

MÉTÉOROLOGIE ET HYDROLOGIE

ÉTUDE GÉNÉRALE DES VARIATIONS DE DÉBIT EN FONCTION DES FACTEURS QUI LES CONDITIONNENT

GENERAL STUDY OF DISCHARGE VARIATIONS AS A FUNCTION OF THEIR CONDITIONING FACTORS

3^e PARTIE : CORRÉLATIONS ET PRÉVISIONS NIVO-FLUVIALES

Snow river correlations and resulting discharge previsions

(English synopsis p. 118)

par A. COUTAGNE

(Ancien élève de l'Ecole Polytechnique)

« Mieux vaut prévoir sans certitude que de ne pas prévoir du tout ».

POINCARÉ.

Toutes les méthodes de prévision du débit nival reposent sur le même principe, l'existence d'une corrélation entre ce débit et un **facteur-témoin** antérieurement connu ou déterminable à l'avance, considéré comme **représentatif de l'enneigement**, donc comme conditionnant plus ou moins massivement et totalement l'écoulement pendant la période de fusion.

Elles se différencient par **la nature** de ce facteur-témoin dont le choix dépend à la fois des caractéristiques locales de chaque bassin et des données statistiques — pluviométriques, nivométriques, hydrologiques, thermiques — dont on dispose et dont on peut faire état.

Nous désignons par N ce facteur-témoin et par Q le débit à prévoir, qui sera, par exemple, celui de la période avril-juin, mai-juillet, etc... suivant les conditions altimétriques et thermiques locales, ou toute autre période sur laquelle on désire, pour d'autres raisons, notamment techniques et économiques, faire porter la prévision.

On peut envisager **deux modes opératoires** pour déterminer la corrélation éventuelle existant entre Q et N (et éventuellement d'autres facteurs secondaires).

En premier lieu, s'inspirant de considérations hydrologiques faisant intervenir **« le déterminisme »** qui conditionne les rapports mutuels de tous les phénomènes en jeu, l'évaporation, le déficit d'écoulement, la condensation, l'infiltra-

tion, la rétention nivale ou liquide, l'écoulement, et d'où résulte le bilan hydrologique du bassin, on admettra « a priori » une formule empirique que l'on expérimentera et améliorera peu à peu par tâtonnements successifs, au fur et à mesure qu'on possédera des données d'observation plus nombreuses. C'est évidemment la seule méthode possible à l'origine, en l'absence de statistiques suffisantes.

La deuxième méthode, plus objective — à laquelle la première méthode aboutira fatalement — repose uniquement sur le concept de **probabilisme**, et sur l'étude statistique et comparative des deux séries d'observations.

$$Q_1 Q_2 \dots Q_n \text{ et } N_1 N_2 \dots N_n$$

portant sur une période suffisamment longue.

On est ainsi amené à une courbe ou **formule de corrélation** et de prévision, à laquelle on pourra généralement assigner une forme linéaire, telle que :

$$\frac{Q}{Q_0} - 1 = \lambda \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right)$$

le deuxième terme étant éventuellement augmenté d'un facteur aléatoire qui en chiffre la précision.

$$\frac{Q}{Q_0} - 1 = \lambda \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right) + \frac{Z}{K}$$

Cette étude est en tous points comparable à celle que nous avons faite dans le premier de nos articles, traitant des corrélations pluvio-fluviales entre le débit annuel d'un cours d'eau et les précipitations correspondantes, et nous emploierons les mêmes formules.

Parmi les facteurs-témoins utilisables, nous citerons les suivants :

1° **La quantité de neige existant dans le bassin** au début présumé le plus probable de la période de fusion intensive (1^{er} avril, 1^{er} mai, etc...), cette quantité étant déterminée par sondages et échantillonnages, en un certain nombre de points, toujours les mêmes, au moyen d'un appareillage portatif approprié.

C'est la méthode classique, en usage aux Etats-Unis, dans la Sierra Nevada, où elle a pris naissance (méthode dite aussi des **pourcentages**). Une telle méthode est-elle à préconiser dans les Alpes ? Nous en doutons. Le sondage des champs de neige constitue une opération délicate et coûteuse, exigeant des spécialistes expérimentés, et sa précision est plus illusoire qu'effective, surtout dans une région aussi élevée et accidentée, où la neige est très irrégulièrement répartie.

Plus simplement, et aussi exactement, pensons-nous, on appréciera l'enneigement actuel, comparativement à l'enneigement moyen, au moyen de balises, et également, plus indirectement, d'après les précipitations et les températures observées en hiver, à basse altitude, et certaines hypothèses sur l'accroissement de précipitations en fonction de l'altitude.

Mentionnons que, dans la **mesure directe de la neige**, les échantillons recueillis doivent être pesés : la fusion de ces échantillons est une opération trop longue pour être envisagée et déficiente.

2° **La quantité de neige tombée pendant l'hiver**, observée au fur et à mesure des chutes successives, au moyen de nivomètres, de cuves ou tables à neige, en différents points du bassin, judicieusement choisis. Compte tenu des surfaces intéressées par chaque station d'observation, on en déduit l'enneigement moyen du bassin.

Les Américains appellent cette méthode la **méthode des surfaces**. Elle exige des postes d'observation en haute montagne, dont les données sont délicates à obtenir et qui sont souvent incertaines.

3° **Le total des précipitations de toute nature, nivales et liquides** d'une ou de plusieurs stations, même situées à basse altitude, à la condition qu'on ait vérifié, par exemple par l'étude comparative des débits annuels et des précipitations correspondantes, que les dites précipitations sont suffisamment représentatives de celles du bassin considéré dans son ensemble, c'est-à-dire en corrélation avec les débits observés.

On peut même utiliser, à cet effet, des stations situées en dehors et même assez éloignées du bassin lui-même, pourvu que ces stations participent au même régime pluviométrique. Tel est le cas, semble-t-il, pour Lyon, où les variations pluviométriques périodiques sont, dans l'ensemble, parallèles à celles de certains bassins des

Alpes du Nord. A un hiver pluvieux, à Lyon, correspond presque toujours un hiver alpestre neigeux.

C'est ainsi que, entre les précipitations annuelles de **LYON-O.N.M.** et de **BELLEVILLE** (Beaufortin) la corrélation a été assez forte ($R = 0,85$) pour la période 1925-1943, à peine moins élevée que celle existant entre **LYON-Observatoire** de St-GENIS et **LYON-Le Parc** distants d'une dizaine de km. ($R = 0,90$) pour la période 1881-1917.

On peut effectivement — nous en donnerons plus loin des exemples — fonder certaines prévisions du débit nival dans les Alpes françaises sur les observations pluviométriques de la région lyonnaise ou grenobloise, qui présentent sur les observations plus locales propres à chaque bassin, le double avantage d'être plus exactes, plus complètes, et de comporter des séries statistiques d'une durée bien plus longue — telles qu'en exige la recherche et l'établissement des corrélations nivo-fluviales.

4° La considération des précipitations brutes totales a l'inconvénient de négliger, ou plutôt d'estimer peu variable, d'une année à l'autre, le débit hivernal.

Pour éliminer cette cause d'erreur, on peut adopter pour N, si l'on peut observer ou calculer avec assez de précision la valeur absolue des précipitations hivernales effectives du bassin (et non seulement leur valeur relative, ce qui est le cas le plus fréquent) la différence entre ces **précipitations H et le débit hivernal correspondant q**, ce dernier étant facile à observer.

Le facteur-témoin $N = H - q$ est vraisemblablement **le plus représentatif de l'état des réserves du bassin, tant nivales que liquides**, ces dernières n'étant pas toujours négligeables, au début de la période de fusion, et plus généralement au début de n'importe quelle saison de l'année.

On peut, de fait, fonder sur un tel facteur-témoin, en l'occurrence la courbe des précipitations et celle des débits cumulés, considérés à partir d'une époque origine, judicieusement choisie, une prévision continue des débits à venir, du moins de celui du mois le plus proche, en tout cas de son minimum, soit au moyen de certaines hypothèses, étayées sur l'expérience concernant les variations saisonnières du débit d'écoulement, soit au moyen de diverses formules de corrélation et de prévision valables pour telle ou telle saison de l'année (1).

