Prévisions de débit: exemple: le Rhin à Rheinfelden

Autor(en): **Vischer, Daniel / Jensen, Holger**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **109 (1983)**

Heft 5

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74928

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

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

http://www.e-periodica.ch

Prévisions de débit

Exemple: le Rhin à Rheinfelden[1]

Professeur J.-C. Badoux
EPFL - ICOM
CH - 1015 Lausanne

par Daniel Vischer et Holger Jensen, Zurich

1. Nature des prévisions de débit

Le débit d'un ruisseau ou d'une rivière peut être considéré comme la réaction d'un bassin versant à un ensemble d'événements significatifs à l'égard du débit. L'intervalle de temps qui s'écoule entre ces événements et la survenance du débit peut donc être appelé «temps de réaction». Au moyen des *prévisions de débit*, on tente de prévoir la réaction d'un bassin versant donné. Une telle prévision exige trois phases opératoires:

— observation des événements significatifs;
— calcul du débit correspondant;
— émission de la prévision de débit.

L'*observation* des événements significatifs comprend la mesure de grandeurs hydro-météorologiques, leur transmission et leur exploitation. Elle s'appuie en règle générale sur un réseau de points de mesure installé dans le bassin versant considéré et dans les zones voisines. Le *calcul* du débit correspondant suppose que l'on connaisse avec une précision suffisante la relation entre les événements significatifs et le débit. Cette relation pourra être déterminée par une méthode empirique à partir de valeurs relevées dans le passé (période de référence), en faisant correspondre les séries de mesure. Elle pourra consister en une seule formule mathématique ou en un ensemble de telles formules; on utilise ce que l'on appelle un modèle mathématique, le *modèle de prévision*. L'*émission* de la prévision de débit consiste à retransmettre les résultats des calculs aux Services intéressés. L'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant de la prévision et le moment où se produit le débit pronostiqué, c'est-à-dire le *délai de prévision*, doit être suffisamment long pour permettre à ces Services de prendre les dispositions appropriées. (Dans le cas de la prévision d'une crue, ce délai doit permettre, par exemple, de diffuser des messages d'alerte). Cependant, le délai de prévision ne peut bien évidemment pas être supérieur au temps de réaction du bassin versant, sous déduction du temps nécessaire à la réalisation des trois phases opératoires ci-dessus. On a donc:

$$t_p \leqslant t_R - t_A$$

avec:

t_p = délai de prévision
t_R = temps de réaction du bassin versant
t_A = temps nécessaire aux trois phases opératoires: observation, calcul, édition.

C'est pourquoi il est particulièrement difficile d'élaborer une prévision de débit dans les délais voulus lorsque le temps de réaction est court.
Dans ce qui suit, nous allons montrer, par un exemple concret, comment on établit une prévision de débit. Il s'agit de la prévision à court terme du débit du Rhin à Rheinfelden édité régulièrement par le Laboratoire d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie (VAW) à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich.

2. Le modèle de prévision de débit

A la différence des bassins versants pour lesquels on établit par ailleurs des prévisions de débit, la fraction du bassin versant du Rhin à Rheinfelden responsable des crues, est relativement peu étendue et présente une pente forte. En conséquence, son temps de réaction est bref; c'est ainsi que sur le plateau central les temps de parcours sont en général inférieurs à 18 h. et les augmentations de débit se produisent très souvent partout simultanément. Cette circonstance exerce une triple influence sur le modèle de prévision:

— parmi les grandeurs prises en considération, on utilise des prévisions de précipitations quantitatives. On ne se contente donc pas d'observer les événements significatifs en matière de débit, mais on les prévoit à partir de leurs causes;
— les données disponibles sur les événements significatifs et leurs causes sont traitées à l'optimum à l'aide du modèle de prévision à réseau finement maillé tant à l'égard de l'échelle des temps qu'à celle des espaces;
— le délai de prévision est volontairement réduit, c'est-à-dire limité à 2 jours environ.

2.1 *Structure générale du modèle*

Dans la terminologie hydrologique actuelle, le modèle de prévision de la VAW peut être considéré comme un modèle de bassin fluvial. Il fait l'objet de recherches suivies et il est constamment mis à jour en fonction de l'expérience acquise lors de son utilisation opérationnelle. En l'état actuel de son développement, il présente la structure suivante:
L'ensemble du bassin versant du Rhin à Rheinfelden est subdivisé en bassins élémentaires; en pratique, il correspond un tel bassin à chaque station de jaugeage ou limnimétrique automatique — c'est-à-dire reliée au réseau téléphonique — installée sur le Rhin, un affluent ou un lac. Pour chaque bassin, on élabore une prévision particulière, en commençant par les bassins à l'altitude la plus élevée, c'est-à-dire par ceux qui n'incluent pas eux-mêmes d'autres bassins élémentaires. Cette prévision est établie à partir du modèle de prévision partiel correspondant et elle définit la grandeur influençant le modèle de prévision partiel du bassin élémentaire situé en aval. Les données météorologiques du bassin versant intermédiaire constituent d'autres grandeurs influentes.
La figure 1 représente schématiquement le bassin versant avec son réseau hydrographique. Grâce à leur capacité de rétention, les lacs péri-alpins subdivisent ce bassin nettement en une région alpine et une autre région, située sur le plateau central, de caractère non alpin.

