

ÉTUDES AMÉRICAINES SUR LES CRUES

par Maurice PARDÉ

Professeur à l'Institut de Géographie Alpine
et à l'Institut Polytechnique de Grenoble

(COMMUNICATION PRÉSENTÉE AU COMITÉ TECHNIQUE DE LA S. H. F. DANS SA SÉANCE
DU 24 NOVEMBRE 1947)

A - PUISSANCE DES CRUES AUX ÉTATS-UNIS

Les inondations sont, aux Etats-Unis, l'objet d'études officielles infiniment plus larges et plus approfondies qu'en France (1).

C'est d'abord parce que, dans le premier de ces pays, les crues exercent plus fréquemment de grands dommages. Le fait s'explique en premier lieu par la grande étendue territoriale de la République étoilée, puis par la violence extrême du climat sur la plus grande partie des Etats-Unis.

Certes, il ne faut pas oublier qu'en France les Alpes du Nord, le Jura, les Vosges, le Morvan, l'ouest du Massif Central et les Pyrénées Centrales et Occidentales peuvent recevoir des **pluies océaniques** (vents humides à composante ouest) dépassant 100 et même 120 mm. en un jour, même 150 et 175 dans les Vosges, chiffres non anodins puisqu'ils justifient, en saison froide, des débits maxima de 1.000 à 1.500 lit./sec. par km² sur des surfaces accidentées de 500 à 1.000 km², pour peu que manquent les terrains perméables à gros pouvoir de rétention durable. Mais les régions à pluies terribles du type *Cloudburst*, *Wolkenbruch*, *Nubifragio*, capables de déverser 300, 500, 1.000 mm. et plus en un jour, 150 à 200 mm. en une ou deux heures, etc., se limitent à quelques zones soumises au climat méditerranéen, à savoir le rebord oriental du Massif Central, le Languedoc, l'ouest des Pyrénées orientales et la basse vallée rhodanienne.

(1) On doit cependant rappeler qu'après les grandes inondations de 1846 (Loire), 1856 (Loire, Rhône, Garonne) 1866 (Loire et Seine), 1875 (Garonne en juin; Tarn, Hérault, etc. en septembre), le Corps français des Ponts et Chaussées, sous l'impulsion de chercheurs remarquables, parmi lesquels nous citerons l'illustre Belgrand, Graeff, Sainjon « Débrouilleur des crues de la Loire », Comoy, Kleitz et Belin pour le Rhône, etc., s'est livré à des recherches sur le terrain et à des évaluations dont certaines sont restées classiques dans le monde des spécialistes. Et pourtant à cette époque les instruments de mesure et les formules ne valaient pas, à beaucoup près, les moyens d'investigation dont on dispose de nos jours. Cette décadence s'explique soit par une véritable désaffection à l'égard de l'hydrologie véritable, c'est-à-dire en partie géographique, et non purement mathématique, soit par la médiocrité des crédits et la multiplicité des tâches qui accaparent nos ingénieurs.

Or, ces déluges, qui peuvent créer des maxima exceptionnels de 20.000 à 30.000 litres/sec. par km² pour quelques km², de 5.000 à 10.000 pour des surfaces réceptrices de l'ordre de 500 km², etc., sont possibles sur une grande partie des Etats-Unis, notamment sur toute la zone montagneuse orientale et son avant-pays et sur toute la vaste plaine centrale, sauf le quart nord ou nord-occidental. En effet, on a mesuré 307 mm. en douze heures (juin 1905) jusque dans l'Iowa à Bonaparte, à 1.500 km. du Golfe du Mexique. Et dans la région steppique et presque subdésertique située au pied oriental des Rocheuses, les chutes d'eau de **quelques heures** à la fin de mai 1935 (Haute Republican River, branche supérieure de la Kansas et région de Denver et de Colorado Springs) **ont probablement dépassé les totaux annuels moyens, avec 400 à 600 millimètres.**

Cette richesse explosive, si l'on peut dire ainsi, du climat yankee, tient avant tout au fait que les contrastes thermiques entre masses froides et chaudes, séparées par des **fronts**, oppositions d'air d'où résultent une quantité d'averses (1) sont fréquemment bien plus rudes que chez nous. Pourquoi? D'un côté parce que l'air chaud humide que certaines dépressions atmosphériques attirent sur le continent vient là-bas soit du Golfe du Mexique, par vents de Sud à Sud-Ouest, soit par vents de Sud à Sud-Est du domaine atlantique situé vers les Bermudes, ce qui donne à ces influx des températures supérieures à celles des vapeurs océaniques venues en Europe occidentale de latitudes plus élevées, donc plus fraîches. Et même ces invasions sont plus chaudes que beaucoup de nos agressions

(1) Nos orages estivaux, et beaucoup de nos pluies méditerranéennes, sont de ce genre, d'où leur intensité. Nos chutes d'eau générales océaniques ont en grande partie le caractère de pluies de relief, et sont rarement très fortes en dehors des secteurs où les vapeurs atmosphériques se refroidissent en montant à l'assaut des barrières orographiques. Les pluies peuvent d'ailleurs appartenir à la fois au type orographique et au type frontal. C'est le cas en France pour nombre d'averses **Cevenoles**, sur le Rebord oriental du Massif Central.