La science ayant pour objet **l'étude de la neige**,

(1) Nous traiterons ultérieurement cette question en étudiant les corrélations fluviales intermensuelles.

de sa mesure, de son contrôle à des fins scientifiques ou économiques, est une science nouvelle en honneur surtout aux Etats-Unis. Voici ce qu'a écrit, au sujet de ses origines et de son développement ultérieur, J.-E. CHURCH, pionnier en cette matière, dans son mémoire « **Snow-surveying : its principles and possibilities** » — *The Geographical Review* — New-York 1933 — :

« La surveillance de la neige (**snow surveying**) est une des sciences les plus récentes. Elle a d'abord pris naissance en Europe, dans l'étude de la **densité de la neige**. Vers 1901, un appareillage portatif a été usité en Russie pour la mesure de la neige, et en 1908 le Professeur ANGOT, Directeur du Bureau Central Météorologique de France, imagina un échantillonneur cylindrique muni d'une balance. Aux Etats-Unis, elle a pris naissance dans les Etats de l'Est, et a été appliquée à l'**étude des crues** (Mixer en 1901 — Horton en 1905). Enfin elle est née, une troisième fois, en 1904, au Mont-Rose dans la Sierra Nevada, avec, comme but principal l'**étude de l'écoulement et la prévision des débits**.

« De ces trois origines — Europe, Etats de l'Est et de l'Ouest — indépendantes dans les buts cherchés et les méthodes, la troisième est celle qui a été la plus fortunée et a connu le plus bel essor. Là où les hautes montagnes couvertes de neige rendent la vie possible dans les régions désertiques environnantes, c'était une nécessité humaine de stimuler les recherches qui ont trouvé un centre idéal à l'observatoire du Mont-Rose, autour duquel s'étend un domaine propice aux essais et aux applications pratiques. »

La littérature concernant la prévision du débit nival est surtout abondante aux Etats-Unis, où cette prévision constitue un **grand service d'intérêt national**. En la parcourant, nous avons été amenés à formuler les quelques remarques suivantes :

1° Ce serait une erreur de vouloir transplanter purement et simplement dans les Alpes françaises les méthodes et les conclusions américaines. Les régions sont trop différentes, notamment du point de vue pluviométrique.

Certains ont pu s'étonner — aux Etats-Unis en particulier — qu'en cette matière, on ait fait si peu de chose jusqu'à ce jour en France. La raison en est toute simple.

Les bassins de montagne spécialement contrôlés de ce point de vue dans les Etats de l'Ouest du continent américain alimentent en eau des régions où les **précipitations estivales sont très faibles**, et pour lesquelles la prévision des débits, du point de vue agricole surtout, s'imposait comme une nécessité économique vitale. Rien de tel,

dans les Alpes, où les pluies d'été sont abondantes et assurent, bon an mal an, compte tenu d'un apport nival et éventuellement glaciaire également important, un débit largement suffisant pour faire face aux besoins des usines hydroélectriques moyennement équipées, et sans réservoirs d'accumulation, et où les besoins de l'agriculture sont à peu près inexistantes. Ajoutons que dans la Sierra Nevada, les **écarts pluviométriques** et par conséquent fluviaux, sont, d'une année à l'autre, considérablement plus grands qu'en France.

L'**utilité des prévisions de débit** n'a commencé à se manifester en France que depuis que les aménagements hydrauliques sont plus suréquipés et comportent des bassins d'accumulation de plus en plus spacieux. Elle se fera de plus en plus sentir, devant la nécessité de tirer le maximum des ressources hydrauliques nationales.

2° De telles prévisions se présentent-elles dans des conditions aussi favorables chez nous que dans les Etats de l'Ouest américain ? Nous répondons affirmativement à cette question.

On admet généralement que les possibilités des prévisions du débit nival **sont d'autant plus grandes que les pluies qui accompagnent la fusion des réserves nivales sont moins abondantes** : ce n'est pas tout à fait exact, et nous dirons... **que ces pluies sont plus constantes d'une année à l'autre**.

3° On a souvent le tort d'attribuer une **importance exclusive** au facteur « **enneigement** » et à sa valeur au début de la période de fusion intensive. Il n'y a pas que la capacité de rétention nivale qui conditionne le débit printanier, mais aussi la capacité de rétention liquide, et celle-ci n'est pas toujours négligeable devant celle-là, quand il s'agit de bassins d'altitude moyenne.

S'il est des cas où ce facteur est à peu près le seul à considérer (hauts bassins), il ne faut pas généraliser. Inutile de procéder à un inventaire de précision des réserves nivales, par sondage par exemple, dans un bassin où intervient, peut-être autant, la capacité de rétention liquide que l'on néglige d'inventorier.

4° La méthode de prévision américaine dite « de la Sierra Nevada » ou encore des « pourcentages » repose sur la corrélation $\frac{Q}{Q_0} = \frac{N}{N_0}$

c'est-à-dire qu'elle admet $\lambda = 1$ dans la formule générale $\frac{Q}{Q_0} - 1 = \lambda \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right)$

Qui dit « **corrélation** » ne dit pas nécessairement « **proportionnalité** », et de fait, le coefficient λ — dépendant de la nature du facteur-témoin N et des conditions propres à chaque bas-

sin, et notamment de l'importance des pluies à l'époque de la fusion — diffère souvent de l'unité, comme nous le constaterons.

Nous passons maintenant à l'étude de quelques bassins particuliers, choisis aux Etats-Unis, en Suède et en France.

ETUDE EXPERIMENTALE DE QUELQUES BASSINS PARTICULIERS.

« Nous verrons, si tu veux, les Pays de la neige ».
A. DE VIGNY.

1. — **Trucke River basin (Sierra Nevada).** — Tableau A. — Figure 1. — Ce bassin, l'un des premiers ayant fait l'objet d'observations régulières aux Etats-Unis, est situé dans la Sierra Nevada, à la même latitude environ que San-Francisco et Sacramento (39° — 40° L. N.). Les données statistiques dont nous avons fait état sont extraites d'un graphique de J.-E. CHURCH (**Principles of Snow Surveying as applied to forecastings Stream-Flow — Journal of Agricultural Research — 1935**), pour la période 1913-1934, dont nous avons complété les indications pour les années antérieures d'après quelques données numériques contenues dans ce même article. L'étude porte en définitive sur **vingt-quatre années**, soit 1910-1911 à 1933-1934.

Le régime pluviométrique du bassin est caractérisé par une prépondérance marquée des précipitations hivernales (climat méditerranéen continental d'après la classification de DE MARTONNE). Ainsi, les pluies des 4 mois avril-juillet représentent respectivement 10 %, 9,5 %, 2,7 %, 1,5 % : total 24,3 % de la couverture nivale exprimée en eau au 1^{er} avril, qui est de 500 à 600 mm. (22,7 pouces). L'écoulement normal avril-juillet est de 400 millions de m³ environ. Nous n'avons trouvé nulle part dans cet article d'indications concernant sa superficie, son altitude moyenne, sa température moyenne. L'absorption par le sol à la fusion est de 37,9 % de la couverture nivale normale (soit 8,6 pouces). Le cours d'eau est sans écoulement vers la mer.

Le facteur-témoin N utilisé est la **couverture neigeuse au 1^{er} avril**, inventoriée par des forages et échantillonnages par pesée, suivant l'appareillage et les méthodes créées par J.-E. CHURCH à l'observatoire du Mont-Rose. Le débit Q, objet des prévisions, est relatif aux 4 mois avril-juillet.

Nous avons, pour ce premier exemple, détaillé les calculs (tableau A), nous contentant pour les autres, d'en indiquer les résultats essentiels et de les illustrer par des graphiques.