2.2 *Prévision des débits collectés par les lacs péri-alpins*

Dans la région alpine, la *fonte des neiges* joue naturellement un rôle essentiel. Elle est introduite dans le modèle de prévision partielle relatif à un lac sous la forme d'une grandeur «fonte des neiges» calculée par la relation suivante (cf. fig. 2):

$$S = \int_{H_S}^{H_N} f(h)\, T^+(h)\, \mathrm{d}h$$

avec:

S = grandeur «fonte des neiges»
$f(h)$ = surface infinitésimale du bassin versant élémentaire à l'altitude «h»; dérivée de la fonction hypsographique
$T^+(h)$ = moyenne positive des températures de l'air à l'altitude «h»
H_S = altitude de la limite temporaire d'enneigement
H_N = altitude de l'isotherme 0°.

On admet ainsi que la limite d'enneigement ainsi que l'isotherme zéro degré se situent sur une ligne de niveau. La limite temporaire d'enneigement est définie à partir des données d'enneigement fournies par 19 stations, dont on sélectionne les indications de 2 stations en haute altitude plus celles des 4 stations les moins élevées encore enneigées. On en déduit une loi d'enneigement que l'on suppose linéaire en fonction de l'altitude, donnant également l'altitude de la limite temporaire d'enneigement.

[1] Complément à l'exposé fait par M. Vischer lors du colloque sur «L'acquisition de données hydrologiques en Suisse» tenu à Krattigen les 8-9 novembre 1979.
Traduction par M. G. Metz, Electricité de France, groupe régional de production hydraulique «Rhin».

