

## QUELQUES REMARQUES SUR L'UTILISATION DES MODÈLES MATHÉMATIQUES POUR LA PRÉVISION EN HYDROLOGIE ET MÉTÉOROLOGIE

par P. GUILLOT

Division Technique Générale, Electricité de France, Grenoble

Avant de présenter quelques remarques plus générales sur l'utilisation des modèles mathématiques pour la prévision, nous allons tenter de résumer les méthodes que nous employons maintenant couramment dans les Services d'exploitation d'E.D.F. pour répondre aux principaux problèmes de prévision quantitative, qui se posent en hydrologie de surface et en météorologie :

- I. — Prévision des étiages;
- II. — Annonce des crues;
- III. — Evaluation de la probabilité des crues exceptionnelles;
- IV. — Prévision des pluies à 24 et 48 heures d'échéance.

### I. — Prévision des étiages

Ce problème, qui est d'actualité vu le grand nombre d'organismes qui s'intéressent à l'évaluation des ressources en eau, se rattache au problème plus général de la prévision des apports mensuels et saisonniers.

La méthode que nous appliquons pour y répondre est celle de la corrélation multiple d'explication du volume des apports. Nous l'avons présentée en 1968 à la Commission d'étude des débits de la S.H.F., (Guillot-Duband, 1968) et nous avons eu l'occasion de l'appliquer à une vingtaine de bassins versants du Massif Central (dont la Loire à Blois et à Gien), des Alpes, des Pyrénées et de la Bretagne (\*) pour lesquels on dispose d'une série de quel-

(\*) La thèse de Rosenberg sur vingt-deux cours d'eau d'Israël montre que cette méthode est encore parfaitement applicable en pays aride, même avec un coefficient d'écoulement de quelques %.

ques dizaines d'années (20 ou 30 ans) de mesures du débit, de la pluie et de la température. Quand on ne dispose pas encore de séries de mesures suffisamment longues, le mieux qu'on puisse faire, en attendant, est d'interpoler par analogie avec les bassins les plus voisins pour lesquels les séries de mesures existent. Il paraît, de toute façon, nécessaire d'avoir quelques années de mesures communes avec ces voisins pour caler les débits d'étiage.

Le tableau I et les graphiques 1 et 2 ci-joints illustrent le principe de la méthode par l'exemple des apports de printemps du Drac.

Le volume d'apport  $E^{(**)}$  étant le résultat de deux groupes de phénomènes indépendants, les conditions initiales  $I$ , les conditions météorologiques  $P$  régnant pendant la période de prévision, on peut :

1. Connaissant  $I$ , graduer les apports futurs en probabilité en utilisant la graduation en probabilité de  $P$ .

Le résidu de l'équation de régression de  $E$  en  $(I, P)$  est en effet par définition indépendant de  $P$  et sa dispersion étant faible devant celle de  $P$ , la fonction de répartition de  $E$  est pratiquement celle de  $I + P$ .

2. Connaissant la fonction de répartition de  $I$  jusqu'au décile inférieur, et celle de  $P$  en dessous du décile inférieur,  $I$  et  $P$  étant deux variables aléatoires indépendantes, on peut calculer la fonction de répartition de  $E$  avec une assez bonne validité jusqu'au centile inférieur.

3. On passe de la fonction de répartition de l'apport triennal à celle du débit minimal décadaire du trimestre, par

(\*\*) En régime pluvial non saturé, on adopte la transformation  $\sqrt{E}$ .

REMULOB 3 DECEMBRE 1967

NB. VAR. ET OBS.  
11 26

DRAC AU SAUTET  
APPORTS AVRIL-AOUT  
Moyenne (M) Ecart type (S)  
des variables. Tableaux  
des coefficients de corrélation.

	$E_4^3$	$P_{10}^3$	$E_{10}^3$	$Q_{10}^1$	$E_9$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$10 \theta_7$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M	528.0	622.3	366.5	34.5	53.2	75.6	90.0	84.0	54.3	158.5
S	168.0	185.5	134.8	53.8	29.3	46.2	41.7	43.1	27.5	12.6

$10 \theta_8$

	11
M	155.0
S	11.1

R

1	1.0000									
2	.7754	1.0000								
3	.3522	.7822	1.0000							
4	.0426	.1000	.2996	1.0000						
5	-.3428	-.1205	.3319	.1739	1.0000					
6	.1069	-.0679	.0133	.2699	-.1396	1.0000				
7	.3449	.1810	.0465	-.3380	-.0421	-.0963	1.0000			
8	.3745	.1146	-.0534	-.2513	-.2219	-.1597	-.0290	1.0000		
9	.2491	.0453	-.0649	.1255	.0605	.0568	-.3133	.2247	1.0000	
10	-.2340	-.0051	-.0584	-.1322	-.1270	-.1415	.1717	-.3561	-.3384	1.0000
11	-.4323	-.2246	-.0650	-.0985	.2666	.0095	.0415	-.2617	-.1745	.3569
11	1.0000									

TABEAU I (première partie)

NOMBRE DE VARIABLES UTILISEES:

5  
ORDRE DE CES 5 VARIABLES  
1 2 3 4 5

	RP	B	T	BR
1				- Ecoulement d'AVRIL à AOUT
2	.8137	1.2717	6.4	1.40 - Précipitation d'OCTOBRE à MARS
3	-.5981	-1.0090	-3.4	-.81 - Ecoulement d'OCTOBRE à MARS
4	.2552	.4131	1.2	.13 - Débit du 1er OCTOBRE
5	.1106	.4136	.5	.07 - Ecoulement de SEPTEMBRE
A= 70.0639				

R2= .7434 R= .8622 SL= 85.0782

NOMBRE DE VARIABLES UTILISEES:

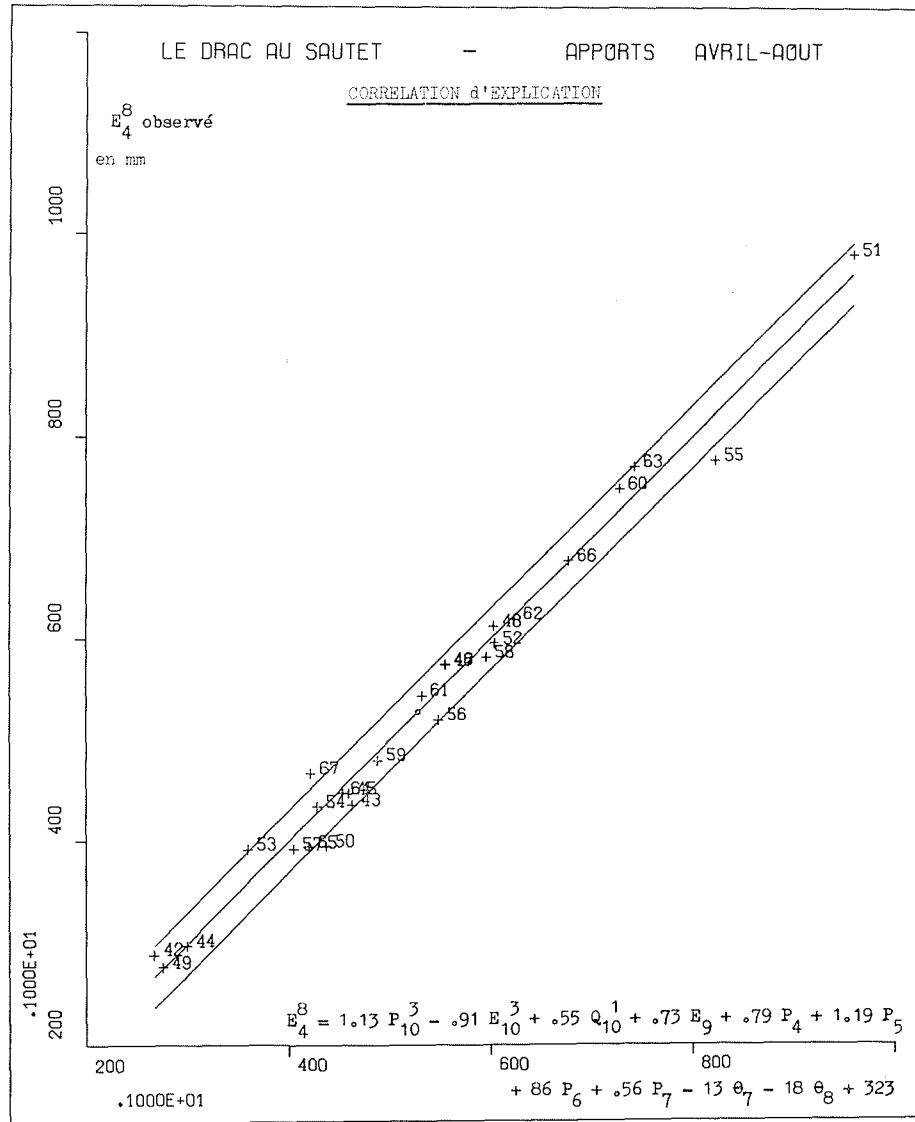
11  
ORDRE DE CES 11 VARIABLES  
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

	RP	B	T	BR
1				- Ecoulement d'AVRIL à AOUT
2	.9647	1.1337	14.2	1.25 - Précipitation d'OCTOBRE à MARS
3	-.8979	-.9148	-7.9	-.73 - Ecoulement d'OCTOBRE à MARS
4	.7205	.5469	4.0	.18 - Débit du 1er OCTOBRE
5	.4884	.7289	2.2	.13 - Ecoulement de SEPTEMBRE
6	.8108	.7907	5.4	.22 - Précipitation d'AVRIL
7	.8770	1.1881	7.1	.29 - Précipitation de MAI
8	.7964	.8584	5.1	.22 - Précipitation de JUIN
9	.4775	.5566	2.1	.09 - Précipitation de JUILLET
10	-.4968	-1.3102	-2.2	-.10 - Température moyenne de JUILLET
11	-.5998	-1.8315	-2.9	-.12 - Température moyenne d'AOUT
A= 322.6823				

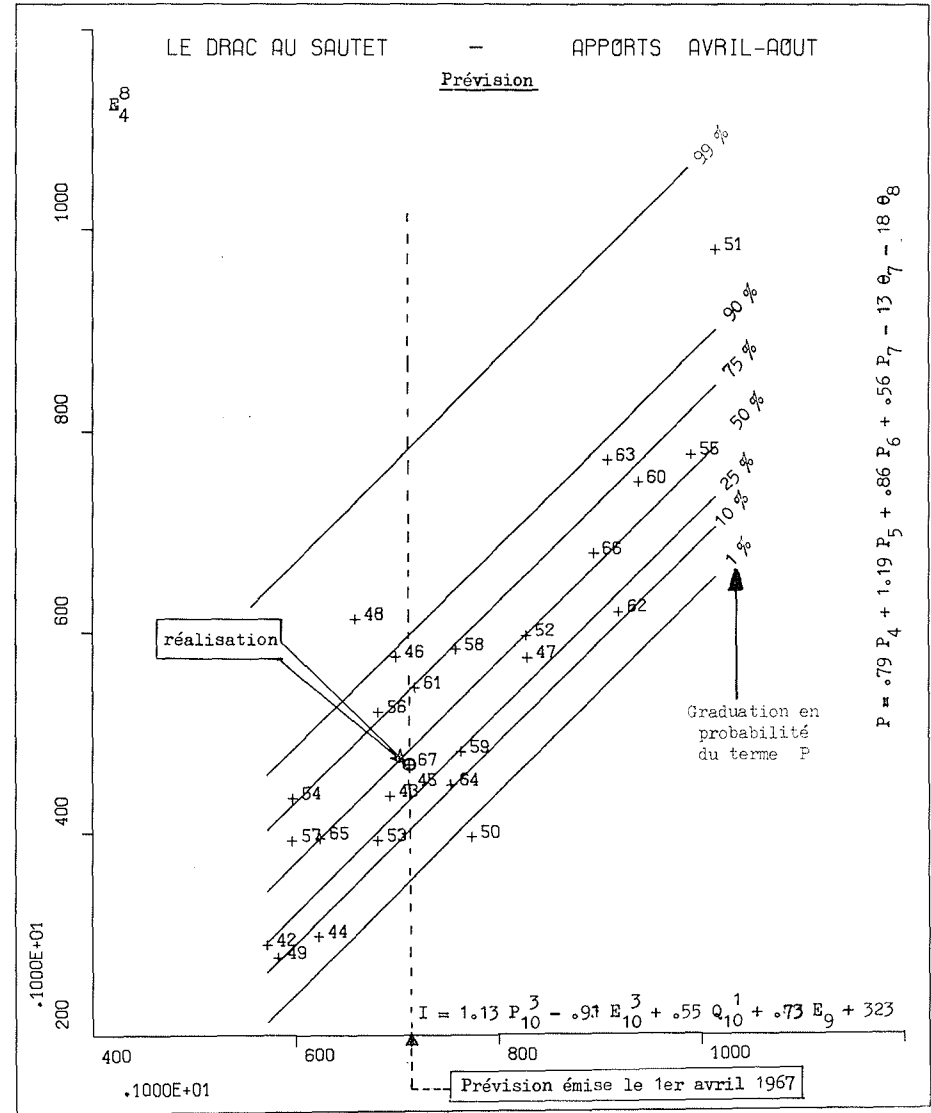
R2= .9691 R= .9844 SL= 29.5390

TABEAU I (deuxième partie)

DRAC AU SAUTET  
APPORTS AVRIL-AOUT  
Résultats du calcul de  
corrélation multiple.