	$\frac{N}{N_0} \times 100$	$\frac{Q}{Q_0} \times 100$	$\frac{N}{N_0} - 1$	$\frac{Q}{Q_0} - 1$	x^2	y^2	xy	$\frac{Q'}{Q_0}$	$\frac{Q''}{Q_0}$	$\frac{Q}{Q_0}$	
1910-11	212	218	112	118	12.544	13.924	13.216	217,6	-0,40		$R = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} = 0,95$ $\frac{\sum xy}{\sum x^2} = 1,04$ $\frac{\sum y^2}{\sum xy} = 1,15$ $\frac{\sum y }{\sum x } = 1,09$ $\sqrt{\frac{\sum y^2}{\sum x^2}} = 1,09$ $\frac{Q'}{Q_0} = 1,05 \frac{N}{N_0} - 0,05$ $E_0 = 42,4\% \quad E = 12,4\%$ $r = 1 - \frac{148,7}{509,0} = 0,71$
11-12	62	81	-38	-19	1.444	361	722	60,1	-20,90		
12-13	72	87	-28	-13	784	169	364	70,6	-16,40		
13-14	192	191	92	91	8464	8.281	8.372	196,6	5,60		
14-15	110	114	10	14	100	196	140	110,5	-3,50		
15-16	171	180	71	80	5.041	6.400	5.680	174,55	-5,45		
16-17	137	139	37	39	1.369	1.521	1.453	138,85	-0,15		
17-18	82	78	-18	-22	324	484	396	81,1	3,10		
18-19	111	123	11	23	121	529	253	111,55	-11,45		
19-20	77	70	-23	-30	529	900	690	75,85	5,85		
20-21	130	102	30	2	900	4	60	131,5	29,50		
21-22	162	160	62	60	3.844	3.600	3.720	165,1	5,10		
22-23	100	111	0	11	-	121	-	100	-11,00		
23-24	43	23	-57	-77	3.249	5.929	4.389	40,15	17,15		
24-25	65	80	-35	-20	1.225	400	700	63,25	-16,75		
25-26	46	53	-54	-47	2.916	2.209	2.538	43,3	-9,70		
26-27	116	156	16	56	256	3.136	896	116,8	-39,20		
27-28	73	70	-27	-30	729	900	810	71,65	1,65		
28-29	60	53	-40	-47	1.600	2.209	1.880	58,0	5,00		
29-30	64	76	-36	-24	1.296	576	864	62,2	-13,80		
30-31	47	28	-53	-72	2.809	5.184	3.816	44,35	16,35		
31-32	128	115	28	15	784	225	420	129,4	14,40		
32-33	91	63	-9	-37	81	1.369	333	90,55	27,55		
33-34	49	29	-51	-71	2.601	5.041	3.621	46,45	17,45		
	2.400	2.400	469	509	53.010	63.668	55.333	2400	148,7		
			-469	-509					-148,7		

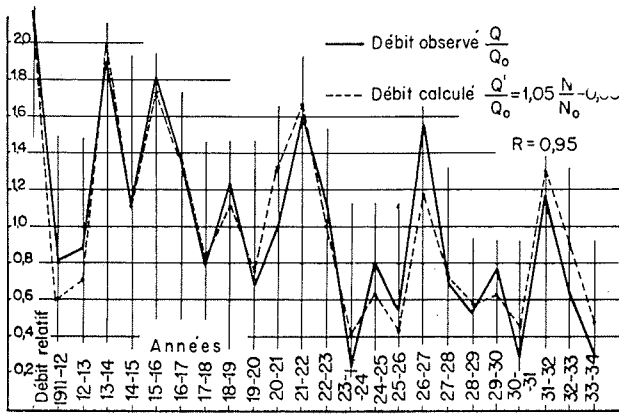


Fig. 1

— **Coefficient de corrélation** : il est très élevé : $R = 0,95$. Les 4 valeurs du rapport λ déterminées comme il a été dit ailleurs sont très voisines : 1,04 — 1,15 — 1,09 — 1,09 (1).

— **Formule de corrélation et de prévision.** — En prenant $\lambda = 1,05$, cette formule est $\frac{Q}{Q_0} - 1 = 1,05 \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right)$, très voisine de la formule $\frac{Q}{Q_0} = \frac{N}{N_0}$ correspondant à $\lambda = 1$, dont on peut se contenter.

— **Variabilité de la niviosité.** — Elle est très grande, l'écart moyen étant $E' = \frac{938}{24} = 39,1$.

— **Variabilité de l'Hydraulicité.** — Elle est très forte également en conséquence. L'écart moyen est $E_0 = \frac{1018}{24} = 42,4 \%$.

— **Rendement de la corrélation.** — L'écart moyen étant $E = \frac{297,4}{24} = 12,4 \%$, le rendement de la corrélation est :

$$r = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - \frac{12,4}{42,4} = 71 \%$$

L'écart moyen de prévision, soit $E = 12,4 \%$ peut paraître élevé, eu égard à la valeur élevée du coefficient de corrélation $R = 0,95$. Mais il s'agit d'un bassin dont le débit nival saisonnier est très variable ($E_0 = 42,4 \%$) : valeurs extrêmes 2,18 et 0,23 (valeurs extrêmes de la niviosité 2,12 et 0,43).

Nous n'avons pas, dans nos Alpes, des bassins dont la niviosité et l'hydraulicité nivale varient entre des limites pareilles.

Une valeur élevée de R ou de r n'entraîne pas nécessairement un faible écart de prévision ; on

a ici $R = 0,95$ et $E = 12,4 \%$. Cet écart est à comparer, pour apprécier l'utilité de la prévision à l'écart de probabilité $E_0 = 42,4$ et cette comparaison conduit à $r = 71 \%$, qui dénote un degré élevé de corrélation et de prévision.

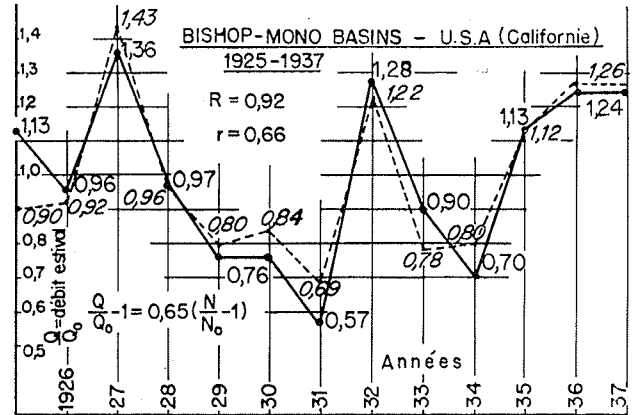


Fig. II

2. — **Bishop - Monobasins - U. S. A., Californie.** — Figure II. — Il s'agit d'un ensemble de quatre bassins de haute montagne, situés sur le parallèle de San-Francisco, alimentant 4 réservoirs (altitudes: 9.000, 9.800, 9.400, 7.700 pieds) utilisés à la production d'énergie électrique. La prévision est basée sur le relevé, au moyen de récepteurs, des précipitations totales hivernales (N), le débit étant celui de la période estivale suivante (période non précisée).

Les récepteurs ont cinq pieds de profondeur, et une section d'un pied carré. On mesure le contenu tous les quinze jours, à partir du 1^{er} septembre.

Les données statistiques dont nous avons fait état, sont tirées d'un graphique (**Catchcan measurements meet-power forecastings requirements in Bishop-monobasins**, par G. WILLS — **Reports and Papers, Snow-survey Conference** — Davis 1938).

La corrélation est forte, comme dans l'exemple précédent. On a $R = 0,92$ et $r = 0,66$, les écarts moyens de probabilité et de corrélation étant 21,2 % et 7,2 %. Les débits sont prévus avec une erreur moyenne de 7,2 %, une erreur probable de 5,9 %.

Voici par exemple, les résultats de la prévision pour 1936 :

Bassins	Débit prévu	Débit observé
BISHOP CREEK	73.800	65.600
RUSH CREEK	46.000	40.100
LEEVINING CREEK	48.200	51.600
MILL CREEK	20.800	24.300
	188.200	181.600
	(acre feet)	

(1) Voir notre premier article paru dans le numéro de mai-juin 1948.

La production électrique pronostiquée était de 300 millions de kWh. Elle a été effectivement de 302 millions.

Cet exemple montre l'efficacité des prévisions dans le cas de bassins très élevés (altitude supérieure à 2.500 m.) comme ceux envisagés ici.

3. — Owens River - Californie. — Figure III. — Référence : Snow Surveying in the High Sierra — Association intern. d'Hydrologie scientifique — Commission des Neiges et Glaciers, Congrès d'Edimbourg — 1936 —

Le graphique montre l'excellence des résultats obtenus. Il s'agit, comme dans le cas précédent, d'un bassin de haute montagne, dans la même région, mais sur le versant de l'Océan Pacifique, les bassins de l'exemple ci-dessus étant situés sur l'autre versant.

