

PRÉVISION DES CRUES

RETOUR SUR LES PRINCIPES DES NOUVELLES MÉTHODES FRANÇAISES
DE PRÉVISION ET LEUR MISE AU POINT

ANALYSE DES RÉSULTATS OBTENUS ET ENSEIGNEMENTS DÉGAGÉS
LORS DE LEUR GÉNÉRALISATION AUX DIVERS BESOINS FRANÇAIS

par M. BACHET et BEAU,

Ingénieurs en chef des Ponts et Chaussées.

Avant de rappeler les idées nouvelles qui se sont fait jour en France au cours de ces dix dernières années, dans le domaine de la prévision et de l'annonce des crues, il convient de rendre hommage à la pléiade d'éminents ingénieurs qui, tels BELGRAND, G. LEMOINE, BABINET, MAILLET, SAINJON et bien d'autres, ont marqué leur nom dans ce domaine et laissé une œuvre considérable, œuvre sans laquelle, notamment, il eut été matériellement impossible de disposer de la masse de renseignements et enseignements nécessaires à l'application des nouvelles méthodes.

Rien que certaines études théoriques, au rang desquelles il faut en particulier ranger celle que M. l'Inspecteur général PIGEAUD a fait paraître dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (fascicule 4, année 1919) aient permis d'entrevoir le parti que l'on pouvait tirer de l'analyse du phénomène de l'atténuation de l'onde de crue au fur et à mesure de sa propagation, la plupart des services d'annonces n'utilisaient pratiquement, jusqu'à ces dernières années, que des formules ou graphiques déduits de principes très généraux et de données empiriques.

C'est à l'occasion de recherches en vue de l'amélioration des prévisions dans le bassin de la Loire que sont nées en fait les nouvelles méthodes.

I. ÉTUDE THÉORIQUE DE LA PROPAGATION DES CRUES.

La recherche d'une exactitude plus grande a conduit à l'emploi de méthodes rationnelles déduites des lois théoriques de la propagation des crues.

Le point de départ de ces lois est le fait de la conservation du volume de l'eau qui s'écoule en formant l'onde de crue. Tout d'abord il faut bien remarquer que les rivières n'ont pas des profils en long et en travers constants.

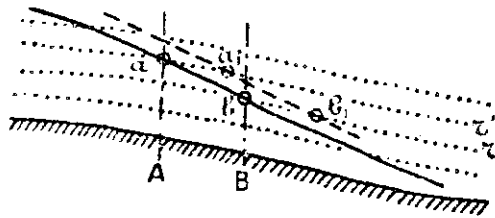


Fig. 1.

Quels que soient les caprices des formes du lit on peut noter les lignes d'eau en régime permanent pour différents débits r , r' , etc. Le front d'une onde de crue coupe ces lignes de la manière figurée sur le croquis ci-dessus et cette onde peut être caractérisée à l'instant t par la fonction $r(x)$.

Raisonnons d'abord sur une évaluation approchée des débits en admettant provisoirement que ces débits sont les

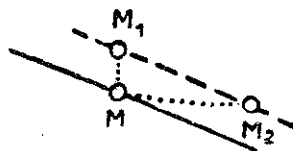


Fig. 2.

mêmes qu'en régime permanent. Le débit qui traverse la section A est supérieur à celui qui s'écoule par la section B, car le premier est r' supérieur à r . Le volume d'eau contenu entre les sections A et B augmente et le niveau s'élève.

Il est clair que l'augmentation de hauteur est proportionnelle à la pente de l'onde $r(x)$. La translation verticale d'un élément de courbe qui se déforme peut s'analyser aussi en translation horizontale

Au lieu de noter la montée MM_1 , on considérera la propagation MM_2 . Cette substitution n'est pas sans intérêt. En effet la montée étant proportionnelle à la pente la propagation par unité de temps est une constante. Ceci montre que l'onde $r(x)$ se propage avec une vitesse de propagation déterminée en chaque point par les formes du lit. De l'instant t à l'instant $(t + dt)$ les différents points de l'onde glissent sur les lignes d'eau en parcourant les chemins élémentaires a, a_1, b, b_1 , etc., égaux à $v dt$, la vitesse v étant différente d'un point à un autre.

L'analyse mathématique va plus rapidement. L'équation exprimant la conservation du volume est en effet la suivante

$$a \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0.$$

Si l'on admet que l'on peut écrire sensiblement $q = r$, ainsi que nous l'avions accepté provisoirement tout à l'heure, on remarque que la différentielle totale

$$dr = \frac{\partial r}{\partial t} dt + \frac{\partial r}{\partial x} dx,$$

devient nulle, en vertu de la relation $\frac{a \partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$ lorsque l'on donne à dt une valeur quelconque et à dx la valeur.

$$dx = \frac{1}{a} \frac{\partial r}{\partial h} dt = v dt.$$

Ceci exprime la loi de propagation que nous venons d'exposer et précise que la vitesse est donnée par la formule

$$v = \frac{1}{a} \frac{\partial r}{\partial h}.$$

Cette première analyse reste à compléter en ajoutant les effets des débits qui ont été négligés.

Examinons en particulier la tête de l'onde. Au point b' la pente supplémentaire donne un débit complémentaire qui sort de la tranche.

En α' c'est une contre-pente, le débit complémentaire est négatif et c'est encore un débit complémentaire sortant. L'addition de ces deux débits complémentaires produit un abaissement de la tête de l'onde.