Graphique 1



Graphique 2

leur rapport moyen, les observations montrant que le rapport de ces deux grandeurs, très liées entre elles, est une variatie peu dispersée pratiquement indépendante de la sévérité de l'étiage.

Pour ceux que rebuterait le caractère un peu abstrait de la méthode que nous venons de présenter, nous pensons bon de rappeler que les tentatives faites depuis fort longtemps (Maillet en 1902 n'était sans doute pas le premier, For-kasiewicz et Paloc en 1966 pas les derniers) de s'appuyer sur l'équation des courbes de décrue, considérée comme une loi extrapolable, n'ont jamais abouti à aucun résultat pratique pour la prévision des étiages : la « loi de tarissement » et la décrue « rigoureusement non influencée » n'existent pas plus l'une que l'autre.

En fait — les équations de Boussinesq n'y peuvent rien — il y a une *population* de courbes de tarissement possibles : la vitesse de décrue dépend de l'état initial d'humidité du sol (zone non saturée) et de remplissage des nombreux aquifères du bassin (que le seul débit initial ne suffit généralement pas à caractériser), puis de l'intensité de l'évaporation et des pluies qui surviendront au cours de la saison d'étiage, et dont l'effet dépend lui-même des conditions antérieures. Ainsi l'approche à première vue tentante par la loi de tarissement, ne permet pas d'évaluer l'influence des principaux facteurs sur le débit d'étiage, évaluation qui est pourtant le seul moyen de calculer les apports garantis.

Car il faut aussi rappeler le caractère fallacieux de l'extrapolation jusqu'à l'étiage centenaire d'une « loi de probabilité » seulement ajustée à la distribution du plus bas débit de chaque année. Un exemple édifiant de tels errements est l'article de Gumbel (1963) : l'extrapolation de la « forme limite (du type III) à la distribution du plus faible débit journalier de la série 1869-1956 amène Gumbel à affirmer que le débit du Rhin à Bâle ne peut tomber en dessous de 256 m<sup>3</sup>/s. Manque de chance : il est tombé à 200 m<sup>3</sup>/s en 1858. Aucune théorie n'a jamais justifié l'extrapolation d'une forme limite jusqu'à la queue de la distribution : une forme limite représente, par définition, la partie principale de la loi dans la *zone centrale de la distribution*.

## II. — Annonce des crues

### 2.1 Prévision du débit de pointe de la crue, prévision du volume de la crue.

Nous mettons directement le débit de pointe (ou le volume) en corrélation multiple avec les variables caractérisant l'averse (hauteur, intensité horaire, durée, en un ou plusieurs témoins dans le bassin ou proches du bassin) et les variables caractérisant l'état du terrain (débit initial avant la crue, saison, indice d'enneigement, indice des pluies antérieures, humidité du sol si un jour nous en avons des mesures régulières et représentatives).

Des exemples de ce traitement ont été présentés à diverses reprises à l'A.I.H.S. : Lugiez (1963), et à la Commission d'étude des débits de la S.H.F. : Gard (1964), Guillot-Gard (1968).

### 2.2 Prévision des variations du débit pendant le déroulement de la crue (crues en chaîne ou grand bassin où la crue passe en plusieurs jours).

Dans ce cas nous utilisons la corrélation en chaîne des débits (antérieurs à la station et en amont) et des pluies, avec un pas de temps qui dépend de la taille du bassin :

ex. Gard (1969) avec un pas de 24 h pour le Rhône + Saône à Lyon, Deneau (1970) avec un pas de 6 h pour la Creuse à Eguzon.

Dans ce dernier cas, pour dégager la pondération optimale des pluviomètres malgré les inter-corrélations spatiales élevées, Deneau utilise les composantes principales de la pluie. La qualité des prévisions ainsi obtenues est meilleure que celle d'un modèle déterministe plus compliqué et d'un réglage laborieux.

Nous rappelons les raisons qui nous ont fait renoncer aux méthodes de l'hydrologie déterministe classique.

L'hydrogramme unitaire est, à l'origine, une idée de projeteur, pas de prévisionniste : la notion d'hydrogramme unitaire n'a pas été créée pour servir à la prévision des crues faibles ou moyennes (où le coefficient de « ruissellement » est compris entre 0 et 20 %) mais pour estimer des formes possibles de crues extrêmes, afin de répondre aux problèmes de conception des ouvrages de protection (évacuateurs de crues, digues, etc.).

L'application de l'hydrogramme unitaire comprend trois séries d'hypothèses :

a) *Séparation* des différentes composantes de l'hydrogramme : ruissellement, écoulement hypodermique, débit de base donné par les nappes souterraines.

Cette séparation est largement arbitraire, certains passent sous silence l'écoulement hypodermique; il y a autant de procédés que d'auteurs pour tracer l'hydrogramme du débit de base. Tous essaient de nous rassurer en prétendant que, de toute façon, le ruissellement est la composante essentielle de l'hydrogramme de crue et qu'une grande imprécision sur le débit de base n'a qu'une incidence négligeable sur la prévision de la crue.

C'est peut-être vrai pour les très grandes crues mais pas pour les crues courantes à faible ruissellement.

b) *Prévision du volume de l'hydrogramme*. — Certains hydrologues supputent des coefficients de ruissellement, évoquent des valeurs « formidables » de 50, 60, voir 80 % : cela est peut-être utile pour le projeteur (et encore... nous en reparlerons plus loin), mais laisse plutôt indifférent le prévisionniste qui doit traiter des averses courantes.

D'autres invoquent (en oubliant d'ailleurs qu'une part de l'infiltration peut rejoindre presque aussitôt la rivière) des mesures locales de la capacité d'infiltration, ou encore avancent des estimations assez arbitraires de capacité moyenne d'absorption, mais que l'on est bien incapable de transposer à toute la variété des sols d'un bassin versant, et sous des hyéogrammes dont les variations spatiales sont importantes et mal connues.