On a $R = 0,98$ et

$$r = 0,78 \text{ et } \frac{Q}{Q_0} - 1 = 0,7 \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right)$$

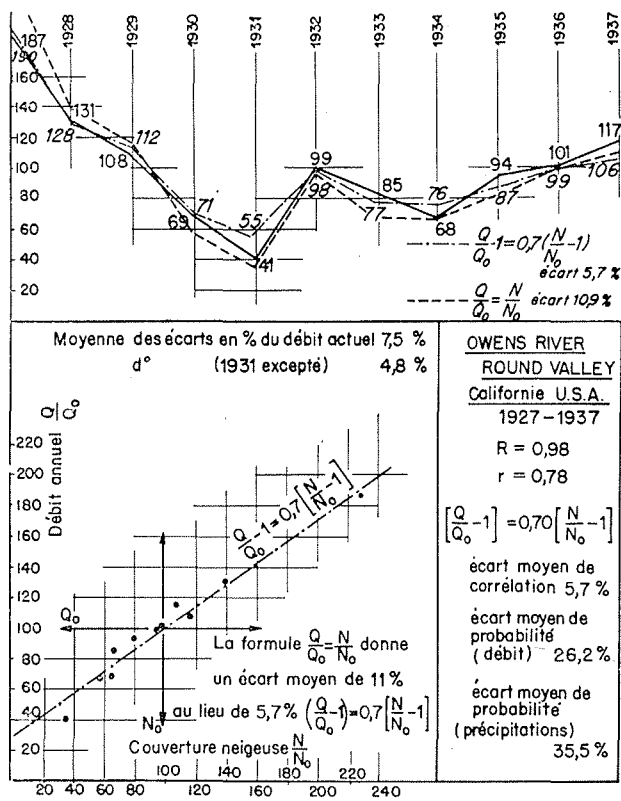


Fig. III

L'auteur a interprété les observations qui portent sur 11 années au moyen de la formule $\frac{Q}{Q_0} = \frac{N}{N_0}$ beaucoup moins exacte ($\lambda = 1$).

Ecart moyen de corrélation $\lambda = 0,7$ 5,7 % (en % du débit moyen).

$\lambda = 1,0$ 10,9 %

Ecart moyen de corrélation $\lambda = 0,7$ 7,5 % (en % du débit actuel).

$\lambda = 1,0$ 10,0 %

Cet exemple illustre la remarque que nous avons faite relativement à la valeur de λ qui n'est pas nécessairement égale à l'unité.

L'article analysé ne dit pas comment N a été observé (vraisemblablement par sondage des champs de neige).

4. — Skagit River - U.S.A., Etat de Washington. — Montagnes Rocheuses. — Figure IV. — Référence : Winter precipitations versus snow-survey for forecasting on Skagit River — Reports and Papers — Snow-Survey — Conference Davis 1938 —

Le bassin de la Skagit-River est situé dans les Montagnes Rocheuses, entre les parallèles 48°-49° Lat. Nord. Il a 2.850 km² à l'emplacement du barrage du Diable, utilisé à des fins hydro-électriques. Le cours d'eau se jette dans l'Océan Pacifique, en face de l'île de Vancouver.

Le régime pluviométrique et le régime d'écoulement se résument ainsi :

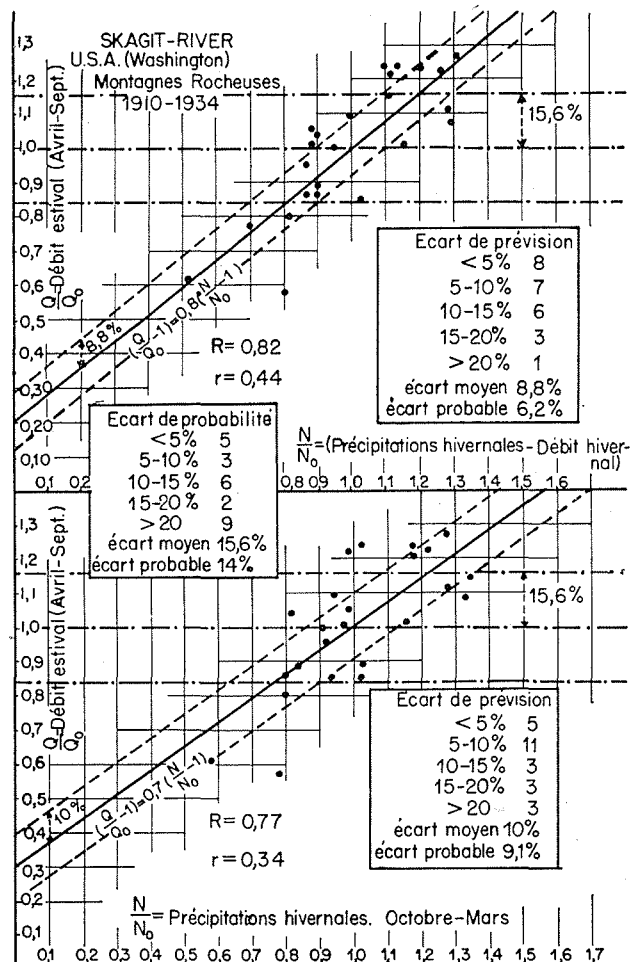


Fig. IV

Avril-septembre : Précipitations 383 mm. ; débit 936 mm.

Octobre-mars : Précipitations 1.517 mm. ; débit 354 mm.

Année : Précipitations 1.900 mm. ; débit 1.290 mm.

L'étude comparative porte sur les précipitations totales **octobre-mars** (N) et les débits **avril-septembre** (Q) observés pendant **25 années**.

Nous n'avons pas trouvé d'indication concernant l'altitude moyenne du bassin, mais elle doit être assez élevée, à en juger par les chiffres ci-dessus, et l'établissement du bilan hydrologique de l'année moyenne conduit à une capacité de rétention au 1^{er} avril de 1.000 mm. : les précipitations estivales ne représentent que 38 % de cette capacité (pour le Drac au Sautet, dans les Alpes Françaises, ce taux est de 130 %).

Malgré ces conditions hydrométéorologiques favorables, les résultats en matière de corrélation et de prévision **sont plutôt médiocres** comme le montre la dispersion des points d'observation. Aussi bien, par rapport au **Trucke River Basin**, la variabilité périodique des précipitations hivernales et par suite des débits estivaux est beaucoup plus faible :

Valeurs extrêmes des nivosités ($\frac{N}{N_0}$) : 1,34 et 0,58, écart moyen 17,0.

Valeurs extrêmes des hydraulicités estivales : 1,27 et 0,57, écart moyen : 15,6, en sorte que le rendement de la formule de corrélation :

$$\frac{Q}{Q_0} - 1 = 0,7 \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right)$$

correspondant à $R = 0,77$, n'est que de $1 - \frac{10,0}{15,6} = 0,34$ (en considérant les écarts moyens)

et de $1 - \frac{9,1}{14,0} = 0,35$ (en considérant les écarts probables).

Ces résultats sont quelque peu améliorés, mais pas beaucoup, si l'on prend comme facteur-témoin $N' = N - q$, soit les **précipitations hivernales diminuées du débit hivernal**.

On a dans ces conditions :

— **Coefficient de corrélation** : 0,82

— **Formule de corrélation** :

$$\frac{Q}{Q_0} - 1 = 0,80 \left(\frac{N'}{N'_0} - 1 \right)$$

— **Ecart moyen de prévision** : 8,8 %.

— **Ecart probable de prévision** : 6,2 %

— **Rendement de la corrélation** :

$$r = 1 - \frac{8,8}{15,6} = 0,44 \text{ ou}$$

$$r = 1 - \frac{6,2}{14,0} = 0,56 \text{ suivant}$$

qu'on considère l'écart moyen ou l'écart probable.

On rapprochera utilement ces résultats de ceux relatifs au **Trucke River Basin**. Malgré une corrélation plus faible ($R = 0,82$ au lieu de 0,95) l'écart moyen de prévision est plus faible (8,8 au lieu de 12,4) ce qui résulte d'une variabilité pluviométrique plus faible (écart moyen 17,0 % au lieu de 39,1 %).

5. — St-Mary River - Montana (U.S.A.) et Alberta (Canada). — Figure V. — Référence : **Association internationale d'Hydrologie Scientifique. Commission des Neiges et Glaciers - Congrès d'Edimbourg 1936.**

Ce bassin est situé à la limite des Etats de **Montana** (U.S.A.) et **Alberta** sur le versant nord-est des Montagnes Rocheuses. Une convention internationale entre les deux pays règle le partage des eaux entre eux, ces eaux s'écoulant en conséquence partie vers la baie d'Hudson, partie dans le bassin supérieur du Missouri.