Fig. 3.

Aux translations suivant les lignes d'eau s'ajoutent donc des montées ou des abaissements dus à la courbure de l'onde.

L'analyse mathématique, conduite comme plus haut, donne pour expression de ces montées, sur la courbe de l'onde $r(x)$ l'expression suivante

$$dr = \frac{\partial \rho}{\partial x} r dt,$$

ρ étant le débit complémentaire tout simplement défini en posant

$$q = r + \rho.$$

Au maximum de la crue ce terme est négatif. Le maximum de la crue va toujours en s'atténuant. C'est pourquoi nous avons appelé « atténuation » ce second mouvement de l'onde.

II. CONCEPTION

D'UNE MÉTHODE RATIONNELLE DE PRÉVISION.

Les deux aspects qui viennent d'être dégagés dans l'analyse de la propagation se prêtent très bien à une construction graphique de l'onde de crue.

Dans les diagrammes d'annonce des crues on ne figure pas les courbes $h(x)$ de la hauteur à un instant donné, mais celles de la hauteur en fonction du temps à des stations successives.

Les lois de la propagation demeurent et apparaissent sous un nouvel aspect évident.

D'après la première loi, le débit apparent à l'amont, c'est-à-dire le débit en régime permanent pour la hauteur observée, se présente en aval après un temps égal au temps de propagation.

Le tracé déduit de cette relation s'effectue avec une règle transparente dont les dispositions et l'usage sont

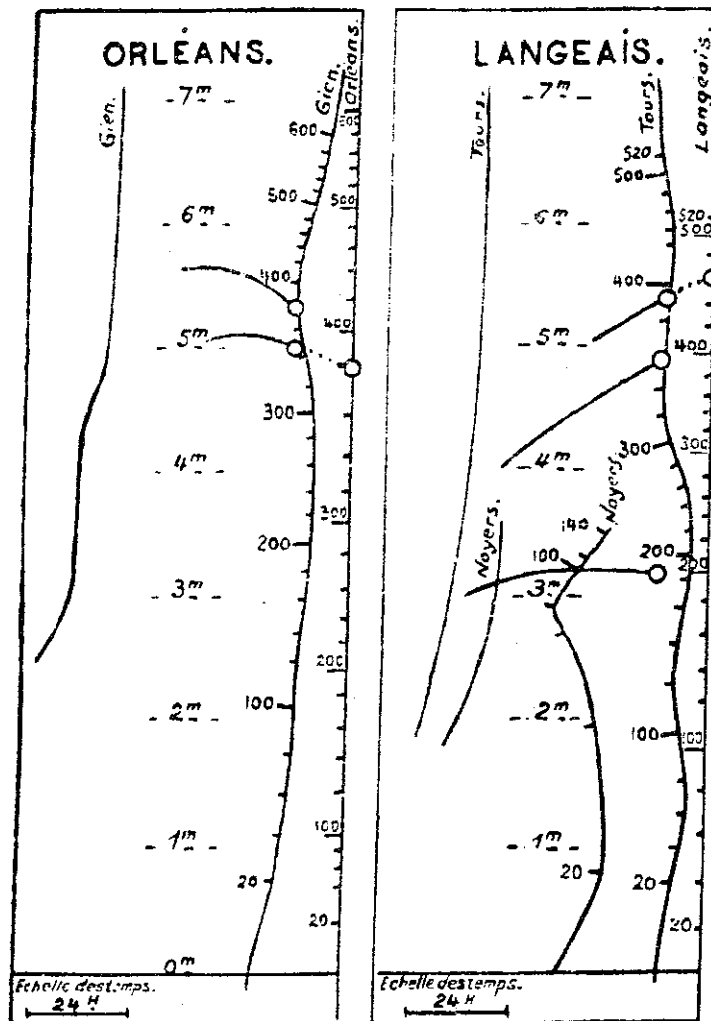


Fig. 4. - On a figuré en noir, telles qu'on les voit à travers les règles, les courbes des stations amont jusqu'au dernier point observé (ou tracé d'après des observations faites encore plus en amont). Le tracé de la courbe prévue en aval est figuré en pointillé.

représentés sur la figure 4. La correspondance des cotes et des temps est donnée par les mêmes chiffres des deux échelles (règlette de gauche).

La distance horizontale entre les chiffres correspondants des deux échelles est le temps de propagation à l'échelle

utilisée sur les graphiques des temps. Ce temps de propagation n'est pas constant, et cela n'introduit aucune complication.

Il est tout aussi facile de tenir compte du phénomène d'atténuation. Celle-ci est proportionnelle à la courbure du sommet de la courbe de crue. Il suffit de placer sur le sommet une corde de longueur donnée et de remplacer le point M par le point M', puis de raccorder le reste de la courbe. La largeur de cette corde, qui dépend de la hauteur de la crue, est donnée sur le côté gauche de la réglette par l'écart entre le bord et une courbe convenablement tracée qui apparaît sur la figure précédente.

Quand la cote d'aval est fonction de plusieurs cotes d'amont il y a tout simplement un plus grand nombre d'échelles et l'on fait la somme des chiffres lus sur chaque échelle d'amont à l'intersection de la courbe correspondante (réglette de droite).

