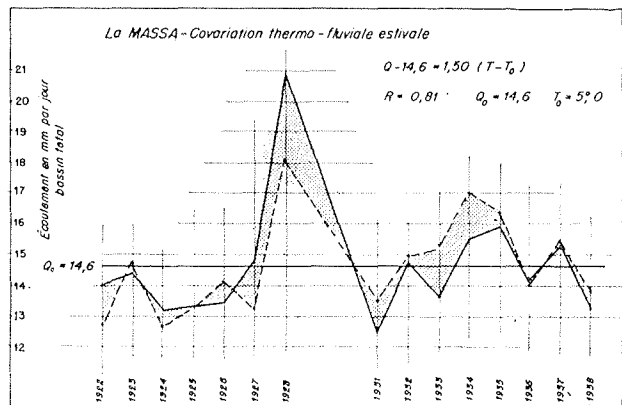


FIG. 5

plus ou moins négatives sans que pour cela le débit hivernal correspondant varie beaucoup.

En ce qui concerne le débit estival total, nous donnons seulement (fig. 5) les deux courbes comparatives de l'écoulement estival (1922-1928 et 1931-1938 = 15 ans) de la Massa, déduites l'une de l'observation effective des débits, et l'autre de la formule de corrélation :

$$Q - Q_0 = 1,5 (T - T_0)$$

$$Q_0 = 14,6 \text{ mm} \quad T_0 = 5^{\circ}$$

La corrélation n'est d'ailleurs pas très forte ( $R = 0,81$ ), ce qui n'est pas surprenant, étant donné la faible variabilité du débit estival (écart probable 1,35 mm, soit moins de 10 %).

### 4. Le débit mensuel estival et la température.

Nous avons étudié, de ce point de vue, le bassin du glacier d'Aletsch (la Massa) et le bassin du glacier de Trélatête.

GLACIER D'ALETSCHE (tableau A, fig. 6).

L'étude porte sur 15 années et les 4 mois d'été, ce qui fait 60 points d'observation.

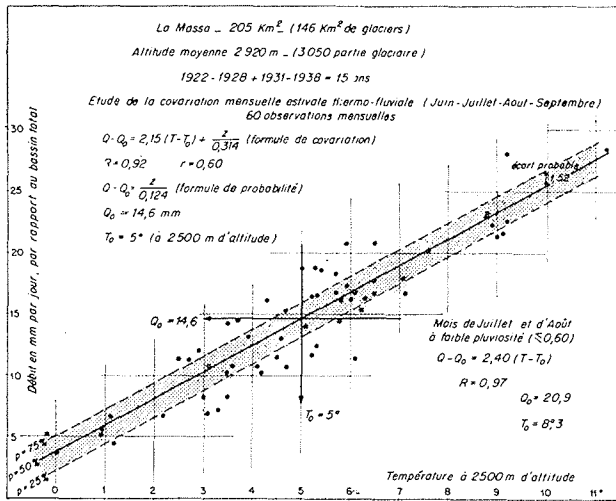


FIG. 6

TABLEAU A

ANNÉES	JUN				JUILLET				AOÛT				SEPTEMBRE			
	Q	T	h	Q/T	Q	T	h	Q/T	Q	T	h	Q/T	Q	T	h	Q/T
1922	14,3	3,5	2,45	4,08	16,2	4,3	3,23	3,77	20,7	5,9	3,39	3,51	4,5	1,2	3,17	3,75
1923	5,3	-0,2	0,81	-	22,2	8,9	0,22	2,50	23,0	8,8	1,00	2,61	6,9	3,1	2,21	2,23
1924	12,2	2,9	0,76	4,20	20,9	6,5	4,82	3,22	11,4	2,7	2,61	4,22	8,3	3,0	3,69	2,77
1925	13,2	3,9	1,37	3,38	16,3	5,8	2,66	2,81	16,8	5,7	2,38	2,95	6,8	1,1	2,96	6,18
1926	5,3	0,9	2,63	5,89	14,5	5,8	1,39	2,50	16,8	6,5	1,25	2,58	17,3	5,9	1,12	2,93
1927	11,5	2,5	2,89	4,60	18,8	5,3	4,28	3,55	18,7	5,4	5,08	3,46	10,3	3,5	3,51	2,94
1928	11,6	4,5	1,94	2,58	28,6	11,2	0,72	2,55	28,1	9,2	2,08	3,05	15,4	4,7	1,20	3,27
1931	15,4	6,2	1,40	2,48	16,7	6,1	3,77	2,74	14,0	5,1	3,78	2,74	3,9	0	2,80	-
1932	6,8	2,2	1,80	3,09	14,1	4,6	3,43	3,06	21,4	9,1	0,61	2,35	16,4	5,2	4,12	3,15
1933	5,6	0,9	3,45	6,22	16,7	7,1	1,98	2,35	21,2	9,0	1,09	2,35	10,7	4,7	6,31	2,28
1934	11,7	5,2	1,88	2,25	22,5	9,2	1,11	2,46	16,2	6,0	2,89	2,70	11,4	6,1	0,82	1,87
1935	12,4	5,3	1,64	2,34	23,4	8,8	0,56	2,66	17,6	6,5	4,39	2,71	10,3	4,2	4,06	2,45
1936	10,8	3,1	2,96	3,48	18,8	5,0	3,06	3,16	16,3	6,3	0,81	2,59	10,9	4,1	2,71	2,66
1937	14,6	3,7	1,84	3,94	20,2	7,6	0,72	2,66	18,0	7,1	2,30	2,53	8,2	3,5	1,94	2,34
1938	10,9	3,6	4,71	3,03	16,5	5,3	3,91	3,11	18,4	5,7	2,46	3,23	7,1	3,3	4,19	2,15
	161,6	48,2	32,5		286,4	101,5	35,86		278,6	99,0	36,12		148,4	53,6	44,81	
	10,77	3,21	2,17	3,35	19,09	6,77	2,39	2,82	18,57	6,60	2,41	2,81	9,89	3,57	2,98	2,77
	$Q_0 = 14,6$ mm par jour				$\sum (Q - Q_0)^2 = 1919,52$				$Q - Q_0 = 2,15 (T - T_0)$				$Q = 2,15 T_{2200}$			
	$T_0 = 5^\circ 0$				$\sum (T - T_0)^2 = 351,25$				$R = 0,92$				$r = 0,60$			
	$h_0 = 2,49$ mm par jour (à LYON)				$\sum (Q - Q_0) (T - T_0) = 755,19$											

Les températures sont déduites de celles observées à Lyon-Fourvière (gradients d'Angot) et rapportées à l'altitude de 2.500 mètres, qui correspond, semble-t-il, au centre de gravité de la zone de dissipation glaciaire pendant l'été, en admettant que la fusion glaciaire au-delà de 3.000 mètres ne contribue pas à l'écoulement, mais seulement à la transformation de la neige en glace.