Sa superficie est de 720 km², qui se décompose comme suit :

Altitude < 5.000	—	25 %
— 5.000-6.000	—	31 %
— 6.000-7.000	—	23 %
— 7.000-8.000	—	16 %
— > 8.000	—	5 %

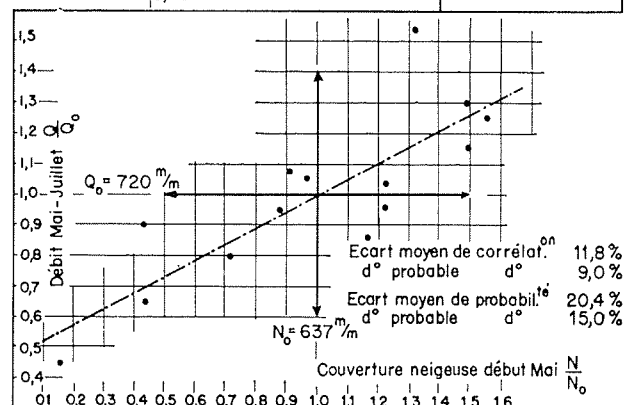
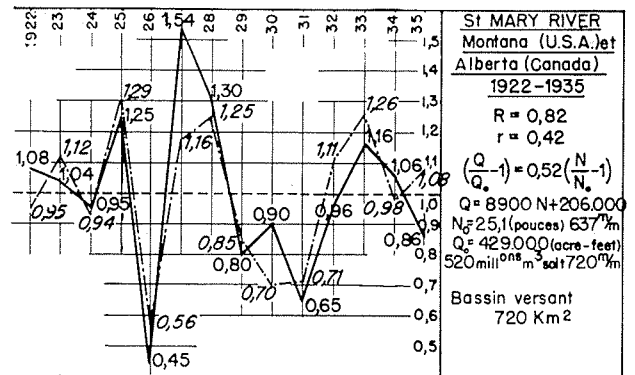


Fig. V

L'altitude moyenne est donc d'environ 6.000 pieds, soit 1.800 mètres environ. Elle est du même ordre que celles du Dorinet de Belleville et du Drac au Sautet, dont nous parlerons plus loin, mais la région est beaucoup plus froide.

Les opérations et observations concernant le contrôle de la neige (Snow-surveying) datent du printemps 1922.

Elles consistent essentiellement en des courses de neige (**snow courses**) au nombre de 7, effectuées les premiers jours de mai, au cours desquelles on procède aux opérations de forage et de pesée, suivant la méthode dite « de la Sierra Nevada » du Dr CHURCH. On en déduit la densité de la neige et son équivalent en eau, pour chaque relevé, et on en prend la moyenne. Cette **moyenne constitue le facteur-témoin de l'enneigement** (N) utilisé dans les prévisions.

Les résultats qui portent sur 14 années (1922-1935) sont illustrés par les 2 graphiques de la figure V.

La formule de corrélation est

$$\frac{Q}{Q_0} - 1 = 0,52 \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right)$$

— On notera en passant cette faible valeur du coefficient λ , soit 0,52, très différente de l'unité — avec $Q_0 = 720$ mm. (débit de mai-juin-juillet) et $N_0 = 637$ (couverture neigeuse au début de mai).

On comparera ces données moyennes avec les données correspondantes du Drac au Sautet

$$(Q_0 = 443 \text{ mm} - N_0 = 300 \text{ mm}).$$

On a :

$$\frac{Q_0}{N_0} = 1,13 \quad \frac{Q}{N} = 1,48$$

Cette différence s'explique par le fait que les pluies qui accompagnent la fusion nivale sont plus abondantes dans les Alpes.

Le résultat obtenu — étant donnés les moyens mis en œuvre, la multiplicité et la précision des observations nivométriques directes — **est plutôt médiocre** : $R = 0,82$ et $r = 0,42$.

Il est du même ordre que ceux que nous avons obtenus en comparant les débits de quelques bassins des Alpes, en mai-juin et juillet, avec les précipitations de **Lyon** (La Romanche $R = 0,79$ - Le Drac = $0,79$ - La Bissorte $R = 0,86$).

On peut se demander, dans ces conditions, si l'on n'aurait pas obtenu, dans le cas considéré, des prévisions aussi satisfaisantes, en faisant état des données pluviométriques, obtenues par les moyens et dispositifs habituels, d'une seule station du Bassin, au lieu d'avoir recours à de si multiples opérations essentiellement coûteuses sur les champs de neige.

6. — **Humboldt Basin - U.S.A. - Nevada.** — Mentionnons, avant de quitter l'Amérique, ce bassin soumis à un régime plus continental que les précédents : les moyennes saisonnières (6 stations : 1918 à 1930) donnent pour l'été 97 mm. et pour l'hiver 160 mm.

De ce fait, et surtout par suite de **conditions géographiques et climatiques particulières** (faiblesse des précipitations, nature alluvionnaire du lit, sinuosités du cours d'eau, nombreux détournements d'eau en amont des stations de jaugeage), les prévisions de débit sont beaucoup moins précises et plus aléatoires.

Entre les précipitations novembre-février et les débits mars-juillet, la corrélation est faible

$$(R = 0,60 \text{ et } r = 0,25).$$

Pour l'améliorer, il faudrait considérer d'autres facteurs que le seul facteur de nivosité hivernale N.

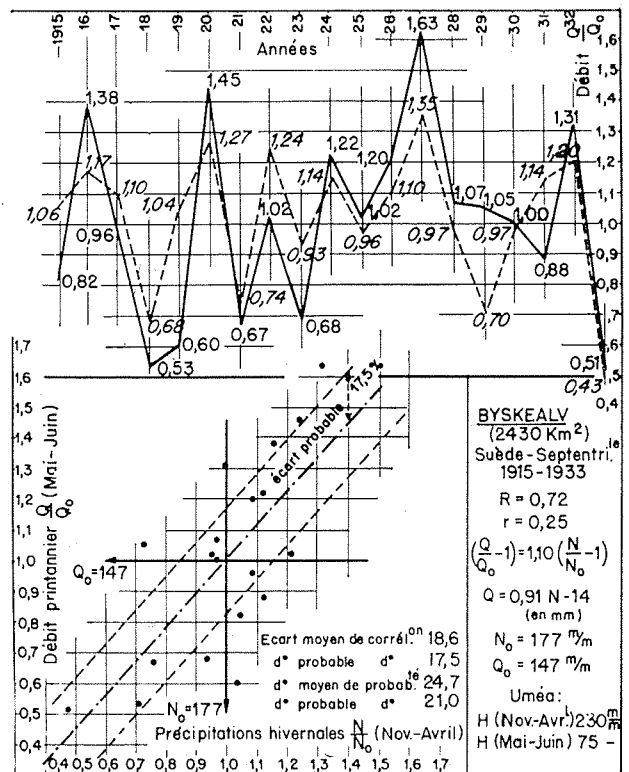


Fig. VI

7. — **Suède septentrionale.** — Figures VI et VII. - Tableau B. - Référence: **Forecasting Spring Run-off of the Forest Rivers in north Sweden** — Association Internationale d'Hydrologie scientifique — Commission des Neiges et Glaciers — Congrès d'Edimbourg — 1936.

L'auteur de cette communication expose les résultats obtenus en comparant les débits printaniers de fusion (mai-juin), d'une part avec les précipitations hivernales proprement dites (novembre-avril) et d'autre part avec ces précipita-

tions augmentées des précipitations liquides estivales accompagnant la fusion et cela pour 6 bassins. Nous les avons résumés dans le tableau B et donnons (figures VI et VII) les graphiques relatifs aux deux bassins du **Byskeälv** et de l'**Oreälv** — pour lesquels les formules de corrélation spécifiques sont :

— **Byskeälv** : $\frac{Q}{Q_0} - 1 = 1,10 \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right)$

R = 0,72 r = 0,25

— **Oreälv** : $\frac{Q}{Q_0} - 1 = 1,70 \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right)$

R = 0,88 r = 0,53.