On remarquera la simplicité de la relation donnant les cotes. L'étude de la propagation a montré qu'en négligeant

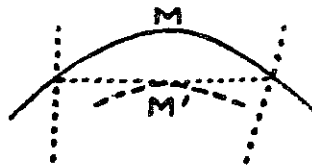


Fig. 5. — On a figuré en pointillé le bord gauche de la réglette et la courbe de celle-ci donnant la largeur de la corde d'atténuation.

provisoirement l'atténuation, le débit d'aval est la somme des débits d'amont. Une fonction de la cote d'aval est donc la somme de certaines fonctions des cotes d'amont.

Ainsi une seule réglette, très maniable, contient tous les éléments du calcul des prévisions.

III. CONSTRUCTION DES RÉGLETTES.

Les réglettes se construisent d'après un dépouillement des hauteurs observées depuis un grand nombre d'années. Pour les réglettes à deux échelles le procédé est très simple. On prend un papier calque et l'on porte un point M correspon-

dant à une hauteur d'amont quelconque. On promène ce calque sur les anciens graphiques en le plaçant à la hauteur convenable. Mettant le point M en coïncidence avec un point de la courbe d'amont on trace un élément de la courbe d'aval (fig. 6).

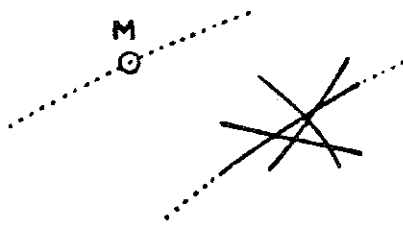


Fig. 6.

De la répétition de cette opération sur le même calque résulte la figure du croquis ci-contre. Au point M de l'échelle d'amont correspond le point de l'échelle d'aval donné par le centre de gravité des intersections des courbes.

Il faut d'abord éliminer les régions des courbes où l'atténuation peut être sensible. Celle-ci peut être déduite ensuite en considérant les crues, particulièrement celles dont le sommet est le plus pointu.

Le dépouillement des réglettes à plusieurs échelles est plus compliqué, mais il s'inspire du même principe. Pour plus de détails nous ne pouvons que renvoyer à l'étude publiée dans les *Annales des Ponts et Chaussées* de mai-juin 1934.

L'ajustement des réglettes avec les seules données des observations organisées méthodiquement oblige à laisser de côté certains éléments du problème : petits affluents, ruissellements directs, etc. Ces influences ne sont pas omises, l'ajustement avec les données du passé les exprime en fonction des seuls éléments observés. Le travail du dépouillement dégage automatiquement la corrélation existant entre l'influence des éléments négligés et celle des observations utilisées.

Les résultats obtenus pour la Loire furent tout à fait satisfaisants.

Remarque. — La théorie rationnelle donne des formules qui peuvent servir de base à la construction pratique des réglettes.

Le temps de propagation est donné par la formule approchée ci-dessous

$$\theta = \frac{2k'}{3k} \int \frac{dx}{u}$$

les termes de la formule ayant les sens suivants :

u' vitesse superficielle du courant dans l'axe (de sorte que $\int \frac{dx}{u}$ est le temps du voyage d'un corps flottant).

k rapport moyen de la section au produit de la largeur de la rivière par sa profondeur h .

k' rapport de la vitesse superficielle définie ci-dessus à la vitesse moyenne du courant.

Cette formule suppose que la courbe de jaugeage répond à la formule classique de débit : $Q = Ch$ (le coefficient numérique $\frac{2}{3}$ est l'inverse de l'exposant).

La connaissance des courbes de jaugeage permettrait de poursuivre la construction de la règlette. Mais cela n'est pas nécessaire; la correspondance expérimentale des cotes suffit.

Enfin la largeur de la corde d'atténuation, homogène à un temps, est donnée par la formule suivante

$$T = \theta \sqrt{\frac{8h}{3\eta}}$$

θ étant le temps de propagation, h étant la profondeur de la rivière, η la différence d'altitude de la surface de la rivière entre les deux stations en régime permanent (le coefficient 3 sous le radical est le double de l'inverse de l'exposant de la formule $Q = Ch^{\frac{3}{2}}$):

La prévision des crues par ce procédé graphique n'est pas autre chose que l'intégration d'une équation différentielle aux dérivées partielles dans un cas qui se prête facilement à l'opération. D'autres problèmes d'hydraulique peuvent être étudiés utilement de cette manière, quoique d'une façon parfois plus laborieuse. Nous signalerons, pour terminer, que notre analyse peut être utilisée pour l'étude des changements apportés à la propagation des crues du fait de travaux exécutés dans le lit des rivières.

IV. APPLICATION PRATIQUE AU BASSIN DE LA SEINE.

Jusqu'en 1935 les prévisions de crues dans le bassin de la Seine étaient faites au moyen de tableaux de correspondance ou de formules empiriques.