Les précipitations indiquées sont également celles observées à Lyon. Elles ne figurent donc qu'à titre tout à fait indicatif de la plus ou moins grande pluviosité du mois considéré.

Les débits, calculés en mm d'eau, pour tout le bassin (205 km<sup>2</sup>), résultent des publications officielles suisses.

Les calculs conduisent aux résultats suivants :

$$R(Q, T) = 0,92 \quad r = 0,62$$

$$Q - Q_0 = 2,15 (T - T_0) \quad T_0 = 5^\circ \quad Q_0 = 14,6 \text{ mm}$$

La corrélation est donc tout à fait satisfai-

sante. Elle est, évidemment, plus ou moins faussée par les précipitations et l'insolation.

Effectivement, si l'on tient compte seulement des 11 mois juillet et août des 15 années, pour lesquels la pluviosité a été faible, du moins à Lyon ( $\frac{H}{H_0} < 0,60$ ), les résultats partiels deviennent :

$$R(Q, T) = 0,97$$

$$Q - Q_0 = 2,40 (T - T_0) \quad \text{avec} \quad Q_0 = 20,9$$

$$\text{et} \quad T_0 = 8^\circ 3$$

et plus simplement :

$$Q = 2,52 T \quad (T = \text{température à } 2.500 \text{ m}).$$

Les 11 valeurs du rapport  $\frac{Q}{T}$  ont été :

2,50 - 2,50 - 2,55 - 2,46 - 2,66 - 2,66 - 2,61 - 2,58 - 2,35 - 2,35 - 2,59.

La corrélation est donc très forte, entre la température et le débit, en juillet et août, quand la pluviosité du mois est au plus égale à 60 % de la moyenne.

GLACIER DE TRÉLATÈTE (fig. 7).

Un calcul analogue, mais portant seulement sur les deux années 1941 et 1942 (8 mois), assez

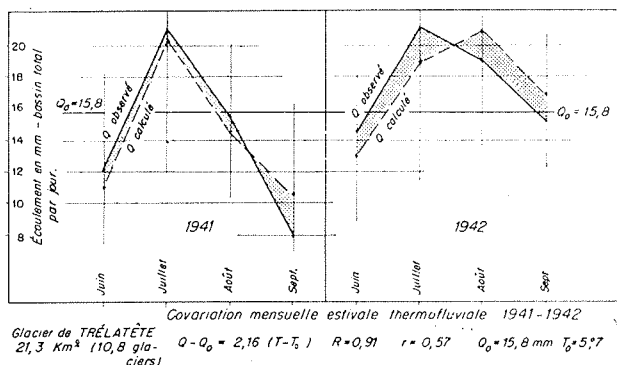


FIG. 7

dissemblables d'ailleurs, l'été 1941 ayant été particulièrement humide, et l'été 1942 particulièrement sec, conduit à des résultats à peu près identiques :

$$R(Q, T) = 0,91 \quad r = 0,57$$

$$Q - Q_0 = 2,16 (T - T_0) \quad \text{avec} \quad Q_0 = 15,8$$

$$\text{et} \quad T_0 = 5^\circ 7.$$

Les températures sont également rapportées à l'altitude 2.500 m, mais elles sont déduites des observations personnelles de l'auteur à Argentières (altitude 1.275 mètres), station voisine du bassin.

L'identité des formules de corrélation  $Q - Q_0 = \lambda (T - T_0)$  [ $\lambda = 2,15$  et  $\lambda = 2,16$ ] peut surprendre, les deux bassins ayant des caractéristiques glaciologiques différentes, le bassin d'Aletsch comportant 71 % de glaciers, et celui de Trélatète 50 % environ. Indépendamment des conditions différentes dans lesquelles ont été faites les observations fluviales<sup>(2)</sup> et les déterminations thermiques, on peut considérer que dans les deux cas, les zones de dissipation glaciaire sont à peu près égales, soit pour le premier bassin  $0,70 \times 0,50 = 0,35$  (partie glaciaire 70 % — zone de dissipation, limitée à l'altitude 3.000 m., 50 %) et pour le second  $0,50 \times 0,70 = 0,35$  également (partie glaciaire 50 % — zone de dissipation plus grande en proportion étant donné l'altitude moyenne du glacier plus basse, 70 %).

Rapportée à la surface intéressée par la fusion effective, c'est-à-dire à l'écoulement, le coefficient  $\lambda \left( \frac{dQ}{dt} \right)$  serait égal à  $\frac{2,15}{0,35} = 6$  environ. Le pouvoir fondant apparent du degré thermométrique serait donc d'environ 6 mm par jour, en moyenne, dans l'un et l'autre cas. Certes, on doit se garder de déduire, d'une formule de corrélation, une loi physique quelconque — la statistique ne démontre rien — mais cette donnée numérique est de l'ordre de celles que l'on peut déduire d'observations directes, locales, concernant l'ablation, comme nous en signalerons plus loin.

### 5. Le débit journalier estival et la température.

Il ne s'agit pas ici, à proprement parler, du débit strictement journalier qui, par suite du retardement variable que subit l'écoulement des eaux de fusion, est plus ou moins en corrélation avec la température journalière correspondante, mais du débit d'une période de plusieurs jours consécutifs, pour laquelle on constate une certaine stabilisation — en l'absence de toutes précipitations — et du débit et de la température.

A ce genre d'études se rapportent les deux séries d'observations que nous relatons maintenant.

#### L'ÉCOULEMENT GLACIAIRE DANS LE BASSIN DE LA DOIRÉ BALTÉE (tableau B, fig. 8).

Les données dont nous avons fait état dans ce tableau et cette figure sont extraites d'un mémoire du D<sup>r</sup> Ing. Alfieri (Association Int. d'Hydrologie scientifique, Bulletin n° 21, 1934).

Le tableau, reproduction du tableau original du mémoire, donne, pour la Doiré Baltée, à Ponte

(2) Les débits du bassin de Trélatète ont été déduits des graphiques qui nous ont été communiqués par la Société d'Ugine, en faisant la moyenne entre les débits extrêmes de chaque jour.