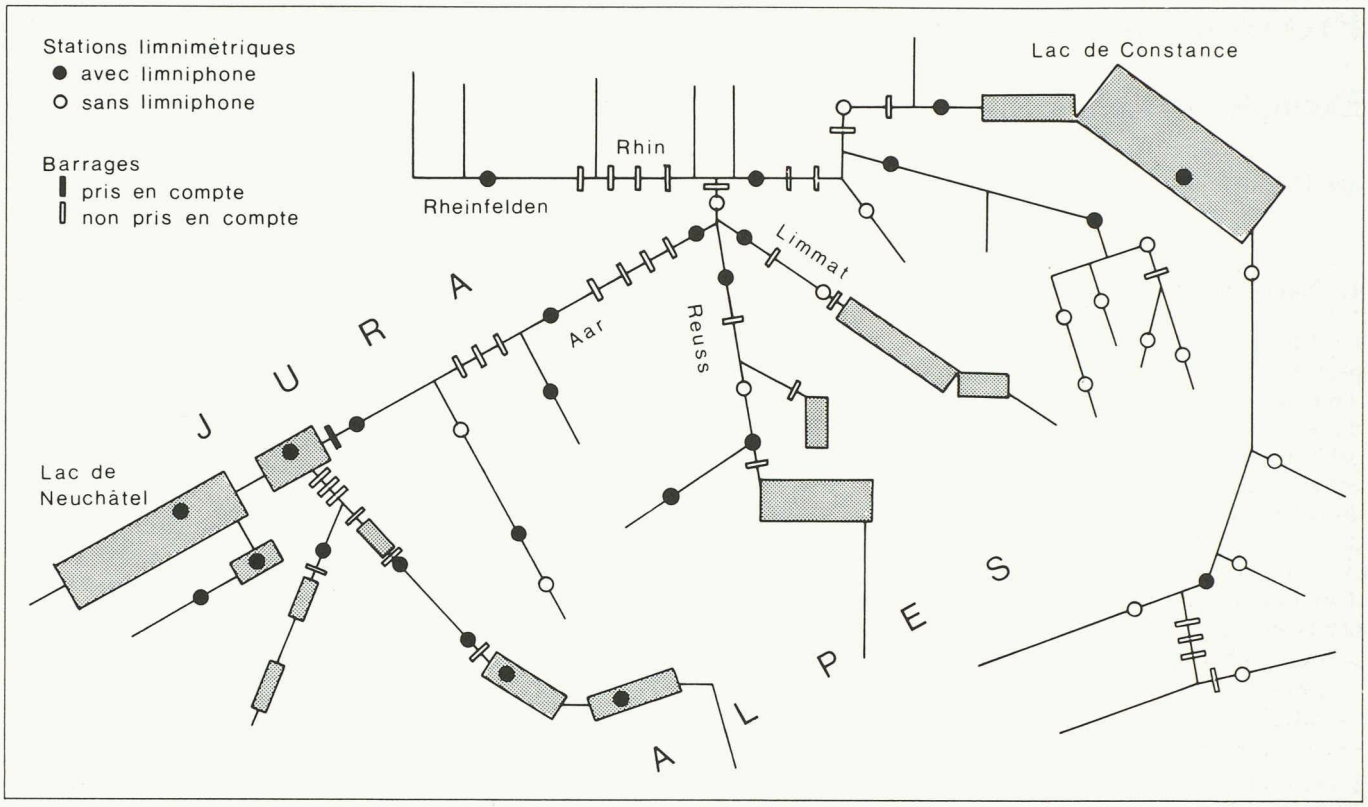

Fig. 1. — Schéma du bassin versant du Rhin à Rheinfelden. Réseau hydrographique avec les stations de jaugeage et limnimétriques utilisées.

L'altitude de l'isotherme zéro degré est déduite d'un profil des températures obtenu à partir des relevés de 9 stations situées à une altitude comprise entre 450 m et 3580 m [1][2].

La grandeur « fonte des neiges » S associée à la précipitation liquide observée sur le bassin considéré et au débit entrant observé dans la période antérieure est introduite comme grandeur d'entrée dans le modèle de prévision partielle. Ce modèle comprend pour chaque grandeur une équation de régression pour tous les intervalles de temps de 6 h. de la période de prévision.

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

La *rétention des lacs* est prise en compte par la formule de rétention bien connue:

$$F(H, t) \cdot \frac{dH(t)}{dt} - Z(t) + A(H, t) = 0$$

avec:

F = superficie du lac
H = niveau du lac
Z = débit entrant
A = débit sortant
t = temps.

Cette formule satisfait à un double but: elle permet d'une part de déterminer le débit entrant de la période antérieure à partir du débit sortant à cette période et de la variation de niveau du lac; elle permet d'autre part de convertir de manière simple la prévision du débit entrant en prévision du débit sortant.

La dimension de la superficie du lac et la précision limitée de la mesure des niveaux ne permettent pas de choisir des pas de temps aussi courts que l'on veut. Pour les grands lacs, le plus petit pas de temps qui ait encore un sens est de l'ordre de 6 h.

2.3 *Prévision de débit pour le plateau central*

Compte tenu de la faible étendue des bassins versants élémentaires de ce secteur et des temps de réaction courts qui leur sont associés, les modèles de prévision partielle sont exploités avec un pas de temps d'une heure.

2.3.1 *Détermination des précipitations du bassin*

Pour l'interpolation spatio-temporelle des précipitations, chaque bassin élémentaire est subdivisé le long de son réseau hydrographique en sous-bassins de surface à peu près équivalente de l'ordre de 100 km^2. A partir des relevés horaires des pluviographes, des relevés bi-quotidiens des stations météorologiques et des relevés quotidiens des stations de mesure des précipitations, on détermine par interpolation la hauteur de précipitation horaire au centre de gravité de chaque sous-bassin.

Dans l'opération d'interpolation, on tient compte de distances par un coefficient de pondération inversement proportionnel au carré de la distance [2 et 3]. On tient également compte de la vitesse de progression des champs de précipitations au moyen de la procédure suivante [4].

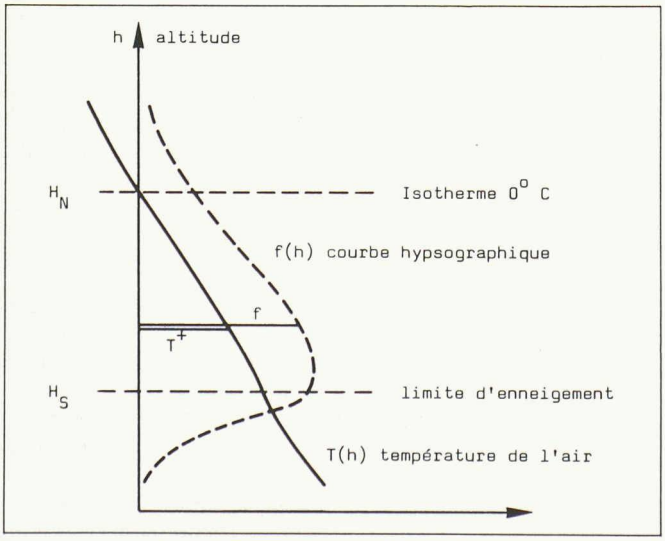

Fig. 2. — Détermination du paramètre « fonte des neiges ». Représentation schématique du profil des températures t (h) et de la courbe hypsographique f (h) dans le domaine de l'isotherme 0 °C et de la limite temporaire d'enneigement.