Sur les figures ci-après (7, 8, et 9) nous avons traduit, par

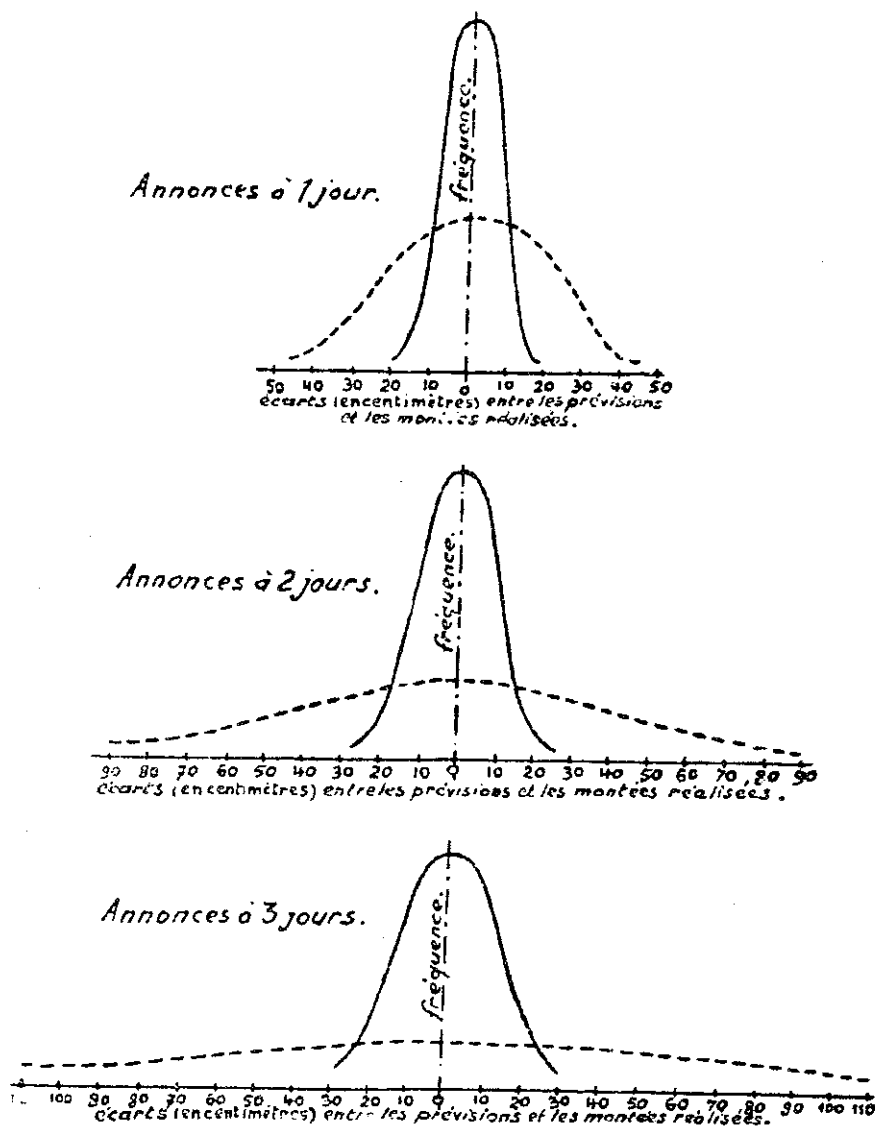


Fig. 7, 8, 9. — Allures des courbes de Gauss relatives aux écarts entre les prévisions et les montées réalisées pour la Seine à Paris (pont d'Austerlitz).
 - - - - - Résultats pour les crues des 10 dernières années avant application de la méthode de M. Bachet.
 ——— Résultats obtenus depuis l'application de cette nouvelle méthode

des courbes de Gauss, tracées en pointillé, la précision des annonces à la montée des eaux faites par ces méthodes de

prévisions au cours des crues de 1926 et de 1930 où les maxima réalisés à Paris (échelle d'Austerlitz) ont été : 6,06 m. (1926) et 6,08 m. (1930).

A la suite de l'application de la nouvelle méthode au bassin de la Seine (application dont l'initiative, en 1934, revient à M. l'Inspecteur général LEMOINE), les précisions obtenues pour les annonces à la montée des eaux au cours des crues de 1935 (maximum : 4,36m.), 1936 (maximum : 4,49 m.), 1937 (maximum : 5,21 m.) ont été traduites également en courbes de Gauss (tracées en trait plein, en superposition de celles indiquées plus haut) sur les mêmes figures.

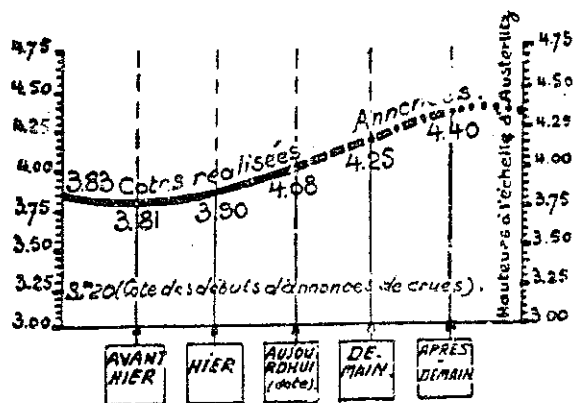


Fig. 10.

V. GÉNÉRALISATION A TOUS LES BASSINS.

Devant ces résultats encourageants, le Service d'annonce des crues put mettre au point, pour Paris, une méthode de présentation des annonces sous forme d'un graphique du modèle ci-dessus (fig. 10), distribué chaque jour par pneumatique, et qui permet de suivre de façon vivante la progression de la montée des eaux.