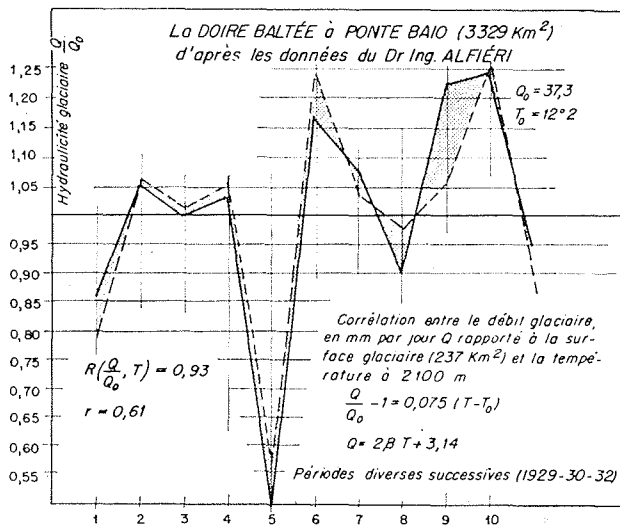


FIG. 8

di Mombardone (372 km<sup>2</sup>, dont 20 % de glaciers), le Lys à Gressoney-Saint-Jean (91 km<sup>2</sup>, dont 19 % de glacier), et la Doire-Baltée, à Ponte Baio (3.329 km<sup>2</sup>, dont 7 % de glaciers) et pour une série de périodes constituées par des jours consécutifs pendant lesquels le débit n'a pas été influencé par des pluies, le débit en litres par km<sup>2</sup> de la superficie glaciaire, la température rapportée à l'altitude 2.100 mètres, et le rapport  $\frac{Q}{T}$  correspondant, qui est, en moyenne, égal à 36 pour les glaciers dont l'altitude moyenne est de 3.000 mètres, et à 29 pour les glaciers dont l'altitude moyenne est de 3.500 mètres. La discrimination entre les débits glaciaires et les débits non glaciaires résulte de considérations particulières de l'auteur du mémoire, dans le détail desquelles nous n'entrerons pas.

La corrélation entre la température et le dé-

TABLEAU B

PÉRIODES	DOIRE BALTÉE à PONTE DI MOMBARDONE			LYS à GRESSONEY-ST JEAN			DOIRE BALTÉE à PONTE BAI0		
	Q glaciaire L Km <sup>2</sup>	T 2100 m	$\frac{Q}{T}$	Q glaciaire L Km <sup>2</sup>	T 2100 m	$\frac{Q}{T}$	Q glaciaire L Km <sup>2</sup>	T 2100 m	$\frac{Q}{T}$
	372 Km <sup>2</sup> Alt moy 2419 m 76 Km <sup>2</sup> de glaciers (20%) Alt moy. 3000 m			90,6 Alt moy. 2615 m 17,45 Km <sup>2</sup> de glaciers (19%) Alt. moy. 3550 m			3329 Km <sup>2</sup> Alt. moy 2080 m 237 Km <sup>2</sup> de glaciers (7%) Alt. moy 3080 m		
22 - 26/8 29	328	9,0	36	290	10,9	27	378	9,6	39
27 - 31/8 -	418	13,1	32	405	13,1	31	455	13,1	35
1 - 5/9 29	384	12,5	31	302	12,6	25	435	12,5	35
6 - 10/9 -	418	12,9	32	375	13,3	28	447	13,0	34
27 - 30/9 -	209	6,0	35	190	7,6	25	215	6,5	33
25 - 29/8 30	501	15,4	33	407	15,6	26	509	15,4	33
30/8 - 3/9 -	407	12,6	37	396	13,2	30	466	12,8	36
4 - 7/9 -	457	12,0	38	308	12,2	25	386	12,0	32
8 - 13/8 32	537	13,0	41	491	13,0	38	530	13,0	41
16 - 19/8 -	660	15,7	42	509	16,0	32	534	15,8	31
13 - 19/9 -	452	10,5	43	381	10,0	36	399	10,5	38
	4771	1327		4054	1375		4754	1342	
L Km <sup>2</sup>	434	12,1	36	369	12,5	29	432	12,2	35
mm - jour	37,5		3,10	31,9		2,55	37,3		3,06
R (Q, T)	R = 0,88			R = 0,77			R = 0,93		

bil glaciaire est assez satisfaisante. Pour la Doire Baltée à Ponte Baio, on a notamment (fig. 8) :

$$\frac{Q}{Q_0} - 1 = 0,075 (T - T_0) \text{ avec } Q_0 = 37,3 \text{ mm}$$

$$\text{et } T_0 = 12^\circ 2$$

$$R(Q, T) = 0,93 \text{ et } r = 0,61.$$

L'ÉCOULEMENT GLACIAIRE DE QUELQUES GLACIERS SUISSES EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE (tableau C, fig. 9).

Une étude analogue, concernant 8 glaciers suisses, a été présentée par le D<sup>r</sup> H. GUTERSON au Congrès d'Édimbourg, septembre 1936, de l'Association internationale d'Hydrologie scientifique (3).

Le tableau C est extrait de ce mémoire, les débits de fusion en mm de glace, en fonction de la température calculée à 2.900 mètres, ont été

(3) Ablation und Abfluss untersuchungen an gletschern der Schweizer Alpen.

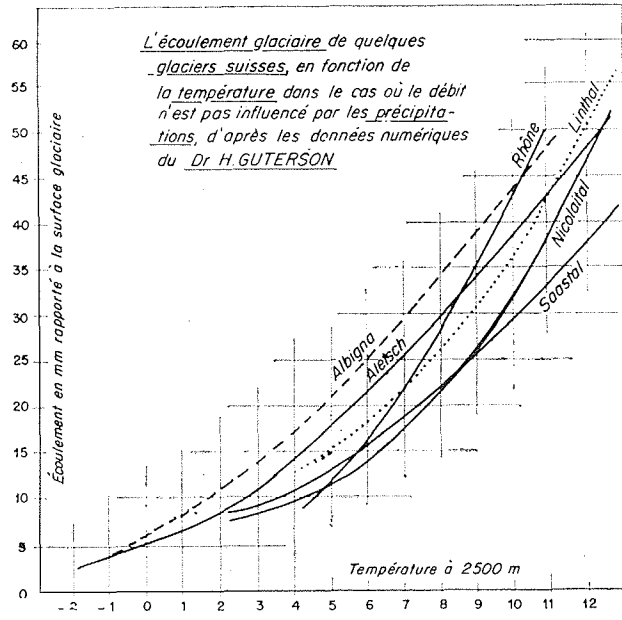


FIG. 9

TABLEAU C

Cirques glaciaires	1	2	3	4	5	6	7	8
	LINTHAL	GÖSCHENERTAL	Glacier du RHONE	Glacier d' ALETSCHE	SAASTAL	NIKOLAITAL	ALBIGNA	Val BAVONA
Station de jeaugeage	TIERFEHD	ABFRUTT	GLETSCH	MASSABÖDEN	ZERMEIGGERN	RANDA	Alpe ALBIGNA	BIGNASCO
Station météorologique	AUËN	GÖSCHENEN	GUTTANNEN	RECKINGEN	SAAS FEE	ZERMATT	VICOSOPRANO	AIROLO
Superficie Km <sup>2</sup>	75,7	89,6	38,9	205,0	65,3	328,2	20,5	121,7
Superficie glaciaire	22,8	28,9	24,2	146,1	29,1	168,0	11,1	8,5
Taux de glaciation	30,1%	32,3%	62,2%	71,2%	44,6%	53,0%	54,3%	7,0%
Hauteur moy du glacier	2790	2690	2900	3050	3110	3190	2650	2760
Exposition	E	E	S	S E	N	W N E	N	E
Débit des sources en m <sup>3</sup> /sec	0,9	1,2	0,3	0,9	0,4	1,9	0,2	2,0
Gradient thermique	0,515	0,515	0,591	0,591	0,591	0,591	0,625	0,625
Période d'observation	1917-30	1926-32	1920-28	1922-28	1923-33	1920-28	1929-33	1929-33
Température a 2900 m	Fusion en mm de glace par jour (d'après le graphique donne par l'auteur)							
- 4°	-	-	-	3	-	-	3	6
- 2°	-	-	-	6	-	-	8	9
0	-	8	-	10	9	8	14	14
2°	14	12	11	17	13	11	21	22
4°	20	19	20	25	19	17	30	31
6°	29	29	34	34	26	26	40	43
8°	40	41	51	43	34	38	50	59
10°	55	57	-	54	44	54	-	-
12°	70	-	-	-	54	-	-	-