Pour chaque événement de précipitation, on cumule les hauteurs de précipitations à chaque station pluviographique entre le début et la fin de l'événement et on relativise la fonction des sommes ainsi obtenue en la divisant par sa valeur finale.
Cette valeur finale est égale à la somme des précipitations enregistrées pour un champ de précipitations à une station fixe. Les quantités de précipitations des différentes stations deviennent ainsi comparables entre elles quant à leur évolution et il devient possible de définir des instants auxquels la fonction relative des sommes prend une valeur donnée, la même pour toutes les stations, par exemple: 10, 20, ..., 100%. Ces instants constituent des quantiles de la répartition temporelle des précipitations. Le quantile «0%» d'une station correspond alors à l'instant auquel la limite d'un champ de précipitations atteint la station.
Pour toutes les stations pluviométriques et météorologiques, on interpole les quantiles et on procède si nécessaire aux corrections consécutives aux limites imposées par les observations périodiques. L'étape suivante consiste à interpoler les quantiles et les précipitations cumulées aux centres de gravité des sous-bassins. Enfin, on fait la répartition de la somme des précipitations sur les différents pas de temps compris entre les quantiles.
Ce faisant, on aligne l'évolution des précipitations sur celle observée aux stations pluviographiques, en tenant compte des valeurs cumulées et des quantiles déjà interpolés.
En définitive, les précipitations horaires des différents sous-bassins sont pondérées en fonction de la taille de l'élément, puis superposées en tenant compte des temps de parcours depuis le sous-bassin jusqu'à la station de jaugeage. La hauteur de précipitations ainsi calculée est introduite dans le modèle de prévision du bassin élémentaire sous la désignation de précipitation par région $N(t)$.

2.3.2 *Le modèle de prévision partielle*

Après plusieurs essais, on a retenu pour ce modèle le modèle empirique décrit ci-dessous. Pour en faciliter la compréhension, on peut le représenter comme étant la somme de 4 termes:

$$\hat{Q}(t) = \hat{Q}_B(t) + \hat{Q}_N(t) + \hat{Q}_Z(t) + \hat{Q}_V(t)$$

avec:

$\hat{Q}(t)$ = débit prévu (valeur moyenne pendant le pas de temps t)

$\hat{Q}_B(t)$ = contribution du débit de base du bassin intermédiaire au calcul de $\hat{Q}(t)$

$\hat{Q}_N$ = contribution des précipitations du bassin intermédiaire

$\hat{Q}_Z$ = contribution des débits en provenance des stations de jaugeage amont (débit entrant)

$\hat{Q}_V$ = contribution des débits des périodes antérieures $Q(t-1)$, $Q(t-2)$, ... (terme dit autorégressif).

Le signe « ˆ » indique que les grandeurs en question sont des prévisions.
Cette équation aboutit à la prévision du débit moyen pendant l'intervalle de temps t à partir des débits observés précédemment $Q(t-1)$, $Q(t-2)$, etc. et d'autres grandeurs déterminantes (one step ahead forecast). L'application successive aux intervalles de temps $t+1$, $t+2$, etc. permet d'obtenir une prévision à plus long terme. Il faut alors introduire, pour toutes les grandeurs influentes non observées, des prévisions calculées au cours des intervalles antérieurs.
Le premier terme de l'équation, correspondant à la prévision du débit de base du bassin intermédiaire, est pris en compte par la relation:

$$\hat{Q}_B(t) = Q_B(t-1) \frac{k_1}{k_1 + Q_B(t-1) / \sum_j Q_B(t-j)}$$

De cette manière, la prévision du débit de base tombe d'autant plus vite que le débit de base a été plus élevé dans l'intervalle $t-1$; inversement le gradient sera d'autant plus faible que le volume écoulé dans une période antérieure judicieusement choisie est plus élevé. Le débit $Q_B(t-1)$ est évalué à partir de la différence entre le débit sortant et le débit entrant, compte tenu du temps de parcours. Le paramètre k_1 résulte d'une optimisation. La sommation s'étend sur l'ensemble des pas de temps considérés comme appropriés.
Le deuxième terme représente la fraction des précipitations du bassin intermédiaire. Suivant une proposition faite par P. Guillot, le débit lui-même est considéré comme indice de saturation du sol. En conséquence, la hauteur de précipitation est affectée d'un coefficient de pondération fonction du débit de base du bassin intermédiaire mais compris entre une limite inférieure et une limite supérieure. On a appliqué à cet effet la relation:

$$1 - \frac{k_2}{k_3 + Q_B(t-1)}$$

correspondant à une hyperbole (fig. 3), k_2 et k_3 étant les paramètres déterminés par optimisation. Les précipitations pondérées sont introduites dans l'équation de prévision par la relation linéaire:

$$Q_N(t) = \sum_j \alpha_j \left(1 - \frac{k_2}{k_3 + Q_B(t-1)}\right) \cdot N(t-j)$$

avec: N = précipitations par région. Le paramètre α_j est également estimé.
Le troisième terme associe le débit sortant au débit mesuré ou prévu des affluents (flood routing); il est représenté sous forme linéaire avec les paramètres β_j:

$$Q_Z(t) = \sum_j \beta_j Q_{\text{affl.}}(t-j)$$

avec $Q_{\text{affl.}}$ = débit des affluents.

Le quatrième terme peut être considéré comme terme autorégressif, puisqu'il rattache le débit à son propre passé par l'intermédiaire du paramètre γ_j:

$$Q_V(t) = \sum_j \gamma_j Q(t-j)$$

L'introduction de cette relation a une double justification: d'une part elle permet d'économiser des paramètres, d'autre part elle offre une certaine possibilité de corrections d'erreurs de données ou d'hypothèses.
Si on applique l'équation de prévision successivement aux périodes $Q(t+1)$, $Q(t+2)$, ... $Q(t+3)$ en remplaçant dans le terme autorégressif les valeurs inconnues $Q(t+s)$ par les valeurs prévues, l'influence du passé propre au débit finit par disparaître avec les «s» croissants. Si dans l'équation ainsi obtenue on regroupe les variables répétitives, leurs nouveaux coefficients constituent les fonctions de transfert du modèle de prévision partielle; la fig. 4 en donne des exemples.

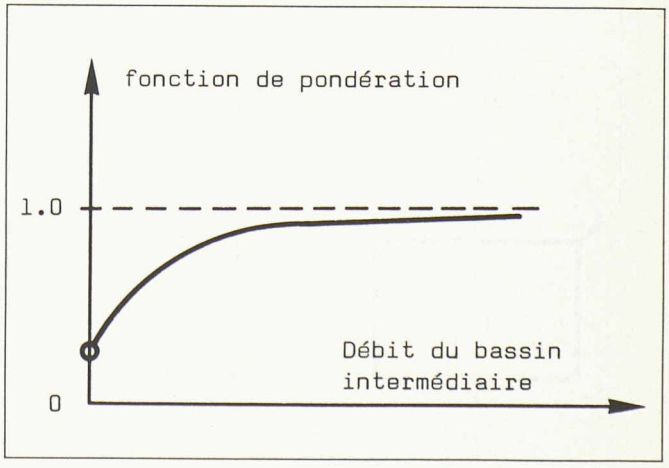

Fig. 3. — Fonction de pondération pour tenir compte de taux de saturation du sol. Q_B représente le débit de base du bassin considéré. Le «poids» se réfère à la hauteur de précipitation du bassin.