En juillet 1936, le Ministre des Travaux Publics prescrivit aux Services hydrométriques locaux de rechercher les améliorations à apporter à leurs méthodes actuelles de prévisions, tant par l'introduction de la nouvelle méthode adaptée aux circonstances locales que par un recours plus étendu aux données de la pluviométrie et des prévisions météorologiques.:

Au début de 1939, sur 38 services hydrométriques locaux, 23 avaient construit des réglettes ayant donné des résultats satisfaisants, 12 achevaient la mise au point de leur travail, 3 ont estimé devoir recourir uniquement à la météorologie, la construction de réglettes ayant été reconnue inutile en raison de l'instantanéité des crues.

Notons que ces travaux ont provoqué quelques études théoriques ou pratiques fort intéressantes de la part de plusieurs ingénieurs et savant. Citons en particulier les suivantes :

Octobre 1936. — Note sur la prévision des crues du Rhin, à Strasbourg, par M. CALLET, ingénieur des Ponts et Chaussées.

Décembre 1936. — Note sur la propagation des crues, par M. HUPNER, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

1938. — Étude potamologique « Sur la prévision des crues de la Seine, à Paris », par W. FROLOW.

1938. — Méthode graphique de prévision pluviométrique des crues, par L. KACHRILLO, ingénieur civil de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

VI. ANALYSE DES RÉSULTATS OBTENUS ET DES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES. RECOURS A LA MÉTÉOROLOGIE.

a. *Rapidité et sûreté de maniement de la méthode.* — Le travail de prévision, libéré de toute formule susceptible d'engendrer des erreurs matérielles, et effectué de façon graphique et parlante, est devenu rapide et sûr. On suit la courbe et il est arrivé que le bureau de prévision, observant de légères anomalies qui n'auraient certainement pas été relevées dans l'application brutale d'une formule, fasse rectifier des erreurs de lectures aux échelles ou de transmissions téléphoniques.

De plus, la généralisation d'une méthode susceptible d'uniformité de maniement présente un autre avantage incontestable : en cas de mutation du personnel, on trouvera plus facilement du personnel immédiatement adapté.

b. *Utilisation des données pluviométriques, de l'enseignement et des prévisions météorologiques.* — Les Services d'Annonces de crues disposent tout d'abord des données de leurs propres stations pluviométriques. Par ailleurs les Centres Régionaux de l'Office National Météorologique sont dotés de Services de prévisions qui peuvent renseigner, avec une appréciable précision, sur l'intensité des pluies du jour et du lendemain, sur la température et les chutes probables de neige. (Si la température est suffisante pour permettre la fusion de la neige, celle-ci est comptée en pluie pour 15 p. 100 de sa hauteur.)

La plupart des Services hydrométriques locaux ont organisé une liaison étroite avec ces Centres régionaux dans le but de combiner, au moment des crues, les renseignements fournis par ces Centres avec les données de hauteurs d'eau et d'être ainsi en mesure d'apporter plus de précision dans leurs prévisions de crues..

On se rend facilement compte que les renseignements météorologiques sont d'autant plus utiles que les crues sont plus rapides.

Ci-après deux exemples montrant l'intérêt d'une bonne liaison avec les Services météorologiques.

PREMIER EXEMPLE. — Au cours de la crue de mars 1937, provoquée essentiellement par le Haut-Rhône, les ingénieurs avaient pu fixer, le 21, les cotes maxima qui devaient, sauf imprévu, être atteintes dans la journée du lendemain 22. Le 22, les cotes étaient atteintes ou sur le point de l'être, mais le mauvais temps régnait et les populations commençaient à s'inquiéter. Cependant, le prévisionniste de l'Office Météorologique de Marignane, consulté, annonça qu'il y aurait encore quelques averses, mais que le mistral se levait en altitude et qu'il prendrait le dessus dans la journée du lendemain. Ces renseignements permirent aux ingénieurs de faire des annonces suffisamment précises et de rassurer les populations.

SECOND EXEMPLE. — Au début de novembre 1935, après plusieurs jours de fortes pluies, les apports des affluents

immédiats de la rive gauche du Rhône, dans son bassin inférieur, avaient eu une grande influence sur l'élévation du niveau des eaux.

Une accalmie s'était produite de ce côté les 9 et 10 novembre. Mais le Service météorologique avait pu se rendre compte que de nouvelles pluies massives allaient survenir dès le 11.

Les ingénieurs d'Avignon qui, par suite d'une défaillance dans la liaison avec ce service, s'étaient trouvés dans l'ignorance du changement de temps qui se préparait sur le bassin inférieur, rive gauche, avaient établi, le matin du 11, leurs prévisions sans se douter de ce changement capital.

Ils annonçaient donc une cote probable du Rhône de 5,95 m. à Avignon pour la matinée du 12.

Or, la cote réalisée a été : 6,88 m. faisant ressortir un écart de 0,93 m. absolument anormal, qu'aurait évité le contact avec les Services météorologiques.

VOYONS MAINTENANT PAR UN TROISIÈME EXEMPLE comment les renseignements météorologiques permettent l'extrapolation de la courbe atténuée (voir note, page 426 de l'article précité paru aux *Annales des Ponts et Chaussées*, III, mai-juin 1934).

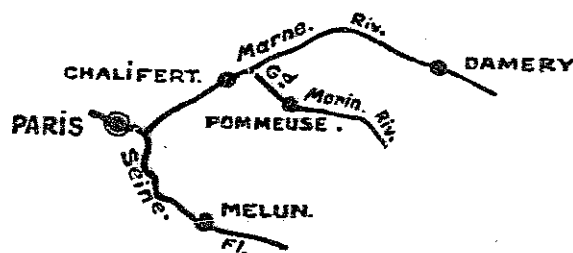


Fig. 11.