déduits des courbes d'un graphique de l'auteur. Nous avons traduit ce graphique (fig. 9) en modifiant l'échelle des températures (calculées à 2.500 mètres). Il nous paraît plus intéressant de rapporter le débit à la température à 2.500 m plutôt qu'à 2.900 m pour les raisons indiquées plus haut.

Les courbes, dans leur ensemble, sont légèrement paraboliques et peuvent être considérées comme à peu près linéaires dans leurs parties supérieures. Ainsi pour le glacier d'Aletsch, on constate, comme précédemment, une *proportionnalité* assez nette entre le débit et la température :

$T^{\circ}$ à 2.500 m	Q en mm	$\frac{Q}{T}$
2,36	6,54	2,77
4,36	11,13	2,55
6,36	16,38	2,57
8,36	22,27	2,66
10,36	28,17	2,71
12,36	35,37	2,86

Ces observations ne concernent, nous le répétons, que des périodes de jours « clairs », donc sans précipitations, et à insolation assez forte. Il en résulte notamment que le rapport  $\frac{Q}{T}$  est un peu plus élevé que celui que nous avons relaté plus haut (2,52) correspondant à tous les jours du mois considéré.

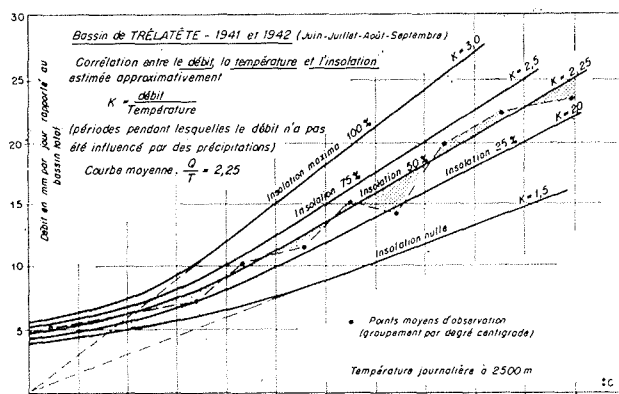


FIG. 10

## 6. Influence de l'insolation sur la fusion glaciaire.

Des observations analogues à celles que nous venons de résumer — comportant en plus quelques données estimatives de l'insolation — concernant le glacier de Trélatête et ses débits au cours des étés 1941 et 1942, nous ont conduit à la figure 10 ci-jointe, qui traduit plus ou

moins, c'est-à-dire approximativement, l'influence de l'insolation diurne.

La courbe moyenne résulte des points moyens correspondant aux températures moyennes groupées de degré en degré, soit :

T = 10°86	Q = 23,29	$\frac{Q}{T} = 2,14$ (K)
» = 9°53	» = 22,20	» = 2,33
» = 8°34	» = 19,94	» = 2,39
» = 7°42	» = 14,31	» = 1,95
» = 6°47	» = 15,20	» = 2,36
» = 5°56	» = 11,76	» = 2,11
» = 4°33	» = 10,55	» = 2,44
» = 3°43	» = 7,35	» = 2,15

On a, en moyenne :  $Q = 2,25 T$  (T à 2.500 m — Q en mm pour le bassin total). A quelques rares exceptions près le rapport  $K = \frac{Q}{T}$  journalier a varié entre 1,5 et 3,0, valeurs que nous avons admises correspondre, la première à une insolation diurne nulle, et la seconde à une insolation diurne maximum.

Comme journées *particulièrement ensoleillées*, correspondant à l'insolation maximum, nous citerons les trois journées des 29-30 et 31 juillet 1942, pendant lesquelles le ciel est resté absolument sans nuages dans le massif du Mont-Blanc, fait *exceptionnellement rare*, que nous n'avons constaté — pendant l'été — depuis 12 ans que nous passons les mois de juillet, août et septembre dans cette région, que cinq à six fois.

Pour ces 3 jours, on a :

$$Q = 28,1 \quad T = 8^{\circ}7 \quad K = 3,23$$

L'écoulement, bénéficiant de la fusion retardée des jours précédents particulièrement chauds, mais à insolation beaucoup plus faible (25-28 juillet,  $T = 10^{\circ}4$ ,  $Q = 22,5$ ,  $K = 2,16$ ) peut être considéré comme légèrement supérieur à celui correspondant à la température actuelle de  $8^{\circ}7$ .

On peut admettre que la valeur  $K = 3$  correspond au *maximum d'insolation*, et que le débit correspondant  $Q = 28$  mm constitue également un maximum exceptionnel de l'écoulement dû à la fusion glaciaire proprement dite seule.

Ce débit, rapporté à la surface glaciaire seule, correspond à 56 mm, et si on estime, d'autre part, que la fusion utile affecte 70 % de la surface glaciaire, à 80 mm, soit à près d'un mètre cube par km<sup>2</sup> de surface glaciaire, participant effectivement à l'écoulement.

Pour la période 25 juillet-2 août, à peu près sans précipitations, mais ayant comporté certaines journées nébuleuses, totalement ou partiellement, les résultats moyens sont :