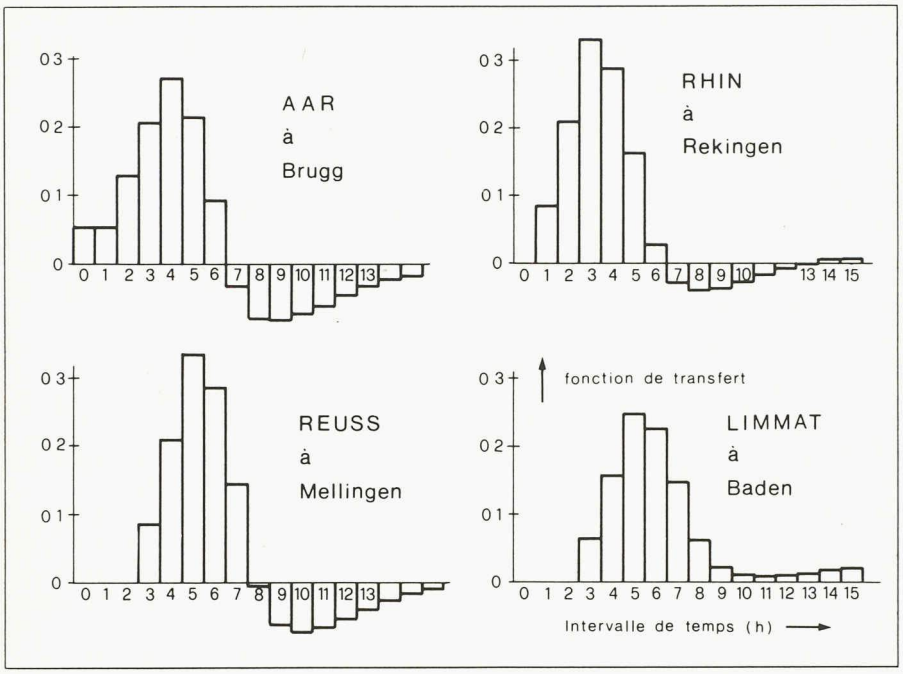

Fig. 4. — Fonctions de transfert pour le calcul du débit du Rhin à Rheinfelden sur la base des débits des 4 affluents.

3. L'édition opérationnelle des prévisions de débit

La prévision est élaborée journellement vers 9 h. et porte sur les 24 heures qui suivent. Pour les journées où on ne prévoit pas de variations de débit importantes, la prévision détaillée est remplacée par un bref commentaire. Les messages de prévision sont transmis par télex aux destinataires suivants:

— Usine de Laufenburg, Suisse
— Electricité de France, Grenoble
— Institut fédéral d'hydrologie, Coblence
— Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding, La Haye.

L'édition opérationnelle des prévisions repose sur les données de départ suivantes, connues au moment de l'édition:
— valeurs instantanées bi-horaires relevées en 23 stations limnimétriques ou de jaugeage;
— hauteurs de précipitations horaires relevées en 25 stations météorologiques automatiques;
— température de l'air et hauteur de neige relevées en 19 stations;
— prévisions quantitatives des précipitations et de température élaborées par le météorologue de la VAW.

Le circuit des informations ainsi que les appareils mis en œuvre pour leur traitement sont représentés en fig. 5.
A titre d'exemple, la fig. 6 représente les éditions successives de prévisions de débit pour la période de crue d'août 1978. Les prévisions émises par le VAW les 4, 7, 8, 9 et 10 août sont représentées en pointillé et il apparaît que, sauf pour le 7 août, les prévisions se sont avérées exactes. Pour le 7 août, en effet, le débit du Rhin à Rheinfelden a été très fortement sous-évalué, en ce sens que la forte montée du débit survenue en fin de journée n'a pas été prévue. Cela tient au très bref temps de réaction du bassin versant et concrétise aussi la défaillance de la prévision quantitative des précipitations. En l'état actuel de nos connaissances et des moyens techniques dont nous disposons, de tels échecs sont malheureusement inévitables. Le découpage