Les annonces à Paris sont faites en fonction de Chalifert (sur la Marne) et de Melun (sur la Seine) (fig. 11). Or, le torrentiel Grand-Morin, grand perturbateur autrefois des annonces sur Paris, arrive en crue sur la capitale en 24 heures depuis Chalifert. Malgré cette circonstance fâcheuse, les renseignements fournis par la réglette, combinés avec les renseignements météorologiques, permettent

d'annoncer à trois jours sur Paris des hauteurs d'eau correspondant à des pluies qui ne sont pas encore tombées.

La figure 12, décèle les erreurs que l'on aurait commises en prévoyant la montée à Chalifert en fonction de Damery sur la Marne et de Pommeuse sur le Grand-Morin, si l'on n'avait pas tenu compte des renseignements météorologiques. Ces erreurs auraient été, à trois jours, de l'ordre de 40 centi-

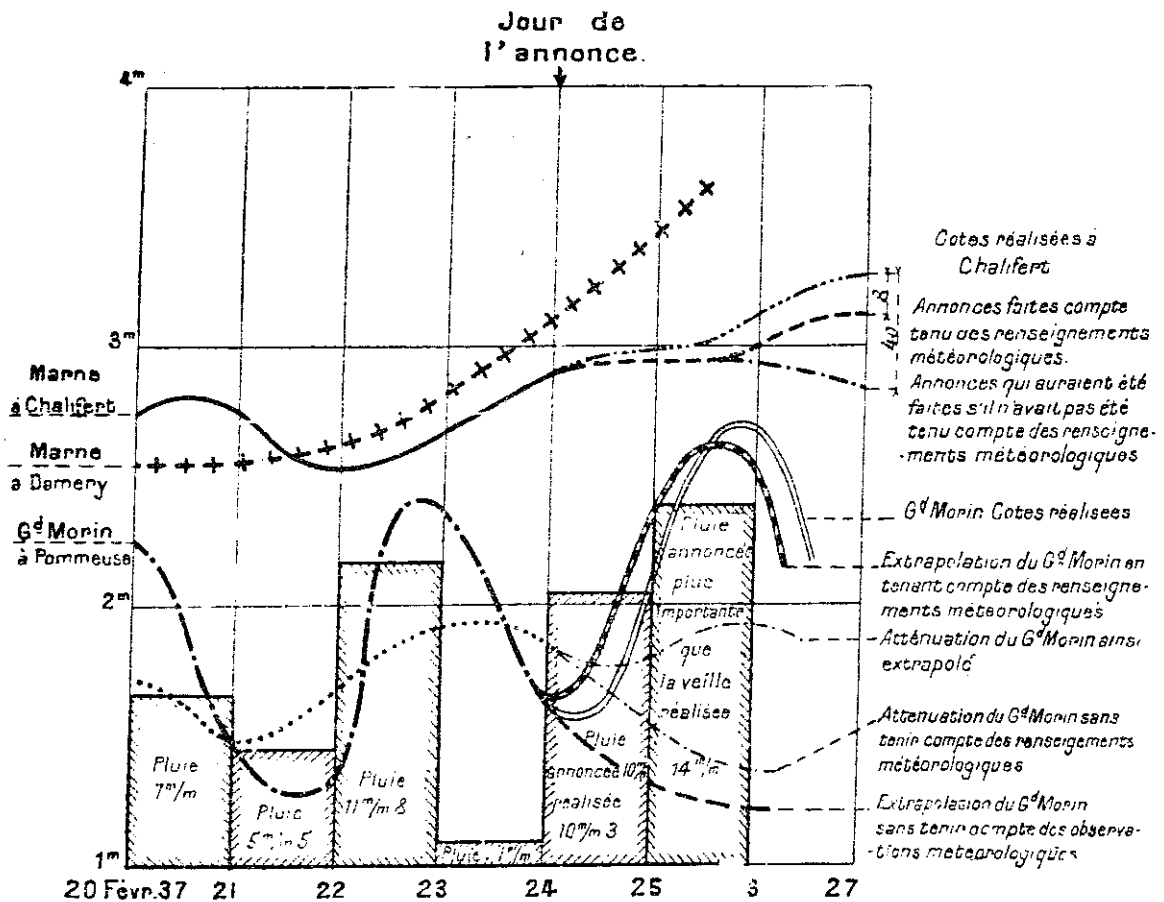


Fig. 12.

mètres. Elles n'ont été pratiquement que de l'ordre de 8 centimètres.

c. *Difficultés rencontrées pour la construction des réglettes et conseils pratiques pour cette construction.* — Il y a lieu d'abord de signaler qu'il n'est pas nécessaire de connaître les courbes de jaugeage pour construire les réglettes. L'intérêt de ces courbes, que l'on peut constituer avant et après débordement, avec les termes de la formule classique : $q = kh^{\frac{3}{2}}$, n'est que de traduire la notion de courbure dans la graduation.

Cas de concomitance des crues des affluents : (fig. 13). —

Il y a concomitance lorsque par suite d'un fâcheux concours des circonstances géographiques et météorologiques, les crues des affluents sont concordantes et arrivent en général presque simultanément à la station d'aval.