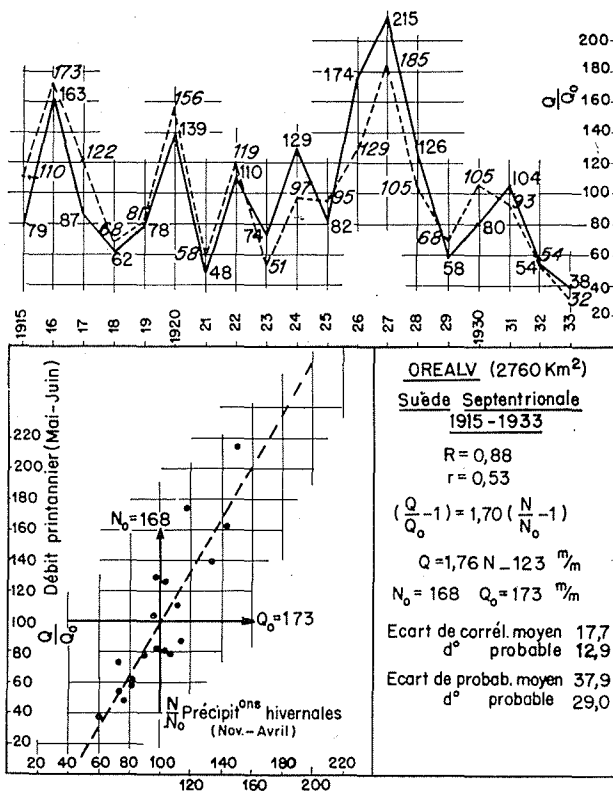


Fig. VII

La corrélation est beaucoup plus forte pour le second que pour le premier, et le coefficient λ plus grand. On rapprochera cette constatation du fait que les **pourcentages des lacs sont assez différents** (6,7 et 2,5 %).

Les précipitations sont notées **par les procédés ordinaires** (pluviomètres et nivomètres) au moment où elles se produisent.

L'auteur estime l'évaporation hivernale, c'est-à-dire subie par la neige au cours de l'hiver (novembre-avril, 6 mois) à 15 %, ce qui correspond à 30 mm., soit 5 mm. par mois (en eau).

Quant au régime pluviométrique, on peut le considérer comme assez semblable à celui de la station voisine **Uméa**, pour laquelle on a : **novembre-avril** : 230 mm. ; **mai-juin** : 75 mm.

Les pluies printanières accompagnant la fusion représenteraient environ **35 % de la rétention nivale**.

ETUDE DE QUELQUES CORRELATIONS NIVO-FLUVIALES DANS LES ALPES FRANÇAISES.

Etant donnée l'absence à peu près complète de toute documentation livresque, tant officielle qu'officieuse, à ce sujet, nous ferons état seulement de nos recherches et travaux personnels, qui portent malheureusement sur des statistiques d'une durée beaucoup trop courte et ne comportant aucune donnée nivométrique proprement dite.

Nous avons, tout d'abord, comparé les **précipitations hivernales totales (novembre-mars)** de **Lyon (N)** avec les débits de **mai-juillet (Q)** de trois cours d'eau alpestres, et obtenu les résultats suivants que nous donnons à titre indicatif, pour montrer le parti que l'on peut tirer, en attendant

Tableau B

BASSINS	BYSKEÄLV	OREÄLV	LÖGDEÄLV	GIDEÄLV	MOÄLVEN	HARMANGERSÄN
Superficie Km ²	2430	2760	1210	1590	780	660
% des lacs	6,7%	2,5%	4,3%	5,3%	3,2%	3,6%
Période étudiée	1915-1933	1915-1933	1921-1933	1923-1931	1925-1933	1919-1933
R ₁	0,72	0,88	0,93	0,86	0,86	0,80
R ₂	0,79	0,93	0,95	0,89	0,90	0,92
Formule de corrélation (R ₁)	Q = 0,91 H - 14	Q = 1,76 H - 123	Q = 1,23 N - 77	Q = 0,79 + 10	Q = 0,89 H + 29	Q = 0,68 H + 64
R ₁ = Coefficient de corrélation entre le débit (Mai-Juin) et les précipitations hivernales (Nov.-Avril). R ₂ = Coefficient de corrélation entre le même débit et les précipitations totales tant hivernales que printanières.						

mieux, c'est-à-dire des relevés pluviométriques et nivométriques locaux s'étendant sur une longue période, en prenant comme facteur-témoin de l'enneigement la pluviosité hivernale totale d'une

— **La Bissorte** (1937-1944 = 8 années). — Bassin versant 52 km² - Altitude moyenne 2.500 mètres.

$$R = 0,86 \quad r = 0,51 \quad \frac{Q}{Q_0} - 1 = 0,7 \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right)$$

Plus le bassin est élevé, meilleure est la corrélation, ce qui est normal.

8. — **Le Dorinet de Belleville (Beaufortin)** - (Figure IX - 13,4 km² - Altitude moyenne : 1.800 m.). — Les données statistiques utilisées (précipitations et débits) résultent des observations faites à **Belleville** (alt. 1.270 m.) au pied du **lac de la Girotte** et elles sont relatives à 11 années consécutives (1934-1944).

Malgré certaines incertitudes concernant les débits et les précipitations exacts du bassin, nous avons cherché s'il était possible de trouver une corrélation plus ou moins forte entre l'écoulement avril-juin, soit Q, et les précipitations hivernales octobre-mars de Belleville, soit H (supposées être à peu près celles de tout le bassin), diminuées du débit hivernal correspondant (q), soit N = H - q.

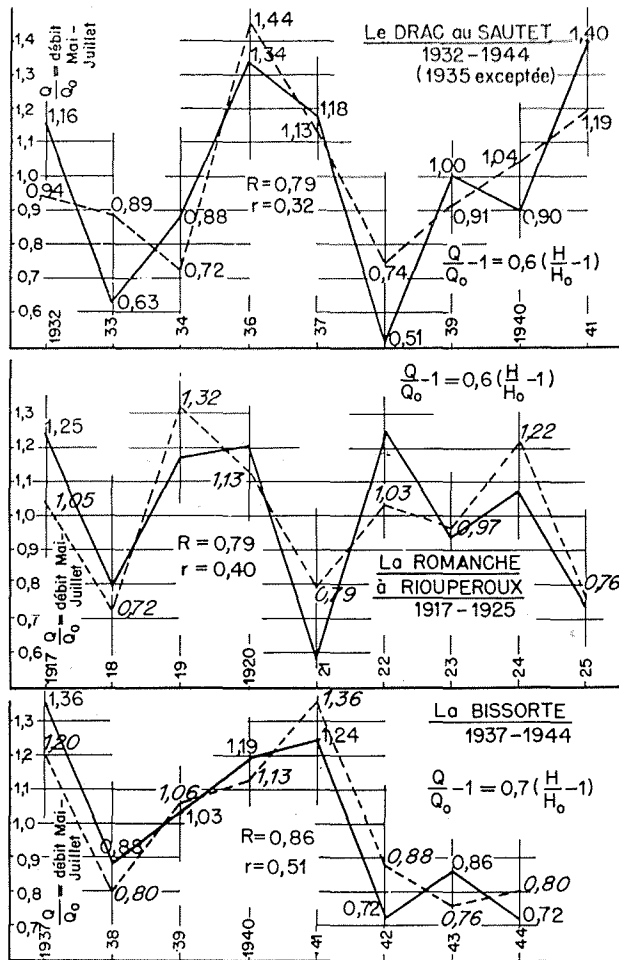


Fig. VIII

station plus ou moins éloignée du bassin. En comparant ces résultats à ceux obtenus par ailleurs, en mettant en œuvre des méthodes plus perfectionnées pour la mesure directe des chutes de neige, on constatera qu'ils sont du même ordre, et à peine inférieurs (figure VIII).

— **La Romanche à Rioupéroux** (1917-1925 = 9 années). — Bassin versant 1.000 km² - altitude de moyenne 2.100 mètres

$$R = 0,79 \quad r = 0,40 \quad \frac{Q}{Q_0} - 1 = 0,6 \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right)$$

— **Le Drac au Sautet** (1932-1941 = 9 années). — Pas d'observations pour 1935, année de remplissage du barrage-réservoir).