Il est bien clair d'ailleurs que la relation entre la pluie et l'écoulement n'est pas linéaire tant que le terrain n'est pas saturé.

c) *Choix de la forme de l'hydrogramme*. — Il ne peut s'agir que d'une forme moyenne, la dispersion étant en fait assez large selon la répartition spatiale de la pluie sur le bassin, et les praticiens de l'hydrogramme unitaire sont toujours étonnamment discrets sur cette dispersion des formes.

A noter que ces trois étapes d'arbitraire ne sont pas indépendantes les unes des autres, le choix d'une règle de répartition des composantes influant par exemple sur la forme de l'hydrogramme et sur le calcul du volume. Pour l'hydrologue chargé de la prévision des crues réelles, il est donc indispensable de couper court à cette accumulation d'arbitraire.

Les prévisions à court terme des débits doivent pouvoir être calculées chaque jour, et spécialement les jours de

crue, selon des procédés objectifs et rapides, sous peine de perdre tout intérêt pratique. L'expérience montre que les procédés de calcul analytique de l'hydrogramme ne répondent guère aux critères ci-dessus : ils font appel à des informations détaillées dont on ne dispose que bien rarement dans la réalité. Les considérations de taux d'infiltration ou de coefficient de ruissellement, qui occupent une si large place dans l'enseignement livresque de l'hydrologie, sont inapplicables dans la pratique quotidienne.

Il ne faut pas perdre de vue que, pour la prévision des débits à court terme, les incertitudes à lever sont, dans l'ordre d'importance, les suivantes :

1. La quantité de pluie qui va tomber dans les heures ou jours qui viennent (nous y reviendrons plus loin, au chapitre IV).

2. La pluie étant connue, la part de cette pluie que le sol va laisser couler. Sur ce point essentiel, les ouvrages d'hydrologie et les fabricants de modèles sont d'une discrétion ou d'une naïveté, qui font bien voir l'inanité de l'approche déterministe en hydrologie.

3. Les temps d'écoulement, c'est-à-dire la forme de l'hydrogramme, ne représentent plus qu'un aléa faible au regard des deux précédents.

Sur ce troisième point relativement mineur, la littérature est néanmoins d'une abondance, et les fabricants de modèles, d'une fécondité telles qu'on a vraiment l'embaras du choix. Là, en effet, les hydrauliciens déterministes sont à leur affaire.

« Route or convolute ? » à la question qu'il pose ainsi, Overton (1970) répond « Route » après Sugawara (1956), qui détient sans doute la palme du jeu des réservoirs, et Lacroix (1961). On montre aisément (Nash, 1957) qu'une cascade de  $n$  réservoirs linéaires a le même rôle qu'une convolution (hydrogramme unitaire) en gamma incomplète  $t^n \cdot e^{-t/n}$ , agréable exercice sur les équations différentielles.

Quant à la propagation à l'aval on peut invoquer Barré de Saint-Venant, opposer les simplifications concurrentes de Muskingum et de Kalinin-Miliukov, Svoboda (1968) montre qu'elles sont équivalentes. Malheureusement, pour l'application de ces exercices d'hydraulique fluviale, il y a des affluents sur lesquels il pleut, et plutôt que de retomber dans de mauvais tâtonnements graphiques, autant calculer complètement de bonnes corrélations avec les niveaux amont et les pluies, comme Belgrand avait commencé à le faire il y a cent ans.

### III. — Evaluation de la probabilité des crues exceptionnelles

Alors que pour la prévision des crues « ordinaires » et des étiages, nous devons nous appuyer uniquement sur les faits mesurés, puisque nous sommes dans les limites, ou à proximité, des débits observés; par contre, pour l'évaluation des crues exceptionnelles, il s'agit d'une extrapolation très loin au-dessus du domaine d'ajustement des équations de régression, et nous ne pouvons pas éviter de faire des hypothèses, qui doivent être logiques et bien définies. Celles qui sont à la base de la méthode du « Gradex » (Guillot-Duband, 1968), sont les suivantes :

1. Au-delà des plus fortes crues observées en quelques dizaines d'années, tout supplément de pluie provoque un supplément égal d'écoulement.

2. La décroissance de fréquence de la pluie (journalière et horaire) est de type exponentiel  $e^{-at}$ ,  $a$  étant appelé « Gradex ».

De ces deux hypothèses découle que la distribution des débits extrêmes s'extrapole parallèlement à celle des pluies extrêmes, si on a pris soin de prendre une unité de temps, commune pour le volume de pluie et pour le volume d'écoulement, qui soit voisine du temps de concentration du bassin versant. La distribution du débit de pointe de crue se déduit par affinité de celle du volume de crue.

Les raisons qui nous ont fait adopter cette méthode globale sont :

- le caractère laborieux, arbitraire et inutile des méthodes déterministes de décomposition de l'hydrogramme, déjà évoquées;
- la faillite des méthodes statistiques d'extrapolation des lois de probabilité ajustées à la distribution des débits extrêmes connus, qui donnent des résultats très divergents d'une loi à l'autre sans qu'on ait aucune raison, sans autre information que les chroniques de débit, de choisir une loi plutôt qu'une autre.

### IV. — Prévision des précipitations à 24 et 48 h d'échéance

La méthode CP-700-sol que nous avons créée (Duband, thèse en préparation) et que nous pratiquons quotidiennement sauf de juin à août, peut être résumée ainsi :

a) Sélection, chaque matin dans un fichier sur disque de 2 000 situations (11 hivers), d'une vingtaine de situations météorologiques analogues, d'après l'altitude du contour 700 millibars à 0 h définie par vingt-cinq radiosondages d'Europe et Atlantique Nord, et caractérisées numériquement par les huit premières composantes principales de ces vingt-cinq niveaux. Le critère d'analogie est la distance dans l'espace des huit composantes.

b) Calcul, en utilisant cet échantillon d'analogues, de la pluie prévue dans chaque bassin versant par l'équation de régression reliant la pluie avec les composantes principales de la pression au sol, et l'épaisseur 1 000-700 mb.

Le traitement sur l'ensemble de calcul ICL 1902 A de la Division Technique Générale à Grenoble prend chaque matin 8 à 10 mn et fournit la pluie prévue au cours des 24 et 48 h à venir, sur quinze bassins versants.

A noter que la méthode CP-700-sol est applicable à la prévision quantitative objective de bien d'autres éléments que la pluie : température, vent, ascendance, etc.