La méthode de construction de la règlette est toujours la même, sauf qu'elle est plus longue et plus délicate et nécessite généralement plus de précision quant aux courbes de jaugeage.

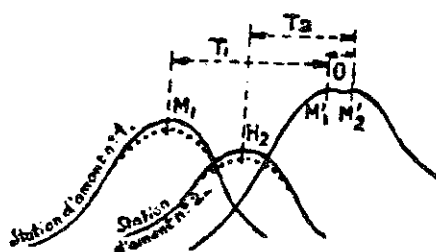


Fig. 13.

Pour dégager l'effet d'un affluent sur la courbe d'aval, il faut en effet en retrancher avec assez de précision l'influence de l'autre ou des autres affluents.

Les quelques remarques pratiques suivantes faciliteront, notamment dans le cas ci-dessus, l'étude des temps de correspondance :

Détermination graphique du maximum de la courbe atténuée (contact avec la corde d'atténuation). — Ce point

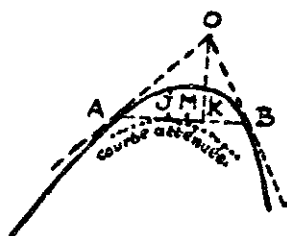


Fig. 14. — OA et OB, tangentes à la courbe de crue aux extrémités de la corde d'atténuation; K, Pied de la perpendiculaire de O sur AB; M, milieu de AB; J (contact) Symétrique de K par rapport à M.

de contact s'obtient facilement par une construction graphique (fig. 14) basée sur une approximation consistant à assimiler le sommet de la courbe à une parabole.

Détermination rapide des temps de correspondance, notamment dans le cas d'un cours d'eau torrentiel. — Dans le cas d'un cours d'eau torrentiel la courbe atténuée coupe franchement la courbe de crue (fig. 15).

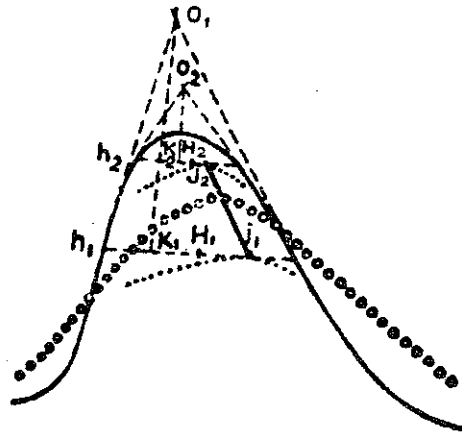


Fig. 15.

La méthode la plus simple consiste à se servir uniquement des correspondances entre maxima, mais la hauteur du maximum atténué n'étant pas encore connue au début d'une recherche, on lui substitue, en première approximation, son lieu géométrique, tout au moins entre les limites probables estimées h_1 et h_2 .

Ce lieu peut, en général, être assimilé au segment de droite J_1J_2 joignant les points définis plus haut pour deux cordes



Fig. 16.

d'ordonnées horizontales h_1 et h_2 , encadrant vraisemblablement le sommet de la courbe atténuée.

En plaçant le bord droit de la règle à construire à l'abscisse du maximum de la courbe de crue de la station aval, on reproduit (fig. 16) l'élément de droite ou de courbe adopté comme lieu géométrique du maximum atténué de la station d'amont.

La courbe des temps de propagation se dessinera aisément au moyen d'une série d'éléments de droite analogues correspondant à des ondes de crues de diverses hauteurs.

Observons également qu'en se servant d'une propriété des coniques, la position du maximum d'aval (S) peut être précisée graphiquement; il suffit de tracer une corde horizontale assez voisine du sommet, de mener les tangentes aux extrémités de la corde et de joindre le point de concours T des tangentes à M (milieu de la corde) d'où en S, le sommet (fig. 17).

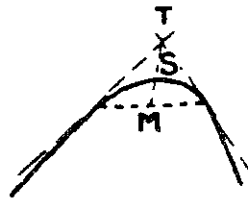


Fig. 17.

Position et allure des courbes atténuées, particulièrement dans le cas de cours d'eau torrentiels. — Dans ce cas on peut démontrer que, C étant la courbe réelle, et C' la courbe atténuée :

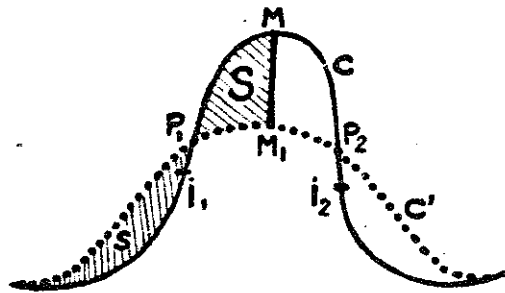


Fig. 18.

1° Les points d'intersection P_1 et P_2 de ces courbes se trouvent normalement, et sauf irrégularités notables dans l'allure de l'onde de crue ou la forme du lit, au voisinage et au-dessus des points d'inflexion I_1 et I_2 de la courbe C (fig. 18).

2° Il y a sensiblement équilibre entre les aires S et s lorsque la courbe des temps de propagation en fonction des hauteurs a une allure régulière, avec faible variation des temps de propagation dans la zone considérée.

3° Si le temps de propagation croît avec la hauteur, S tend

à devenir supérieur à *s*. Ce serait le contraire dans le cas inverse (d'ailleurs beaucoup plus rare).