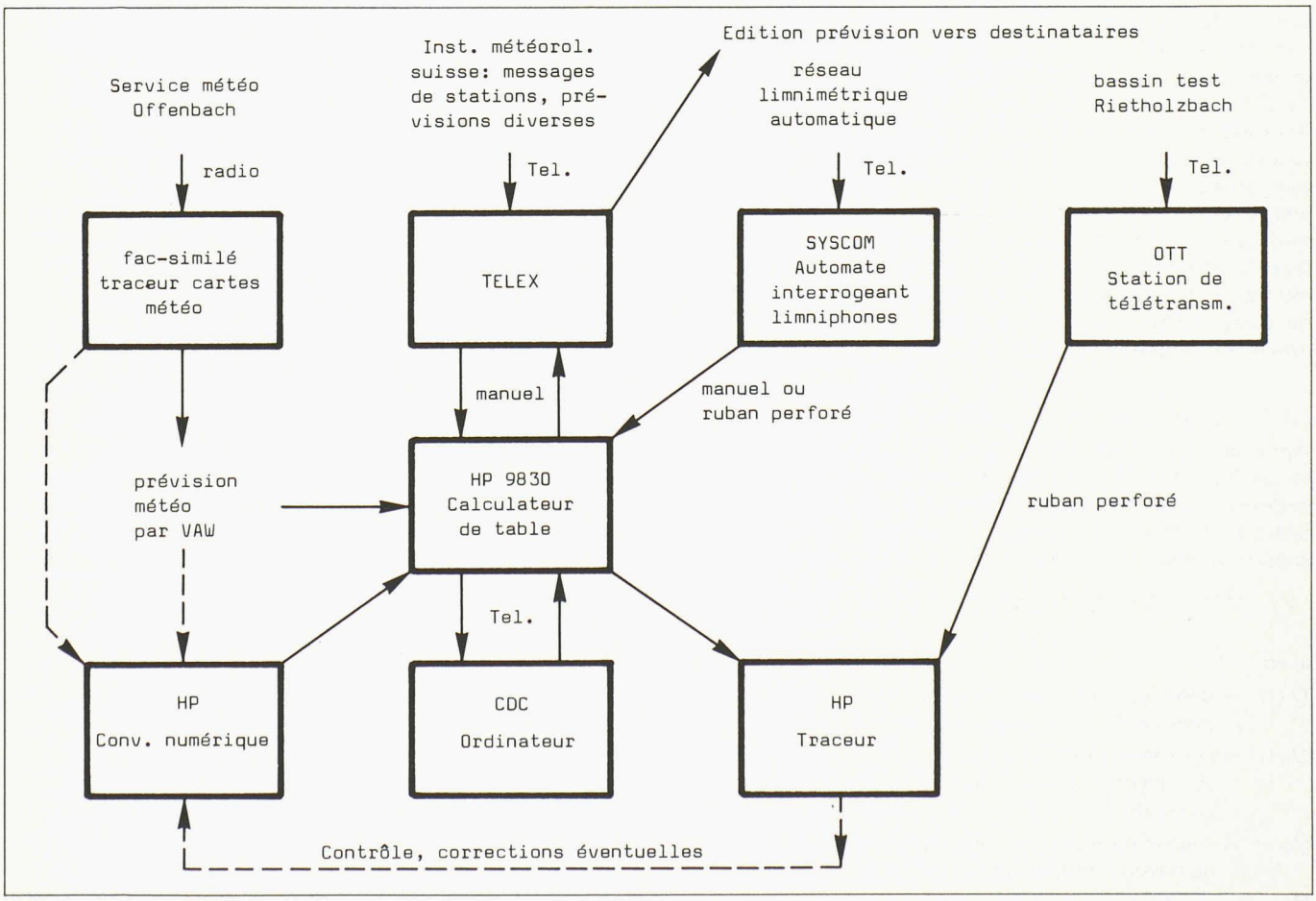

Fig. 5. — Circuit d'information et parc du matériel mis en œuvre pour l'édition opérationnelle des prévisions à court terme du débit du Rhin à Rheinfelden.

temporel et spatial du réseau d'observations météorologiques existant ainsi que du réseau numérique du modèle de prévision météorologique s'est trouvé trop grossier dans le cas présent pour pouvoir livrer en temps voulu suffisamment d'indications sur les conditions météorologiques favorables à des précipitations particulièrement élevées. C'est ainsi que pour la prévision de débit de la journée du 7 août on n'avait prévu que 10 mm de précipitations, alors qu'en réalité elles ont atteint 90 mm ce qui a provoqué une forte montée du débit et engendré la crue. Cet exemple illustre de manière frappante les possibilités et les limites des prévisions de débit.

4. Postface

En lieu et place d'une conclusion mûrement réfléchie, nous nous contenterons de paraphraser J. Jäckli:
« Il est difficile de faire des prévisions, surtout si elles doivent concerner l'avenir ».