$$T = 9^{\circ}9 \quad Q = 25,5 \text{ mm} \quad K = \frac{Q}{T} = 2,58$$

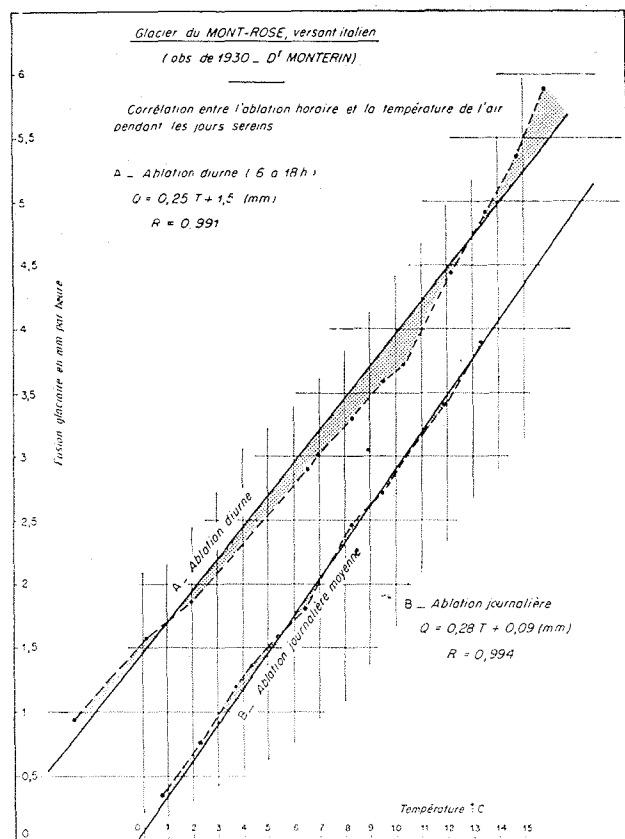


FIG. 11

7. Le débit horaire et la température.

Toutes les études exposées ou résumées ci-dessus reposent sur l'estimation de l'ablation glaciaire basée sur l'observation des débits d'origine glaciaire, mesurés sur l'émissaire du bassin.

On peut également mesurer *directement* cette ablation, localement et superficiellement, en certains points du glacier, au moyen de certains appareils, dits « ablatomètres » ou « ablatographes ».

Dans cet ordre de recherches nous mentionnerons ici les observations faites en 1930 par le docteur MONTERIN sur le glacier du Mont-Rose, versant italien, relatées et résumées par le prof. Carlo SOMIGLIANA (*Ricerche sull' ablazione glaciale et sulle relazioni tra variazioni glaciali e variazioni climatiche*, Association Internationale d'Hydrologie scientifique, Bulletin n° 21, Rome 1934).

L'auteur résume les mesures de température et de l'ablation, faites à différentes altitudes, variant de 2.000 à 4.500 mètres, et à différentes températures dans deux tableaux numériques, concernant l'un les observations *diurnes* (6 h. à 18 h.) et l'autre les observations *journalières* considérées dans l'ensemble des 24 heures. L'ablation est donnée en millimètres par heure, et est relative seulement aux journées dites « sereines », c'est-à-dire sans précipitation et à insolation vraisemblablement élevée.

Nous en avons déduit les 2 courbes de la figure 11 :

A. Ablation horaire diurne (6 h. à 18 h.) :

$$Q = 0,25 T + 1,5 \quad R(Q, T) = 0,99.$$

La courbe expérimentale est légèrement parabolique.

B. Ablation horaire journalière (24 heures) :

$$Q = 0,28 T + 0,09 \quad R(Q, T) = 0,994$$

et plus simplement  $Q = 0,3 T$ , soit par jour  $Q = 7,2 T$ . Les deux droites ont à peu près le même coefficient angulaire. Leur décalage chiffre en quelque sorte l'influence que joue l'insolation proprement dite.

Cette influence, combinée à celle de la diminution nocturne de la température de l'air, se manifeste par la variation diurne du débit des émissaires glaciaires. La figure 12 traduit cette variation moyenne, au cours des années 1941 et 1942, pour le torrent de Trélatète. Pour l'ensemble des années respectives, le rapport des débits extrêmes observés journalièrement a été de 1,28 pour 1941 (année pluvieuse) et de 1,60 pour 1942 (année sèche). Il a été en moyenne de 2 en août 1942 et a atteint 2,8 pour l'ensemble des trois journées déjà mentionnées des 29, 30 et 31 juillet.

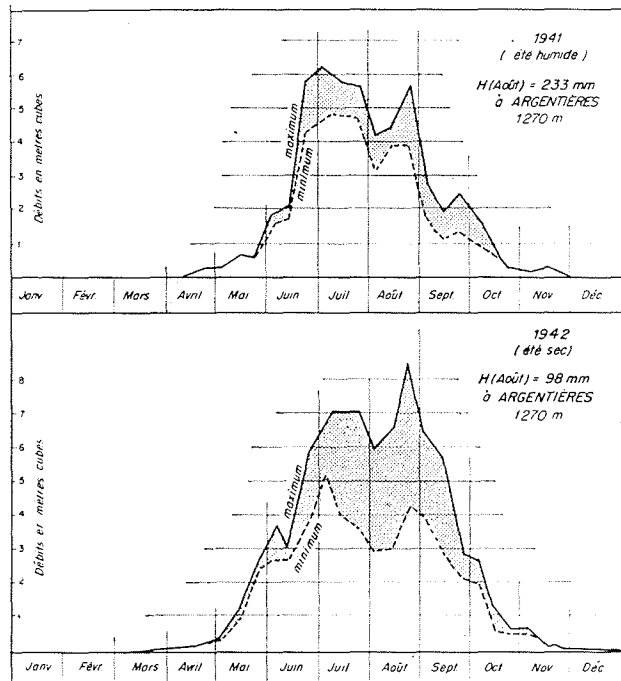


FIG. 12

Le mémoire, cité plus haut, du D<sup>r</sup> Ing. ALFIERI sur les débits glaciaires de la Doiré Baltée, contient également quelques données numériques journalières pour la période 26 août-10 septembre 1929 : le rapport moyen des débits extrêmes journaliers glaciaires a été de 1,88 pour la Doiré Baltée à Mombardone, de 1,77 pour la Doiré Baltée à Ponte Baio et de 3,82 pour le Lys à Gressoney. Ce dernier chiffre nous apparaît très sujet à caution.

Pour la Romanche, à l'ancienne station des Chazeaux (10 % environ de glaciers), le rapport des débits extrêmes (1911, 1916, 1918, 1919) a été, pour les différents mois, égal à :

Janvier	1,20	Mai	1,50	Septembre	1,36
Février	1,27	Juin	1,38	Octobre	1,18
Mars	1,30	Juillet	1,26	Novembre	1,27
Avril	1,43	Août	1,24	Décembre	1,24

Il s'agit des débits totaux du bassin dont l'altitude moyenne est de l'ordre de 2.200 mètres, et les variations concernent plutôt le débit nival que le débit glaciaire.

### 8. Influence de la pluviosité sur le débit glaciaire.

Cette influence est très complexe, et les observations manquent, qui permettraient de rechercher et d'établir éventuellement, statistiquement, des formules de corrélation entre le débit, la température et les précipitations. Tous les auteurs ont limité leurs études au cas des jours « secs », c'est-à-dire sans pluie. Nous ferons seulement mention ici des quelques recherches personnelles que nous avons entreprises, concernant soit le glacier de Trélatête, soit le glacier d'Aletsch. Elles sont d'ailleurs trop fragmentaires et trop incomplètes pour que nous ayons pu en tirer des conclusions précises et définitives.