Affluents fictifs correcteurs. — Lorsqu'une masse de petits affluents donnent abondamment sans qu'on puisse enregistrer leur influence sur une station hydrométrique efficacement placée sur la trajectoire de leurs eaux, on peut souvent introduire sur les réglettes une courbe correctrice sous forme d'affluent fictif pour tenir compte de ces apports. Il suffit, pour cela, de trouver une rivière témoin issue du même centre de pluviosité, même si cette rivière témoin coule vers un autre bassin versant.

Il n'y a plus ensuite qu'à graduer sur la réglette les hauteurs d'eau de cette rivière en fonction des apports constatés par différence.

Exemple (fig. 19) : entre Vouziers et Pontavert, l'Aisne cotoie les Ardennes, d'où apports multiples dont une partie s'écoule par le bassin de la Serre et l'autre dévale sur l'Aisne par mille ruisselets. Or, il n'existe aucune station sur ces ruisselets entre Vouziers et Pontavert pour enregistrer ces apports. Mais il en existe une sur la Serre, à Montcornet, au sortir des Ardennes.

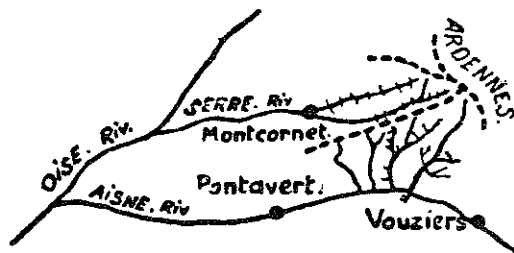


Fig. 19.

La réglette Pontavert, qui a été établie en fonction de Vouziers et de Montcornet (courbe graduée par différence) donne toute satisfaction.

VII. DE LA POSSIBILITÉ EFFECTIVE DE DÉTERMINER L'ATTÉNUATION EN TOUS POINTS ENTIÈREMENT PAR LA THÉORIE, DANS CERTAINS CAS.

Dans certains cas où l'atténuation joue un rôle essentiel (cas des fortes pentes), on peut être amené à déterminer la

courbe atténuée entièrement par la théorie si, par ailleurs, la régularité des conditions d'écoulement du cours d'eau sur la section envisagée s'y prête. C'est ce qu'a fait le Service d'Annonce des crues à Strasbourg, pour le Rhin.

Le calcul de l'atténuation fait, à cette occasion, par M. l'Ingénieur CALLET conduit en tous points à une valeur suffisamment approchée de l'atténuation du débit, égal à

$$\Delta r = -\frac{1}{2\eta} \frac{\partial}{\partial t} \left(\theta^2 r \frac{\partial h}{\partial t} \right),$$

- θ , étant la durée de propagation;
- η , la dénivellation entre les deux stations considérées;
- r , le débit en régime permanent;
- h , la hauteur d'eau.

Les dérivées incluses dans cette formule se calculent aisément graphiquement (inclinaison de la tangente à la courbe h , puis à la courbe $\theta^2 r \frac{\partial h}{\partial t}$).

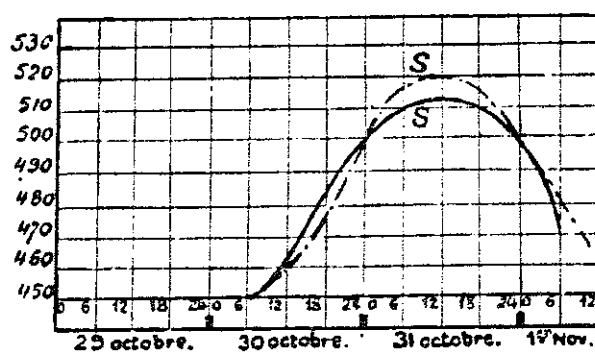


Fig. 20.

La méthode ci-dessus, appliquée à la crue d'octobre 1935 entre Neufbrisach et Strasbourg a conduit aux deux courbes S (courbe réelle) et S' (courbe calculée) de la figure 20 où l'écart maximum constaté est de 7 centimètres.

VIII. CONCLUSIONS.

On peut se rendre compte, par cet aperçu d'ensemble, à la fois des principes, des applications et perfectionnements pratiques, et des études provoquées, combien, malgré l'aridité du sujet et son intérêt souvent si localisé dans le temps,

le mouvement d'idées et la somme de travaux engendrés par l'application de la nouvelle théorie de prévision des crues ont été, en définitive, importants et féconds.

Si nous sommes heureux d'y avoir contribué pour notre modeste part, nous n'oublierons pas, indépendamment des travaux produits par les éminents ingénieurs et savant déjà cités et par tout le personnel des divers services d'annonce de crue, à quel point fut précieux le concours de nos sympathiques collaborateurs directs, parmi lesquels nous nous plaisons à citer MM. LALLEMENT et SAVARD, au Service Central à Paris, et MM. BRUTÉ DE RÉMUR et MOREAU, à Orléans.

Pour terminer sur une note orientée vers l'avenir, nous ajouterons que c'est du côté de la météorologie qu'il nous paraît le plus utile, maintenant, d'aiguiller les recherches futures, et à cet égard on peut dire que, si la pratique des nouvelles méthodes a montré qu'elles se prêtent aisément à l'utilisation de la pluviométrie et des prévisions de pluie pour prolonger dans le temps la portée des annonces, le champ des investigations reste encore largement ouvert dans ce domaine.