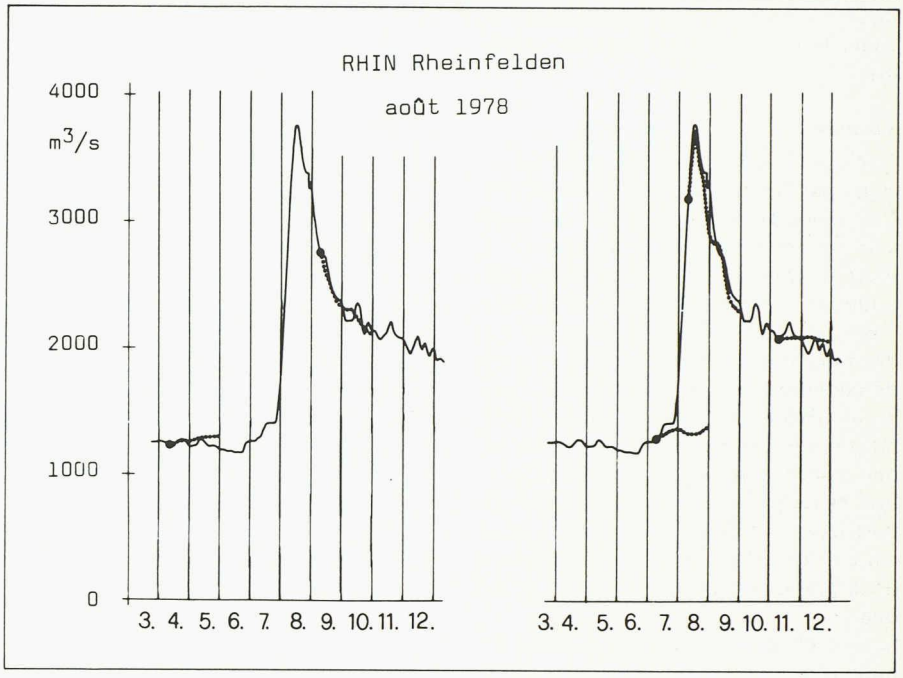

Fig. 6. — Hydrogramme de la crue du Rhin à Rheinfelden du mois d'août 1978. Prévisions de la VAW des 4, 7, 8, 9 et 11 août comparées aux débits observés (pour éviter les superpositions, le diagramme a été scindé en deux).

Adresse des auteurs:
Daniel Vischer, professeur,
Holger Jensen
Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie (VAW)
ETH-Zentrum
8092 Zurich

Bibliographie

[1] Vischer, *Prévision de débit du Rhin à Rheinfelden, Contribution à la géologie de la Suisse*, Hydrologie n° 24, Kümmerly + Frey, Berne 1978.

[2] Mendel, *Contribution au calcul des précipitations par région à partir de mesures ponctuelles*, Brochure jubilaire Peter Kasser, Communication de la VAW, Ecole polytechnique de Zurich, n° 41, 1979.

[3] Ludwig, *Calcul systématique de l'écoulement des crues et du débit à l'aide de modèles de bassin*; communication n° 45 de l'Institut d'hydraulique, d'hydrologie et d'hydraulique agricole à l'Université de Hanovre, 1978.

[4] Grebner et Jensen, *L'évolution spatio-temporelle des champs de précipitation dans le bassin rhénan suisse*; brochure jubilaire Peter Kasser. VAW 1979.

Actualité

Enquête sur les activités du GII, Groupe SIA des ingénieurs de l'industrie

Sur les 1483 questionnaires expédiés en mai 1982, 453 soit 30,5% étaient dûment renvoyés jusqu'à la date limite fixée au 15 juin 1982. 166 répondants y ont adjoint des observations, des propositions ou des desiderata. 27 choisissaient de répondre dans l'anonymat. La participation au sein des sections SIA a fluctué entre 55,9% et 13,3% des membres du GII. La structure d'âge est intéressante, puisque 3,4% des membres ont 34 ans, 22,7% de 35 à 39 ans, 40,7% de 50 à 64 ans et 33,2% 65 ans et plus. 27,4% travaillent dans l'industrie (électrotechnique, machines et chimie), 8,5% dans de petites entreprises industrielles, 16,3% dans des bureaux à titre de propriétaire, associé ou collaborateur, 6,1% dans de grands bureaux d'ingénieurs, 16,1% dans des milieux administratifs et les entreprises de services, 25,6% sont à la retraite.

Les 18 questions posées, auxquelles il fallait répondre par coches, étaient réparties en six thèmes. Les réponses ont quelque peu varié avec l'âge des répondants. Voici les dominantes sur lesquelles s'est porté l'intérêt des participants, en pour cent des réponses:

« Information »

Information sur les nouveautés techniques: 51,2%.
Information et discussions sur des problèmes d'actualité: 40,6%.
Comme porteur de l'information, préférence pour les apports rédactionnels des organes officiels SIA: 41,4%.

« Formation et perfectionnement »

S'intéressent aux possibilités de formation et perfectionnement offertes par l'intermédiaire du GII: 35,7%.
Approfondissement des thèmes spécialisés: 57,3%.
Eventail plutôt large de thèmes sociaux et politiques: 53,8%.
Gestion, organisation, calcul des coûts: 45,4%.
Thèmes de culture générale: 66,1%.
Préférence pour des colloques de 1 à 2 jours: 48,6%.
Préférence pour les jours ouvrables: 47,4%.

« Hautes écoles »

Se prononcent en faveur d'une influence assez marquée sur l'organisation des études: 50,0%.
Les branches de culture générale doivent compter autant qu'aujourd'hui: 44,6%.
Les branches économiques devraient compter davantage: 45,2%.

« Défense des intérêts professionnels »

Assez intéressés par ce thème: 35,0%.
Obtention d'une meilleure reconnaissance de l'ingénieur au sein de la société en vue de l'élargissement de son domaine d'activité, selon postulat des groupes d'échanges d'expériences du GII: 51,2%.
Contacts collégiaux comme introduction optimale des jeunes ingénieurs à la profession: 45,3%.

« Contacts professionnels »

Assez d'intérêt pour les contacts avec spécialistes et professionnels par l'intermédiaire du GII: 41,2%.