#### GLACIER D'ALETSCH.

Le groupement, d'après les précipitations croissantes, des observations mensuelles relatives aux 15 étés déjà étudiés, en 3 séries, conduit aux valeurs suivantes de H (précipitations à Lyon en mm par jour),  $p$  pluviosité correspondante :

$$\frac{H}{H_0}$$

Q (débit en mm par jour) et  $K = \frac{Q}{T}$ .

H	$p$	T	Q	K
1,50	0,60	5°86	15,9	2,71
2,56	1,03	4°88	14,1	2,88
3,40	1,33	4°26	13,8	3,24
moy. 2,48	1,00	5°00	14,6	2,92

Ce tableau montre que la température décroît quand la pluviosité augmente; que dans les mêmes conditions le débit décroît, mais que sa décroissance s'atténue peu à peu, et laisse entrevoir un minimum, suivi d'un accroissement pour les fortes pluviosités; que le rapport K, sensiblement constant pour les précipitations n'excédant pas la moyenne, croît ensuite de plus en plus rapidement avec les fortes précipitations.

Un autre classement consiste à distinguer quatre sortes d'étés, suivant que la pluviosité et la température sont inférieures ou supérieures à la moyenne correspondante ( $H_0 = 2,48$  et  $T_0 = 5^\circ$ ). On obtient ainsi le tableau suivant :

Etés	Nombre	T	H	Q	K
chauds et secs . . . . .	4	6°15	1,48	16,5	2,68
chauds et humides . . . . .	3	5°60	2,78	14,7	2,63
froids et secs . . . . .	3	4°47	2,10	13,7	3,06
froids et humides . . . . .	5	4°04	3,35	13,5	3,35
	15				

En faisant état des données Q, H et T des deux types d'années les plus dissemblables (étés chauds et secs — étés froids et humides) dans l'établissement d'une formule  $Q = \alpha H + \beta T$  (par la méthode des moindres carrés), on obtient la formule numérique :

$$Q = 2,8 p + 2,41 T.$$

Si nous considérons séparément les mois de juillet et août des mêmes 15 années, et si nous les classons en 3 types ( $H < 1,5$ ,  $1,5 < H < 3,0$ , et  $H > 3,0$ ) on obtient le tableau suivant :

H	T	Q	K
0,86	8°29	20,92	2,52
2,42	6°16	17,74	2,88
3,92	5°45	17,55	3,22

dont les valeurs satisfont presque exactement la formule :

$$Q = 1,20 H + 2,40 T$$

soit :

$$Q = 3 p + 2,4 T$$

peu différente de la précédente, établie d'après les données estivales.

Une telle formule montre qu'en moyenne ( $T = 5^\circ$  et  $p = 1$ ) le débit mensuel estival, en juillet et août, provient pour 20 % des précipitations actuelles, et pour 80 % de la fusion glaciaire.

Mais, nous le répétons, les calculs précédents, basés sur les données météorologiques de Lyon et non sur les données locales, sont plus ou moins discutables.

GLACIER DE TRÉLATÈTE.

Le tableau D résume les données fluviales et météorologiques des deux étés 1941 et 1942 (69 jours en 1941 et 72 jours en 1942). Les données météorologiques résultent de nos propres observations, faites à Argentières (alt. 1,275 m.). Elles sont donc plus locales que dans le cas précédent, mais elles portent sur trop peu d'années pour pouvoir être utilisées statistiquement à l'établissement d'une loi de corrélation quelconque.

D'après certains observateurs (Vallot, par exemple), l'ablation glaciaire serait plus forte un été humide qu'un été sec. C'est peut-être vrai — et encore — pour les parties inférieures d'un glacier, mais pour l'ensemble d'un cirque glaciaire, cette assertion nous paraît fort discutable. Dès qu'il se met à pleuvoir en montagne (et éventuellement à neiger aux fortes altitudes), il en résulte immédiatement une forte baisse thermique, qui se traduit par une diminution sensible du débit de l'émissaire glaciaire, sauf le cas de précipitations liquides très importantes.

La comparaison des mois d'août de 1941 et

1942, pour le torrent de Trélatète, confirme cette affirmation :

    Août 1941

H=233 mm à 1.300 m Q=16,36 T=5,59 K=2,92

    Août 1942

H= 98 mm à 1.300 m Q=20,42 T=7,54 K=2,71

En définitive, et *grosso modo*, on peut dire que *les effets combinés* des différents facteurs conditionnant le débit glaciaire en été, si l'on considère des périodes suffisamment longues (la température, l'insolation, les précipitations), *tendent à produire un certain équilibre entre Q et T*, équilibre qui se traduit par une formule moyenne  $Q = KT$  ou  $Q = a + KT$ , c'est-à-dire par une corrélation ou covariation entre Q et T plus ou moins satisfaisante.

Ainsi, si l'on compare les deux étés 1941 et 1942 dans leur ensemble, le rapport  $K = \frac{Q}{T}$

— que l'on peut appeler *pouvoir fondant apparent du degré thermométrique*, ou encore *équivalent du degré thermométrique en débit gla-*

TABLEAU D

PÉRIODES	Jours J	T° 2500 m	$\Delta T$ à 1300 m	H 1300 m	$h = \frac{H}{J}$	Q mm	$\frac{Q}{T}$	$\frac{Q-H}{T}$	Rapport des débits extrêmes	
15 - 31 Juillet	17	7,55	16,06	77,7	4,57	18,67	2,47	1,87	1,15	Été 1941 15 Juillet - 21 Septembre
1 - 15 Août	15	5,76	14,86	106,5	7,10	15,08	2,62	1,38	1,32	
16 - 31 Août	16	5,42	13,32	126,3	7,90	17,56	3,24	1,77	1,31	
1 - 21 Septembre	21	4,14	15,35	12,2	0,58	7,89	1,91	1,77	1,60	
Août	31	5,59		232,8	7,51	16,36	2,92	1,58		
15 Juillet - 21 Sept	69	5,63		322,7	4,68	14,35	2,55	1,72		
18 - 31 Juillet	14	6,95	16,10	28,5	2,04	18,97	2,73	2,43	1,58	Été 1942 18 Juillet - 27 Septembre
1 - 15 Août	15	6,33	15,66	53,7	3,58	18,08	2,85	2,29	2,03	
16 - 31 Août	16	8,68	14,50	44,6	2,79	22,62	2,60	2,29	2,03	
1 - 15 Septembre	15	8,90	15,24	31,7	2,11	19,95	2,24	2,00	1,73	
16 - 27 Septembre	12	3,65	11,26	52,7	4,39	14,05	3,85	2,65	1,71	
Août	31	7,54		98,3	3,17	20,42	2,71	2,29		
18 Juillet - 27 Sept	72	7,06		211,2	2,93	18,97	2,68	2,27		
Étés 1941 et 1942	141	6,36		533,9	3,78	16,71	2,62	2,03		1941 et 1942

ciaire — on constate qu'il a peu varié d'une année à l'autre :

1941 (15 juillet-21 septembre)

$$T = 5^{\circ}63 \quad Q = 14,35 \quad K = 2,55$$

1942 (18 juillet-27 septembre)

$$T = 7^{\circ}06 \quad Q = 16,71 \quad K = 2,68$$

Quant à l'influence propre de l'insolation, elle est plus ou moins mise en évidence, qualitativement, par la comparaison des valeurs respectives du rapport  $K' = \frac{Q-H}{T}$ , soit 1,58 en août 1941 (mois très pluvieux, très faible insolation) et 2,29 en août 1942 (mois moins pluvieux, et à insolation beaucoup plus forte).