Les raisons qui nous ont décidés à créer cette méthode sont :

a) Le peu d'espoir d'obtenir, à bref délai, des services météorologiques, des prévisions *calculées* des précipitations locales. Depuis douze ans que la prévision numérique des pressions est pratiquée aux U.S.A., les progrès ont été lents par rapport aux prévisions subjectives traditionnelles. En France, le modèle déterministe calculé par la Météorologie nationale ne donnera d'ailleurs que des cartes de pression, à 24 et 48 h, qu'il faudra traduire en pluies locales. Pour ce faire, notre méthode CP-700-sol pourra compléter utilement ces prévisions de pression si elles s'avèrent valables.

b) Les résultats du modèle déterministe, multicouche très évolué du « Weather Bureau » analysés par Andrews

(1970) : dès le délai de 48 h, les écarts à la prévision sont tels que la variance de la 500 mb expliquée par le modèle est à peine le tiers de la variance libre. Andrews suggère que les prévisions soient modifiées en faisant une classification des erreurs par type de temps. Autrement dit, le « Weather Bureau », après douze ans passés avec les moyens qu'on sait à mettre au point un modèle déterministe sur ordinateur, en viendrait à corriger ce modèle en se basant sur l'analogie des types de temps; et, vu l'importance de ces corrections, on peut se demander si elles ne constitueront pas l'essentiel de la prévision et quelle sera l'utilité finale du modèle.

C'est pourtant là l'issue courante des modèles déterministes, alourdis par des hypothèses physiques trop détaillées.

On comprend pourquoi le client sérieux qu'est l' « US NAVY » a décidé de faire ses propres prévisions à moyenne échéance directement par une méthode d'analogie calculée des situations hémisphériques, pratiquée au Fleet numerical Weather Central de Monterey et décrite par Wolf-Thormeyer (1969).

## V. — Remarques générales et conclusion

Par rapport à toutes les autres méthodes d'ajustement ou de « réglage » des modèles, les avantages de la corrélation multiple calculée sont considérables.

C'est la seule méthode qui donne automatiquement et du premier coup, en quelques secondes de calcul avec un ordinateur :

- la sélection des variables explicatives les plus utiles ( $t = b/s_b$ );
- la valeur optimale et sans biais du coefficient de chaque variable;
- la mesure du gain d'information (diminution de variance du résidu) donné par chaque variable, chiffré par son coefficient de corrélation partielle;
- la diminution totale d'incertitude apportée par la prévision, c'est-à-dire son utilité économique, chiffrée par le coefficient de corrélation multiple.

Il y a lieu d'insister sur le fait que le calcul de corrélation multiple est la *seule façon* d'obtenir sans biais les coefficients des variables explicatives dans le cas où ces variables sont liées entre elles, cas qui se présente souvent en hydrologie (ex. : saison, pluies et débits antérieurs). Toutes les méthodes graphiques, comme la méthode des résidus ou des corrélations graphiques en chaîne, sont dans ce cas condamnées à des itérations laborieuses d'une efficacité douteuse.

La publicité faite dans les années 50 par Linsley-Kohler-Paulhus (1958), à la méthode des relations coaxiales a paru séduisante à beaucoup d'hydrologues : nous l'avons nous-mêmes essayée pendant quelques années. Rétrospectivement nous estimons qu'elle est d'une déplorable inefficacité : on peut tourner en rond indéfiniment d'un quadrant à l'autre faute de critère indiquant si l'optimum de l'ajustement est atteint, on peut fort bien conserver inutilement une variable explicative, comme la durée de la pluie, dans la relation averse-crue, faute de pouvoir juger du gain d'information qu'elle apporte réellement.

Mais il y a mieux à présent : les hydrologues du Weather Bureau se servent maintenant de l'ordinateur pour ajuster

les relations coaxiales : Sittner-Schauss et Monro (1969). Faut-il rappeler que le traitement par un ordinateur, si puissant soit-il, n'est pas une garantie de l'optimisation logique d'une modèle mathématique.

L'objection, trop souvent paralysante, de non-linéarité de liaisons n'est pas sérieuse : le calcul de corrélation linéaire reste — pratiquement dans tous les cas — le meilleur moyen de caractériser l'existence et l'intensité des liaisons entre les variables, même quand ces liaisons sont loin d'être linéaires.

L'intérêt primordial du calcul est d'opérer la sélection des variables explicatives. Après quoi, l'examen des graphiques des corrélations est utile pour vérifier que les conditions suivantes sont à peu près réalisées, *dans le domaine observé* :

- linéarité des régressions;
- homoscedasticité, c'est-à-dire largeur à peu près constante de la bande de confiance.

Si les valeurs naturelles des variables ne satisfont pas ces conditions, on s'en rapproche par des transformations simples telles que racine carrée des écoulements mensuels (pour les rivières à régime pluvial dominant) ou logarithme des débits journaliers. Et il est à noter que ces transformations simples suffisent dans la très grande généralité des cas, pour se ramener à des corrélations linéaires homoscedastiques, *au moins dans le domaine utile pour la prévision*.

Même dans le cas où le coefficient de corrélation multiple approche 0,99, l'équation de régression n'a pas d'autre prétention que d'esquisser *la partie principale* du modèle réel des liaisons entre les variables hydrologiques; mais les différents modèles « déterministes » ou « paramétriques » qui commencent à foisonner dans la littérature hydrologique contemporaine, avec les facilités procurées par les ordinateurs représentent-ils mieux le réel ?

Comme le signale A. Régnier (1966), qui est pourtant partisan des modèles « réalistes » en physique fondamentale, les auteurs des modèles ne courent-ils pas le risque de prendre un peu trop leur modèle pour la réalité ? *A fortiori* en hydrologie où l'information est si restreinte devant la complexité du bassin versant le plus simple, tout modèle prétendument physique n'est qu'un schéma à essayer parmi d'autres.

Nous ne croyons pas que les modèles déterministes préconçus soient complètement inutiles, mais leur bon usage est non pas d'en faire des procédés pratiques de prévision, mais d'amener l'hydrologue à se poser des questions sur les liaisons possibles entre les grandeurs, questions auxquelles la seule vraie réponse sera donnée en définitive par le calcul des corrélations entre les mesures représentatives de ces grandeurs : la forme analytique des relations importe finalement beaucoup moins que le choix des variables explicatives.

En fin de compte, on peut se demander si l'hydrologie ne progresse pas plus vite par l'ajustement objectif de modèles linéaires, répété sur tous les bassins pourvus de série de mesures valables et permettant des comparaisons instructives, voire des interpolations, plutôt que par l'application de modèles sophistiqués *a priori*, dont la conception risque fort de varier beaucoup d'un chercheur à l'autre et d'exiger des efforts d'ajustement disproportionnés avec les mesures dont on dispose.