Bassin versant 987 km² - Altitude moyenne 1.750 m.

$$R = 0,79 \quad r = 0,32 \quad \frac{Q}{Q_0} - 1 = 0,6 \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right)$$

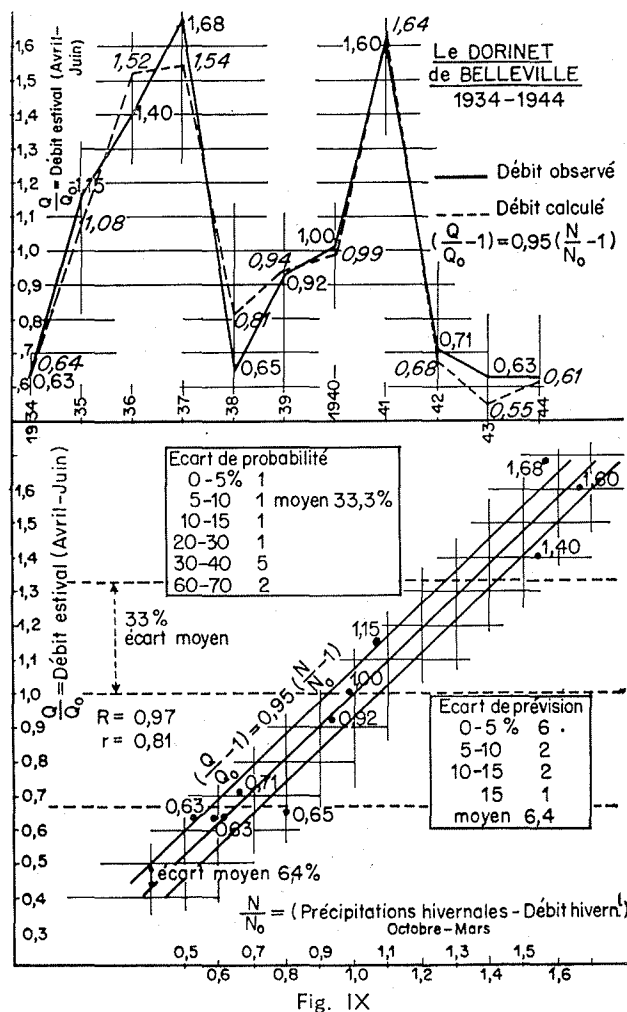


Fig. IX

Le résultat obtenu a été non seulement satisfaisant, mais il nous a même surpris.

Le **coefficient de corrélation** entre Q et N est égal à 0,97 et la formule de corrélation, complétée par son facteur aléatoire déduit de l'écart probable est :

$$\frac{Q}{Q_0} - 1 = 0,95 \left(\frac{N}{N_0} - 1 \right) + \frac{Z}{9,5}$$

L'écart moyen de probabilité étant $E_0 = 33,3$ et l'écart moyen de corrélation étant de 6,4, on en déduit $r = 1 - \frac{6,4}{33,3} = 81 \%$.

Comme écart probable, nous avons admis, non pas celui constaté pendant la période trop courte (3,6), mais 5,0 environ, compte tenu de l'écart moyen 6,4.

Mentionnons que les indices pluviométriques et fluviaux annuels de ce bassin, pour la période considérée, sont 1.705 et 1.352 mm. Le déficit d'écoulement correspondant, soit 353 mm., est vraisemblable mais peut-être sous-estimé, car les précipitations effectives de tout le bassin doivent être supérieures aux 1.705 mm. observés à Belleville.

Quant à la corrélation entre les indices annuels ($R = 0,94$), elle s'exprime par la formule

$$\frac{Q}{Q_0} - 1 = 1,30 \left(\frac{H}{H_0} - 1 \right)$$

déjà mentionnée dans l'un de nos articles précédents.

9. — **Le Drac au Sautet.** — Figure X. — Parmi les nombreuses corrélatons susceptibles d'être envisagées et retenues en vue de prévisions, nous nous contenterons de consigner ici celle qui est basée sur la comparaison des **précipitations totales de la station pluviométrique de Champoléon** (Altitude 1,270 m.) des sept mois octobre-avril et des débits des quatre mois **mai-août**. La station de Champoléon est, en effet, suffisamment représentative, non pas certes, quantitativement, mais qualitativement, comme on peut s'en rendre compte en étudiant l'ensemble de l'année, étude qui donne la formule :

$$\frac{Q}{Q_0} - 1 = 1,40 \left(\frac{H}{H_0} - 1 \right) \text{ avec } R = 0,95.$$

Pour les deux périodes de sept et quatre mois considérées, on a :

Octobre-avril :	Précipitations :	710 mm.
	Débit :	506 mm.
Mai-août :	Précipitations :	391 mm.
	Débit :	496 mm.

La couverture hivernale, au 1^{er} mai, est de l'ordre de 300 mm., d'après le bilan hydrologique, pour l'année moyenne, du bassin.

En comparant ces caractéristiques avec celles du bassin de la **Skagit-River**, par exemple, étudié plus haut, on voit que les précipitations mai-août représentent 130 % de la réserve nivale au 1^{er} mai, contre 38 %. Malgré cette divergence, le coefficient de corrélation, pour le Drac ($R = 0,75$; $r = 0,36$) est du même ordre ($R = 0,77$, $r = 0,34$),

la formule de corrélation linéaire étant

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{N}{N_0} (\lambda = 1).$$

Mais l'examen visuel de la « **stellaire** » des points (Q, N) montre qu'on obtient un groupement meilleur, autour d'une courbe moyenne, en

adoptant une formule telle que $\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{N}{N_0} \right)^{1,5}$

L'écart probable correspondant est de 10 %, et l'écart probable de probabilité étant 0,30, on a en définitive $r = 0,66$. Cet examen montre, en outre, très nettement, que les points **les plus excentriques** correspondent presque toujours aux années dont l'été a été **plus pluvieux** (1941 - 1930 - 1932 - 1939) ou **moins pluvieux** (1936 - 1943) que la normale.

L'influence des pluies d'été constitue, de fait, le facteur **qui trouble le plus la corrélation nivo-fluviale**. On peut préciser ce point comme il suit :

1° En éliminant des 16 années considérées, les quatre années dont la pluviosité estivale s'est le plus écartée de la normale, on obtient, comme coefficient de corrélation, $R = 0,90$ au lieu de $R = 0,75$.

2° En rectifiant le débit estival, compte tenu de l'écart, par rapport à la moyenne, de la précipitation estivale, c'est-à-dire en considérant, au lieu de Q, le débit $(Q + H_0 - H') = Q'$, $H_0 = 391$ mm. étant la précipitation estivale moyenne, et H' la précipitation estivale actuelle, on constate une **corrélation linéaire beaucoup plus forte** que qualifie un coefficient $R = 0,90$, et une zone de dispersion plus réduite comme le montre le graphique supérieur de la figure X. D'où la formule

$$Q = 0,7 N + H' - H_0$$

donnant le débit estival le plus probable (écart moyen 13 %) en fonction des **précipitations N antérieures** et des **précipitations H' actuelles**.

En jumelant les observations deux par deux, par ordre de grandeurs croissantes des précipitations, on obtient même un coefficient de corrélation égal à 0,99, les huit points représentatifs des données expérimentales jumelées esquissant une courbe assez régulière, légèrement **sinusoïdale**.

Une telle allure sinusoïdale de la courbe de corrélation nivo-fluviale, qui se préciserait et s'accroîtrait, si on pouvait observer des hivers à précipitations nulles ou très faibles, et des hivers à précipitations excessivement élevées que l'esprit peut imaginer, mais qui sont, de fait, irréali-

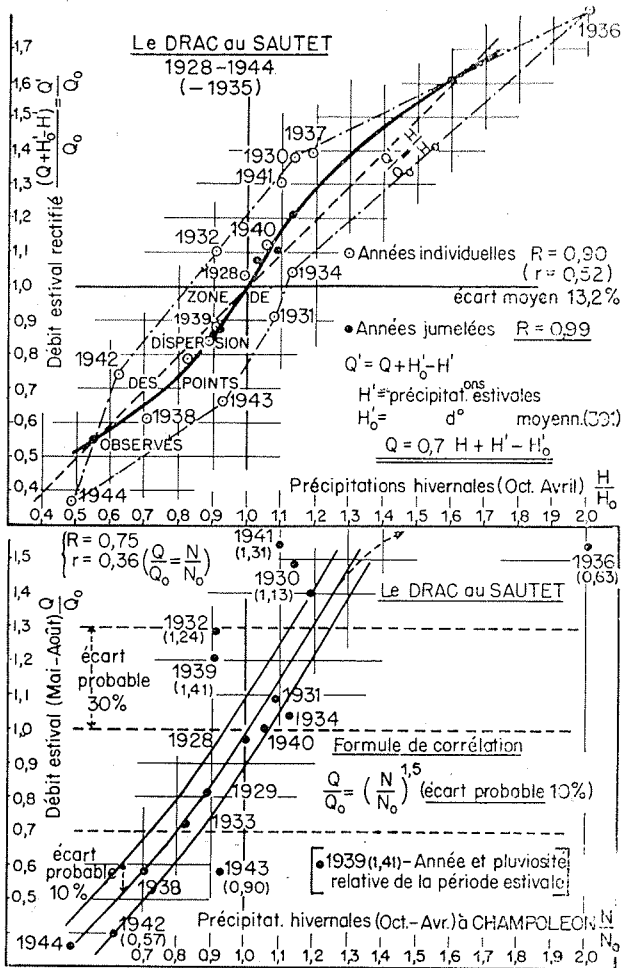


Fig. X

sables, une telle allure, dis-je, doit être retenue comme la plus probable en l'occurrence, l'inflexion de la courbe pour les valeurs élevées de N résultant de l'accroissement des réserves du bassin au détriment du débit actuel, et l'inflexion de la courbe pour les faibles valeurs de N résultant, inversement, de la diminution des réserves du bassin au bénéfice du débit actuel. En d'autres termes, à ses deux extrêmes, la courbe manifeste une tendance à devenir horizontale, nous voulons dire parallèle à l'axe des x.