MESURE DIRECTE DE L'ABLATION GLACIAIRE — GLACIER DE TRÉLATÈTE (20 août-10 sept. 1942).

L'ablation du glacier de Trélatète a été déterminée, directement, pendant ces 21 jours au moyen de deux balises situées au Mauvais Pas (alt. 2.070 et 2.080 m). Ces balises se sont déchaussées l'une de 1 m 14 et l'autre de 1 m 37, soit en moyenne de 1 m 25. Ces observations ont été rapportées par le regretté M. WOEBER, chef du Service des Forces Motrices de la Société d'Ugine.

Pendant cette période, il est tombé à Argentières 61,2 mm de pluie et à Trélatète 76,7 mm (en 6 jours pluvieux).

La température moyenne, observée à Argentières (alt. 1.275 m.) a été pendant cette période, de 15°45, soit à l'altitude 2.080 m, de 11° environ. D'où une ablation journalière par degré centigrade de  $\frac{60}{11} = 5 \text{ mm } 5$  environ.

Cette valeur est en concordance avec celles observées par le docteur MONTERIN dans le Massif du Mont-Rose, sur le versant italien :

Au Plateau du Lys (altitude 2.520 m) :

Les observations concernant la période 29 juillet-5 août 1930, au moyen d'un ablatographe, ont donné une ablation de 21,6 cent. en 6 jours pour une température moyenne de 6°1.

Le pouvoir fondant du degré thermométrique, en 24 heures, a donc été de :

$$\frac{216}{6 \times 6,1} = 5 \text{ mm } 9.$$

L'ablation horaire pendant le jour (6 à 18 h.) a été de 2,16 mm et pendant la nuit (18 h. à 6 h.) de 0,79 (rapport 2,7).

Au glacier de Bors (alt. 3.050 m) :

Du 21 août au 8 septembre 1930, l'ablation a été, pendant le jour, de 3,17 mm par heure

( $T = 9^{\circ}7$ ) et pendant la nuit de 0,74 mm par heure ( $T = 6$ ), soit en moyenne de 1,95 mm par heure et 46,8 mm par jour ( $T = 7,85$ ) :

$$K = \frac{46,8}{7,85} = 5 \text{ mm } 9$$

(7 mm 8 le jour et 3 mm la nuit : rapport 2,6).

Signalons enfin qu'en Laponie, pour une période de 23 jours, l'ablation du glacier de Sarjektjikko a été de 1 m 31 en 1897, pour  $T = 10^{\circ}7$ , de 0 m 88 en 1899 pour  $T = 9^{\circ}5$ , et de 1 m 05 en 1900 pour  $T = 10^{\circ}1$ . En moyenne, le pouvoir fondant du degré thermométrique a donc été de :

$$\frac{1.080}{23 \times 10,1} = 4,7 \text{ mm.}$$

Signalons, incidemment, l'intérêt que présenteraient des mesures actinométriques systématiques, pour déterminer l'influence de l'altitude sur le pouvoir fondant de l'atmosphère, à égalité de températures. La formule que nous avons préconisée, dans une de nos études antérieures, ne reposant d'ailleurs sur aucune mesure précise, soit  $Q = (0,12 + 0,00002 A)T$ , A étant l'altitude en mètres et Q le débit en mètres par mois, donne respectivement :

à 2.000 m. . . .  $K = \frac{160}{31} = 5,16$  par jour

à 2.500 m. . . .  $K = \frac{170}{31} = 5,48$  »

à 3.000 m. . . .  $K = \frac{180}{31} = 5,81$  »

9. L'ablation nivale et la température.

A égalité des surfaces enneigées d'un bassin de montagne, nous pensons qu'il y a également

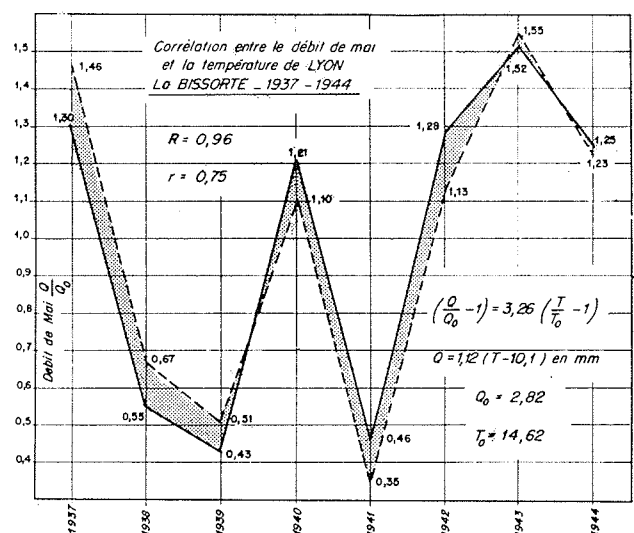


FIG. 13

corrélation entre le débit et la température. Tel semble être le cas, par exemple, pour le Bassin de la Bissorte, pendant le mois de mai.

Ainsi pour les dix années 1937-1946, le rapport de corrélation entre la température du mois de mai, observée à Lyon, et le débit du bassin a été de 0,94, et la formule de corrélation est :

$$\frac{Q}{Q_0} - 1 = 0,18 (T - T_0).$$

La figure 13 illustre cette corrélation, qui est satisfaisante.

Mais il resterait à chercher si le pouvoir fondant de l'atmosphère est le même, pour une surface neigeuse et pour une surface glaciaire. Les données statistiques en notre possession ne nous ont pas permis de trancher nettement la question. En outre, la fusion doit varier suivant la consistance superficielle de la glace et de la neige.

métrique détaillée que pourrait résumer un graphique tel que celui de la figure 14, concernant le bassin de l'Arve à Chamonix (185 km<sup>2</sup>). Ce graphique établi très rapidement, d'après les cartes Vallot, n'est qu'approximatif.

Nous avons distingué trois zones, intervenant différemment dans le conditionnement du débit total.

PREMIÈRE ZONE

Parties ne comportant aucun glacier.

Le débit auquel elles donnent naissance est exclusivement pluvial et nival (neiges de l'année). Altitude moyenne 2.000 m.....