L'abus de modèles « riches » est un indice, et un facteur, de sous-développement : le « modèle suédois », c'est plutôt le bon usage d'un outil, robuste et éprouvé — la corrélation — mais avec du matériel, les données d'observations, dont la qualité est primordiale.



**Jeu des modèles.**

Des cinq modèles ci-après (on peut en inventer bien d'autres), lequel préférez-vous ?

$$y = x - a \text{ th } x/a$$

$$y = x - \frac{2a}{\pi} \arctg \frac{\pi}{2} \frac{x}{a}$$

$$y = (x^n + a^n)^{1/n} - a$$

$$y = x - \frac{ax}{(x^n + a^n)^{1/n}}$$

$$\sqrt{y} = bx + c$$

$x$  = pluie;

$y$  = écoulement;

$a$  = capacité de rétention.

## VI. — Bibliographie

- ANDREWS (J. F.). — Evaluation of 500 millibars Daily and 5 day Mean numerical Predictions. *Monthly Weather Review* (May 70).
- DENEAU (V.). — Schéma stochastique de prévision des débits de la Creuse à Eguzon par tranches de 6 h. *Etude Division Technique Générale* (sept. 1970), Brive.
- DUBAND (D.). — Reconnaissance dynamique de la forme des situations météorologiques. Application à la prévision quantitative de précipitations. Thèse en préparation (1970), Faculté des Sciences, Paris.
- FORKASIEWICZ (J.) et PALOC (H.). — Le régime de tarissement de la Foux de la Vis. Colloque de Dubrovnik (1965), *Publication n° 73 de l'A.I.H.S.*, p. 213.
- GRARD (R.). — La prévision des crues de l'Eyrieux. *S.H.F.*, Commission pour l'étude des débits (décembre 1964).
- GRARD (R.). — La prévision des débits du Rhône à Pierre-Bénite. *S.H.F.*, Commission pour l'étude des débits (octobre 1969).
- GUILLOT (P.) et DUBAND (D.). — La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. *S.H.F.*, 10<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique, Paris, juillet 1968, question 1, rapport 7.
- GUILLOT (P.) et DUBAND (D.). — Evaluation des étiages jusqu'à la valeur « centenaire » grâce aux corrélations « pluies-débits ». *S.H.F.*, Commission pour l'étude des débits (avril 1968).
- GUILLOT (P.) et GRARD (R.). — La prévision des crues de l'Ain à Coiselet. *Bulletin de l'A.I.H.S.*, XIII, 4 (décembre 1968).
- GUMBEL (E. J.). — Statistical Forecast of Droughts. *Bulletin de l'A.I.H.S.* (avril 1963).
- LACROIX (J. C.). — Essai de calcul des hydrogrammes à partir des pluies. Cas de la Corrèze à Brive. *La Houille Blanche*, n° B. 1961. Mémoires et Travaux de la S.H.F. (1961).
- LINSLEY, KOHLER and PAULHUS. — Hydrology for Engineers. *Mc Graw Hill* (1958), p. 173-179 et p. 316-321 sur les « relations co-axiales ».
- LUGIEZ (F.), GUILLOT (P.), PLANCHER (C.) et DURBAND (D.). — La capacité de rétention du sol, problème majeur pour la prévision des débits à court terme d'après les averses. *U.G.G.I.*, Assemblée Générale de Berkeley (1963), *Publication n° 63 de l'A.I.H.S.*
- MAILLET (E.). — Sur la prévision des débits minima des sources de la Vanne. *C.R. Académie des Sciences*, 134 (1902).
- NASH (J. E.). — The form of the instantaneous unit hydrograph. *U.G.G.I.*, Toronto (1967), *Publication n° 45 de l'A.I.H.S.*, p. 114.
- OVERTON (D. E.). — Route or Convolute? *Water Resources Research* (février 1970), p. 43.
- REGNIER (A.). — Les infortunes de la raison. *Editions du Seuil*, Paris (1966).
- ROSENBERG (M.). — Corrélations multiples hydro-pluviométriques des cours d'eau d'Israël. Thèse en préparation (1970), *Laboratoire de Mécanique des Fluides*, Grenoble.
- SITTNER (W. T.), SCHAUSS (C. E.) and MONRO (J. C.). — Continuous hydrograph Synthesis with an API. Type hydrologic model. *Water Resources Research* (October 1969), p. 1007.
- SUGAWARA (M.) and MARUYAMA (F.). — A method of prevision of the river discharge by means of a rainfall model. *Symposia Darcy, Dijon* (1956), *publication n° 42 de l'A.I.H.S.*, p. 71. Voir également une communication du même auteur page 31 du compte rendu du Colloque international d'hydrologie, Fort-Collins (6-8 septembre 1967), publié par *Colorado State University*.
- SVOBODA (A.). — Comparaison des deux méthodes de calcul de propagation des crues. *Vodohospodársky Časopis*, n° 2 (1968), *Institut d'Hydrologie et d'Hydraulique de l'Académie slovaque des Sciences*, Bratislava.
- WOLF and THORMEYER. — Extended Range Analog Forecast program at Fleet numerical Weather Central. Technical note n° 49, *F.N.W.C.*, Monterey, California (September 1969).

## Discussion

Président : M. J. ESTIENNE.

M. le Président remercie M. GUILLOT de son très vivant exposé et rappelle qu'il a été le lauréat du « Prix d'Hydrotechnique 1969 » de la S.H.F., tant en raison des remarquables travaux qu'il a présentés à notre Comité Technique durant cette année que de son rôle d'animateur d'une équipe qui a mis sur pied un véritable « corps de doctrine » dans ce domaine de l'hydrologie.

Il ouvre ensuite la discussion.

M. l'Inspecteur général LARRAS présente quelques intéressantes observations qu'il a résumées comme suit :

« La méthode des courbes de tarissement suppose certaines conditions bien définies (écoulement souterrain à la Dupuit, nappe de faible épaisseur et de très large étendue sur fond horizontal imperméable), et l'exemple de la Loire à Blois montre qu'il existe des cas où la méthode réussit parfaitement.

« Les méthodes de corrélation proposées ne valent que pour des débits d'importance moyenne, dont les répercussions humaines et économiques ne sont pas bien graves; mais elles sont d'un emploi délicat, voire dangereux, dans les cas extrêmes qui concernent la sécurité des populations et des biens. Ces méthodes, dont il serait

excessif de méconnaître l'intérêt doivent donc se limiter pour l'instant à un certain domaine.