Mais dans la pratique, on peut se contenter de la corrélation linéaire, en notant que pour les très fortes précipitations, elle surestime les débits, et qu'elle les sous-estime pour les très faibles, du fait de l'interdépendance des années successives.

CONCLUSIONS.

The forecaster has become the indispensable mentor of the state engineer westered, with the task of acting as supreme arbiter of waters.

J. E. CHURCH.

Que dirons-nous, en guise de conclusions à l'exposé qui précède ?

Tout d'abord, que les possibilités de prévisions du débit nival dans les Alpes françaises se présentent dans des conditions aussi favorables qu'ailleurs, malgré que la pluviosité qui accompagne la fusion nivale y soit nettement plus grande que dans certaines autres régions où elles sont plus développées, ces possibilités étant, évidemment, d'autant plus nettes que l'altitude du bassin est plus élevée.

Nous n'avons fait état que de statistiques rudimentaires et de trop courte durée. Certes, on peut escompter des résultats meilleurs d'observations plus nombreuses, plus détaillées, plus localisées, plus spécifiquement nivométriques. Mais étant donné l'aléa résultant de l'incidence, imprévisible, des pluies printanières et estivales concomitantes de la fusion nivale, qui constituent le facteur qui perturbe le plus les prévisions, il ne faut exagérer ni la multiplicité locale, ni la précision des observations nivales ou pluviométriques. Des méthodes de prévision dites directes, et des méthodes dites indirectes, les premières ne sont pas nécessairement les plus efficaces, et ce sont toujours les plus coûteuses.

De ce point de vue, on notera que si chaque bassin a son individualité propre, nuancant dans chaque cas les modalités des prévisions, il existe, entre les débits soit annuels, soit estivaux, des différents bassins d'une même région soumise aux mêmes variations saisonnières et périodiques climatiques - et certains bassins des Alpes réalisent ces conditions - il existe, dis-je, des corrélations ou plutôt des covariations manifestes qui peuvent être mises à profit pour coordonner, amalgamer les recherches et les prévisions qui en résultent. La figure XI montre la corrélation existant, de ce point de vue, entre la Romanche au Chambon, le Drac au Sautet et la Bissorte. Ainsi, entre les débits estivaux du Drac et de la Romanche, le coefficient de corrélation, pour 1939-1944, a été égal à 0,98. Une telle remarque peut légitimer des prévisions communes à plusieurs bassins, étayées sur des covariations fluviales dûment établies et contrôlées, sans qu'il soit nécessaire de multiplier, dans chaque bassin, des observations nivales et autres.

Un autre point de vue est à considérer : il ne faut pas attribuer au facteur nival actuel une

importance **exclusive**. L'amélioration des formules de prévision, en cette matière, doit être recherchée dans la considération d'**autres agents secondaires**. Certains facteurs relatifs à la **réten-tion liquide**, aux **conditions de l'année antérieure**,

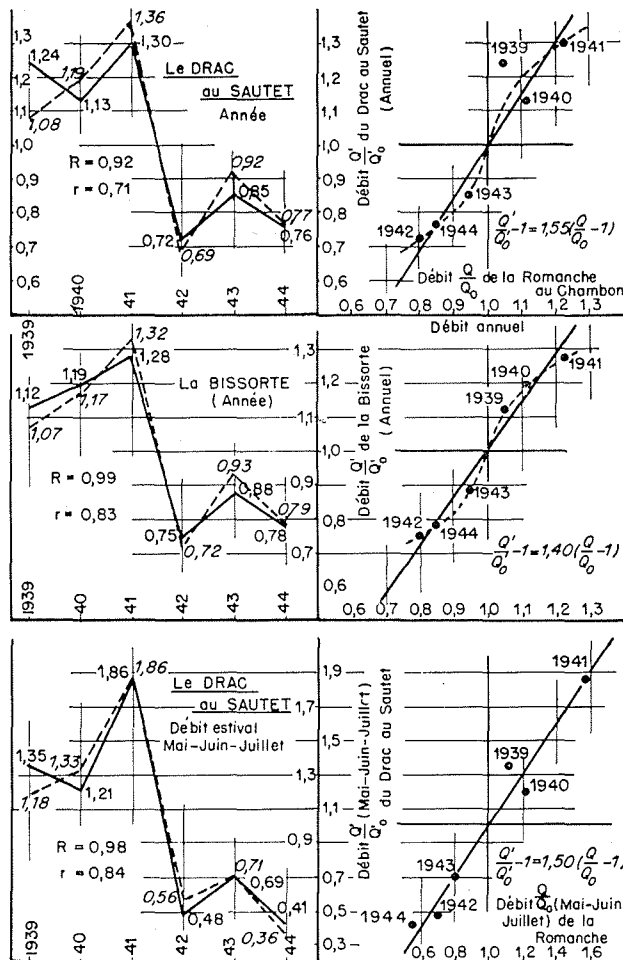


Fig. XI

peuvent jouer un rôle non négligeable. Il peut y avoir report, d'une année à l'autre, d'une partie des réserves nivales, et un été, un automne sec peut réduire l'efficacité fluviale des chutes de neige de l'hiver, en augmentant la quantité d'eau de fusion absorbée par le sol.

Et quelle que soit l'ingéniosité, quel que soit « l'esprit de finesse » dont on fera preuve dans de telles investigations, les possibilités de prévisions précises, non seulement qualitatives, mais quantitatives, seront toujours limitées par l'**imprévisibilité des facteurs météorologiques actuels**, notamment en ce qui concerne leur localisation dans le temps. Si l'on peut prévoir, dans une certaine mesure, le débit total correspondant à la fusion totale des neiges de l'hiver précédent, il est beaucoup plus difficile de prévoir **comment ce débit se répartira entre les différents mois intéressés...** et également l'**époque** à laquelle la fusion intensive commencera : et **cette dernière prévision serait, dans bien des cas, plus utile que la première**. Mais il faudrait pronostiquer la température à venir, et nous n'en sommes pas encore là.

Le besoin de savoir, de prévoir, est un besoin inné de l'homme, que nous ne pouvons jamais satisfaire pleinement. Il ne peut nous mener à la **certitude**, mais il nous en donne, comme un avant-goût, avec **le plaisir de chercher et la joie de connaître**.

D'ailleurs, — et c'est sur cette situation ⁽¹⁾ que nous prenons la fantaisie de terminer, aussi paradoxale qu'elle puisse paraître à la fin d'un article consacré à la recherche de certaines prévisions, mais ne renferme-t-elle pas une leçon de modestie réconfortante plus qu'un aveu d'impuissance. —

« S'il est sage de prévoir et de lutter, parce que nous sommes des hommes, il est sage de ne pas trop prévoir, et de s'abandonner, parce que nous ne sommes que des hommes. **Le hasard fait souvent mieux les choses que les calculs les plus sûrs.**

« Non seulement le monde n'a pas été réglé **mécaniquement** par Dieu, mais il n'a pas été confié à l'homme pour une telle régulation. Le **hasard**, la **contingence**, le **risque** font partie de l'ordre profond de la Création. Ils ont leur dignité, leur fécondité, et ce n'est pas forcément servir l'ordre que de travailler à réduire une poche de contingences. » ⁽¹⁾

(1) Gustave THIBON.