49,4 %

DEUXIÈME ZONE

Parties exclusivement glaciaires, constituant la zone de dissipation proprement dite du glacier, à laquelle nous avons assigné comme limite supérieure 3.000 m. Le débit engendré par cette zone est à la fois glaciaire, nival (neiges de l'année tombant sur le glacier), et pluvial (pluies de l'année tombant sur le glacier)...

22,7 %

TROISIÈME ZONE

Parties soit glaciaires (limite inférieure 3.000 m) et parties non-glaciaires supérieures constituant le collecteur du glacier. Altitudes moyennes 3.270 m (17,6 %) et 3.420 m (10,3 %). Pas d'écoulement appréciable.....

27,9 %

100,0 %

Il eut été intéressant de comparer ces données avec les précipitations et les débits correspondants, mais malheureusement les observations, de ce point de vue, dignes de foi, manquent totalement. On ne connaît pas les débits de l'Arve à Chamonix, les anciens relevés publiés (1905-1911) qui donnent un écoulement moyen de 2.300 mm, étant douteux, les relevés plus récents faits à la station des Pèlerins (13,7 m<sup>3</sup> en 1941 — 7,8 en 1942 — 18,4 en 1943) étant fantaisistes... et encore moins les précipitations.

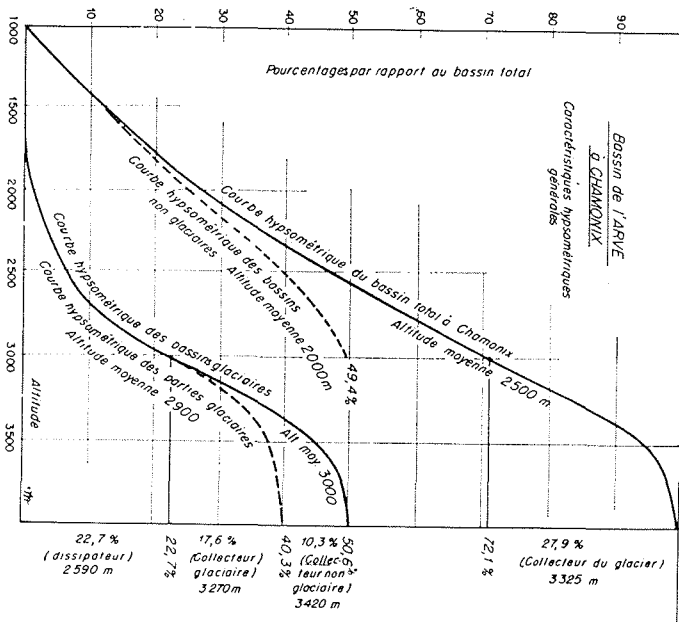


FIG. 14

10. Caractéristiques hypsométriques d'un bassin de montagne à glaciation élevée.

Comme le montre d'ailleurs la figure 9, chaque bassin glaciaire a ses caractéristiques physiques propres (expositions générale ou particulières de ses différentes parties, altitude moyenne et répartition hypsométrique des parties glaciaires et non-glaciaires, etc.) qui conditionnent dans chaque cas l'expression numérique traduisant la corrélation existant entre le débit, la température, et éventuellement d'autres facteurs (insolation, radiation solaire, précipitations).

Toute étude glaciologique d'un tel bassin devrait donc être accompagnée d'une étude hypso-

CONCLUSIONS

Dans une étude sur le Climat de la Savoie, l'Inspecteur général des Eaux et Forêts MARTIN a écrit les lignes suivantes :

« C'est le soleil qui fait fondre le glacier : d'où le corollaire : la fusion du glacier est indépendante de la température. On peut dire d'une façon moins paradoxale qu'étant donné les condi-

tions climatériques générales de notre pays, la fusion du glacier est fonction de l'insolation et non de la température, ce qui revient à dire qu'à l'altitude où se trouvent les bassins glaciaires la durée des périodes de dégel et la faiblesse de l'élévation moyenne de la température au-dessus de 0 ne provoqueraient qu'une fusion extrêmement réduite du glacier. »

Certes, ce n'est pas la température de l'air, seule, qui fait fondre la glace, mais bien la chaleur solaire se manifestant de diverses manières. Mais celle-là étant, dans ses variations périodiques, en corrélation avec l'insolation, avec la radiation solaire au sol, il est normal que la fusion glaciaire soit également en corrélation, en covariation si l'on préfère, avec le facteur empirique qui nous sert à mesurer, d'une manière évidemment imparfaite, mais pratique, la chaleur solaire, c'est-à-dire avec la température. Les pages qui précèdent sont d'ailleurs suffisamment explicites et probantes à ce sujet.

Aussi bien la fusion glaciaire est à peu près nulle en hiver, c'est-à-dire pendant les mois à température fortement négative, même dans les zones glaciaires fortement ensoleillées et soumises pendant quelques heures à une insolation intense, et si fusion il y a, elle ne donne pas lieu à écoulement, mais bien, par l'alternance des heures de gel et de dégel, à la transformation progressive de la neige en glace. *La majeure partie de l'écoulement glaciaire provient des quatre mois de juin, juillet, août et septembre*, les seuls mois de l'année où la température moyenne soit nettement supérieure à 0, vers 2.500 mètres, c'est-à-dire à l'altitude du centre de gravité des zones glaciaires donnant lieu à écoulement.

La *glaciologie* constitue une des branches essentielles de l'*Hydrologie*, mais jusqu'à présent, surtout en France, les observations et les recherches ont surtout porté sur le côté *géographique, morphologique* de cette science, et l'on s'est presque exclusivement occupé de mesurer les oscillations des fronts terminaux des glaciers, leur profondeur, leur vitesse de déplacement annuel, de constater leur diminution persistante depuis 150 ans, qui s'est considérablement accentuée depuis le début du siècle, sans qu'on ait d'ailleurs cherché à illustrer cette diminution par des mesures comparatives des précipitations et des débits.

Ou bien encore, si l'on s'occupe de *nivologie*, c'est l'étude des avalanches, des dégâts qu'elles causent aux habitations, aux forêts, qui retient l'attention.

Nous espérons avoir montré, par quelques exemples typiques, l'intérêt positif qui s'attache à l'étude des phénomènes d'ordre *météorologique*, en liaison avec les phénomènes d'ordre fluvial, qui conditionnent l'alimentation, l'ablation, l'évolution des glaciers de nos montagnes, générateurs au plus haut point de force, d'énergie, de lumière...

... Et pourquoi ne terminerai-je pas ce mémoire, pour finir sur une note philosophique, par le verset bien connu des *Livres Saints* : « *Levavi oculos in montes, unde veniet auxilium mihi* » où Pierre Termier voyait, en son géomysticisme inné, — nouveau symbole, certes imprévu, du pouvoir mystérieux des montagnes, — une préfiguration de l'utilisation par l'Homme de l'énergie accumulée au sein des glaciers, c'est-à-dire de la « Houille Blanche » ?