« En ce qui concerne les corrélations entre les situations météorologiques et les débits de crue, il y a le danger de prévoir — en raison de l'incertitude sur la prévision à trop longue échéance, une crue dans un bassin alors qu'elle se produira dans un autre (versants Rhône ou Loire de la dorsale qui les sépare), et l'on retrouve là la même différence de préoccupations entre ceux qui s'intéressent aux cas les plus courants, et ceux qui s'intéressent aux cas vraiment exceptionnels. »

M. le Président remercie M. LARRAS et demande à M. FONTAINE de vouloir bien préciser la position de la Météorologie nationale sur les possibilités actuelles de la prévision quantitative des précipitations.

« M. GUILLOT a excellemment parlé de la prévision quantitative des précipitations, répond M. FONTAINE. C'est un problème très important pour les hydrologues. La Météorologie nationale en est parfaitement consciente. On pourrait donc s'étonner que ce service

n'ait pas encore apporté des solutions, plus ou moins approchées, à ce problème, d'autant plus qu'il dispose de moyens puissants de calcul (deux ordinateurs C.D.C. 6400).

« Mais, les voies suivies par la « Division Technique Générale, E.D.F. » et par la Météorologie nationale sont totalement différentes. Ce dernier service s'attache essentiellement, dans une première phase, à développer les méthodes numériques appliquées au problème capital de la prévision générale (altitudes prévues — à des échéances de 24 à 96 h — de différentes surfaces, 700, 500, 300 millibars, etc.). Dans une deuxième phase, il sera vraisemblablement possible, à partir des modèles ainsi établis, d'aborder le problème ardu de la prévision quantitative des précipitations, notamment en prenant en compte les vitesses verticales des masses d'air. C'est la voie suivie par tous les grands services météorologiques étrangers.

« Des résultats exploitables ne pourront certainement pas être obtenus avant un assez long délai. C'est pourquoi la méthode mise au point par M. GUILLOT et ses collaborateurs est certainement efficace. Toutefois, je ne pense pas qu'elle procure des résultats supérieurs à ceux obtenus par le biais des prévisions conventionnelles (analyse isobarique et frontologique). Des résultats « comparables » sont plus vraisemblables, ce qui serait d'ailleurs très encourageant, compte tenu des possibilités d'amélioration du rendement des méthodes numériques et objectives, ce qui n'est pas le cas pour les méthodes conventionnelles dont il semble que l'on ait utilisé dès à présent toutes les possibilités. »

M. FABRET présente les trois observations suivantes sur certains points du mémoire de M. GUILLOT :

1. Le problème de l'annonce des crues ne concerne pas seulement les crues petites et moyennes; les crues importantes qui peuvent être catastrophiques doivent également être étudiées, quel que soit le modèle adopté. C'est ce qui nous a amené à étudier celles-ci sur un modèle réduit où il est possible de simuler les cas extrêmes qu'il est extrêmement rare de pouvoir étudier en détail dans la réalité.

2. Si le gradex des volumes de crue est égal au gradex des pluies, il n'en est pas de même pour les débits. Il y a donc lieu d'apporter une correction à cette hypothèse de base; deux solutions sont possibles :

- a) on affecte le gradex des pluies d'un coefficient correctif;
- b) on adapte le pas de temps de mesure des pluies aux caractéristiques du bassin, mais par quel moyen? (le « temps de base » est une notion très floue et très variable avec les crues).

3. Si les services d'E.D.F. sont des « praticiens », ils ont essentiellement des soucis économiques. Les problèmes posés aux services d'annonce des crues impliquent des responsabilités au moins aussi graves; ces services sont prêts à adopter toute méthode efficace, déterministe ou probabiliste; en fait, tels modèles qui sont loins d'être parfaits, rendent de grands services en pratique. »

M. ROCHE s'est senti quelque peu concerné par certains passages de l'exposé de M. GUILLOT et il tient à faire les mises au point ci-après :

« Je ne pense pas, dit-il, qu'il y ait en France dans le domaine de l'hydrologie, d'un côté des chercheurs purs peu soucieux des possibilités d'application pratique des méthodes qu'ils élaborent et de l'autre côté des ingénieurs que les servitudes de l'exploitation et de l'établissement des projets éloignent de l'évolution des techniques modernes de l'hydrologie. Le service de recherches que je dirige à l'O.R.S.T.O.M. à la charge des prévisions de débit ou de la prédétermination des crues sur des bassins de grande étendue qui posent de difficiles problèmes. Je citerai, à titre d'exemple, l'annonce des crues sur le bassin de la Sanaga au Cameroun, qui englobe 120 000 km<sup>2</sup>; le réseau d'alerte et d'annonce de crues de Tunisie qui a fonctionné remarquablement lors des crues de 1969, etc.

« La querelle entre déterministes et probabilistes nous concerne peu; nous utilisons autant les régressions et les corrélations multiples que les modèles déterministes...; le problème réside dans le choix de la méthode la mieux adaptée au cas particulier traité.

« Je pense comme vous que la question de la non-linéarité des régressions n'est pas très contraignante en pratique. Toutefois, sans aucune difficulté, et sans augmenter pratiquement le temps de calcul à l'ordinateur, on peut, par des changements de variables, obtenir la linéarité des régressions; ces anamorphoses ne sont pas faites au jugé mais d'après l'allure de la courbe de distribution statistique des variables.

« En ce qui concerne les courbes de tarissement, nous ne partageons pas le point de vue que vous avez exprimé peut-être du fait d'une différence de terminologie. Sur de grands bassins africains de plus de 50 000 km<sup>2</sup>, nous avons constaté — au moins trois fois sur quatre — que sur des périodes de cinquante à soixante ans, la courbe de tarissement varie très peu d'une année à l'autre; les

variations constatées ne constituent pas une gêne pour les applications pratiques. Cette invariance ne saurait être générale et ne se rencontrera que rarement dans les vallées du Massif central, des Alpes ou des Pyrénées; si elle existe, elle simplifie beaucoup la solution de certains problèmes et ce serait une faute de ne pas l'utiliser. »

M. DUJARDIN intervient ensuite en ces termes :

« A mon avis, un modèle déterministe n'est exploitable que s'il reste assez schématique et n'explicite que les phénomènes essentiels qui ont un effet prépondérant sur les résultats : équations simples et petit nombre de paramètres.

« Comme le faisait remarquer M. ROCHE, le cycle de l'eau est très complexe et les modèles déterministes schématiques restent généralement fort compliqués : les équations sont difficilement justifiables, le réglage est difficile et les modèles ne sont pas transposables à d'autres bassins. A mon avis, un modèle déterministe n'est justifiable que s'il est extrêmement schématique et presque naïf : équations simples et petit nombre de paramètres. Par exemple, pour un modèle de crue, on peut négliger l'E.T.P. et le niveau des nappes profondes. Nous avons pu ainsi établir un modèle déterministe de crue facilement réglable et transposable d'un bassin à un autre.

« Sur l'initiative de M. GUILLOT, nous avons pu comparer notre modèle déterministe de prévision des crues de la Creuse à Eguzon, au modèle probabiliste fait par la D.T.G. pour le même problème. La méthode des corrélations multiples est très efficace et la précision des résultats est sensiblement la même pour les deux modèles avec un léger avantage au modèle probabiliste dont la formulation est un peu plus pratique pour une utilisation en temps réel. Ceci montre que les deux méthodes probabiliste et déterministe doivent coexister, le choix entre les deux étant fonction des possibilités de réglage et des buts recherchés. »

Sur l'invitation de M. le Président, M. OTIA Hideaki (stagiaire à l'E.N.S.E.I.H.T. à Toulouse) donne les indications suivantes sur l'utilisation des prévisions de pluie au Japon :

« Il n'est pas nécessaire que de connaître la relation entre la pluie à prévoir et la précipitation réelle.

« Pour une prévision de pluie  $z$  donnée, la densité de probabilité de la pluie réelle  $x$  s'écrit :

$$p(x, z) = \text{Pr}(x, z) / \int \text{Pr}(x, z) dx$$

« Pour appliquer cette formule, on utilise une loi de Laplace-Gauss à plusieurs variables pour  $\text{Pr}(x, z)$ , probabilité conjointe de  $x$  et de  $z$ .

« En utilisant les données afférentes au bassin « Kitakami » au Japon, nous avons obtenu une correspondance satisfaisante entre la prévision et l'observation. »

M. le Président invite M. GUILLOT à répondre aux interventions précédentes, ce qu'il fait en ces termes :

« M. LARRAS a signalé que la courbe de tarissement de la Loire était très régulière d'une année à l'autre et que son invariance pouvait être admise en pratique. L'examen des courbes de débit de ce fleuve ne confirme pas ce point de vue; il y a chaque année des épisodes pluvieux imprévisibles qui ôtent au tarissement tout caractère déterministe précis.

« M. ROCHE a dit que pour des bassins de l'ordre de 50 000 km<sup>2</sup>, trois fois sur quatre, la courbe de tarissement était unique même lorsque quelques pluies survenaient. Peut-être pour des bassins de très grande surface, comme celui du Niger, qui approche le million de km<sup>2</sup> cela est-il possible par l'effet d'une certaine compensation statistique. Dans les autres cas, cela reste à démontrer. En tout cas, cela n'est réalisé pour aucun des cours d'eau français que nous connaissons.

« Plusieurs des personnes qui sont intervenues dans la discussion semblent penser que les méthodes statistiques — en particulier, pour la prévision des pluies — n'étaient convenables que pour les services d'exploitation des usines hydroélectriques et non pour l'annonce des crues. Notre méthode de prévisions est, au contraire, établie pour prévoir la pluie des prochaines vingt-quatre heures sur des bassins bien définis, tels que par exemple de la haute Vézère (douze bassins font actuellement l'objet de prévisions de pluie), car elle s'appuie pour chaque bassin sur un échantillon de journées pluvieuses observées dans le passé à cet endroit.

« A M. FABRET, qui déclare adopter pour l'annonce des crues la méthode la plus efficace qu'elle soit déterministe ou probabiliste, je ferai la remarque suivante : un modèle a beau être appelé « déterministe », il entraînera toujours un erreur de prévision dans un sens ou dans l'autre; même, et surtout, s'il y a des risques de pertes de vies humaines, il me paraît indispensable d'évaluer sérieusement le risque d'écart de la réalisation à la prévision.

« M. FONTAINE nous a dit, à juste titre, que les grands services



météorologiques de plusieurs grands pays travaillaient sur des modèles déterministes atmosphériques. Mais, il n'y a pas que les services météorologiques qui s'intéressent aux prévisions; des organismes militaires ou industriels font aussi un effort de réflexion sur ces problèmes: ainsi, la marine américaine a décidé, il y a une dizaine d'années, de travailler sur d'autres méthodes que le modèle numérique déterministe du Weather Bureau parce qu'elle a estimé

qu'il n'y avait guère d'espoir, dans cette voie, de répondre à ses besoins; et elle a pensé qu'il était probablement préférable de travailler par une méthode numérique de recherche de situations analogues du même genre que celle dont j'ai parlé, mais couvrant tout l'hémisphère nord. »

M. le Président clôt la discussion en remerciant tous ceux qui en ont fait un dialogue particulièrement instructif et animé.

## Abstract

### The use of mathematical models for hydrological and weather forecasting

Practical forecasting models applied by "Electricité de France" are described.

The multiple regression computation is applied to the following two types of forecast:

1. Long-term forecasting of runoff volumes and the subsequent evaluation of low-water flows, based on monthly rainfall and temperature.
2. Short-term flood forecasting, based on antecedent daily or hourly rainfall, antecedent runoff and eventually a seasonal parameter.
3. Extreme floods' probability is evaluated by the "Gradex" method, in which extreme daily (or hourly) flow and extreme daily (or hourly) rainfall distributions are extrapolated together, being both assumed to decrease exponentially according to  $e^{-af}$  ( $a$  is called "Gradex").

4. Local daily rainfall is forecast, one and two days ahead, by multiple correlation of rainfall versus pressure at ground level, and 1000-700 mb thickness, inside a sample of analog days, selected by pattern recognition of the 700 millibars level over western Europe-North atlantic.

Graphical correlation methods—including "co-axial relations"—are considered to be subjective and ineffective. The main point in *computing* multiple regression is that it allows rapid selection of the most useful variables for the forecast and the principal part of the natural model to be isolated, even if it is non-linear. A satisfactory linear approximation can be achieved by means of simple transformations. Deterministic models are merely considered to be inventories of links pointing to possible correlations, rather than as representing actual forecasting models. There is nothing to be gained in relying exclusively on over-detailed physical schemes of debatable usefulness: a reliable choice of variables is much more critical than the exact analytical form of the relations.