atmosphériques méditerranéennes. Puis, chez nous, les nuages méditerranéens sont arrêtés à proximité des côtes par des reliefs écrans. Ils s'y délestent et ne peuvent donc parvenir dans le Centre, l'Ouest et le Nord de la France avec un potentiel humide considérable. En revanche, l'air tropical du Golfe envahissant la plaine du Mississipi n'y rencontre que point ou très peu de barrières à sa progression ; d'où l'arrivée de corps de bataille à haute exaltation humide et thermique très loin de la mer.

Or, ces forces butent très souvent, dans leur marche, contre des masses d'air, elles-mêmes agressives et bien plus froides que celles qui viennent en France du Nord et du Nord-Ouest. Car, en Europe, les influx en question ont traversé des mers ou l'Océan et ne peuvent donc plus guère comporter de températures très basses. Aux Etats-Unis, ils ont une origine plus polaire et ont parcouru un chemin bien plus continental, de par le dessin des terres et des étendues marines. Le choc entre les deux antagonistes produit donc, jusqu'à des distances considérables à l'intérieur, des condensations qui peuvent être torrentielles.

Par une antithèse assez curieuse, il se trouve qu'aux Etats-Unis — d'après une conclusion peut-être trop hâtive, il est vrai — le climat méditerranéen qui règne en Californie et même fait tache d'huile plus au nord, entre l'Océan Pacifique et la haute muraille de la Sierra Nevada puis des Monts des Cascades, est d'habitude moins forcené que chez nous en ce qui concerne les averses. Les grandes inondations de ce côté semblent plutôt dues à de longues chutes d'eau arrosant de vastes superficies pendant 24, 48, 72 heures même, qu'à des précipitations brèves et furieuses. Ces phénomènes dans l'ouest nord-américain ressembleraient donc plus à nos déluges océaniques qu'à nos trombes d'eau cévenoles. Et leur date presque exclusivement hivernale, puis l'origine sud-occidentale des vents qui les engendrent, complètent dans une certaine mesure la ressemblance avec nos intempéries pluviales atlantiques comme celles de janvier 1910, ou de décembre 1882 ou 1918, ou de décembre 1947. Mais ces dernières averses, aux lieux de plus forte intensité, sont deux fois, sinon trois fois moins puissantes que celles de Californie, de sorte que là encore les excès pluviaux des Etats-Unis l'emportent de beaucoup sur les nôtres en violence. Ils ne deviennent relativement médiocres que sur les plateaux ou les dépressions intérieures du soulèvement mon-

tagneux occidental, à cause des écrans que tendent les hautes chaînes extérieures vers l'Est comme vers l'Ouest. Encore ces zones abritées, bien qu'à demi ou aux trois quarts désertiques, peuvent-elles éprouver de courts mais sérieux orages locaux qui ont pour suites, si la nature du sol affouillable s'y prête, des laves torrentielles, c'est-à-dire, sur des rigoles de faible longueur, des gonflements subits où figurent autant ou plus de matériaux solides que d'eau, ainsi qu'en maints secteurs de nos Alpes (torrents de l'Embrunais, de la région de Barcelonnette, de la Maurienne, etc...).

B - DÉGATS DES CRUES AUX ÉTATS-UNIS

D'autre part, l'exaspération fréquemment démesurée des crues nord-américaines a, pour l'homme et ses biens, des conséquences plus dévastatrices que dans la plupart des vallées européennes. Car beaucoup de localités ont été créées depuis moins d'un siècle ou de 150 ans, le long de rivières dont, faute d'habitat civilisé précédent, on ne pouvait connaître, ni même pressentir à beaucoup près les plus extrêmes fureurs possibles, surtout dans les régions à demi sèches comme l'avant-pays oriental des Rocheuses ou le Texas. Dans ces zones, encore plus qu'ailleurs, les crues exceptionnelles — celles dont la fréquence moyenne atteint, par exemple, 100 ou 500 ans — peuvent survenir en fait à des intervalles bien plus longs, ou, au contraire, coup sur coup, et, comme en Algérie, dépasser les débits maxima déjà connus et regardés comme imposants, du double, du quadruple, sinon du décuple. Ainsi, sur l'Arkansas Supérieur, à Pueblo, on n'avait pas observé de pointe égale à 1.200 m³/sec. jusqu'au 4. juin 1921, jour où la rivière, à la suite d'une poussée foudroyante, débita 2.800 m³/sec. Il est fort probable que le flot destructeur de 5.500 à 7.300 m³/sec. sur la Republican supérieure et moyenne en mai-juin 1935, égala 8 à 10 fois, sinon plus, les maxima subis jusqu'alors par les riverains de race blanche (1). Dans le Texas, les rapports de ce genre sont moindres, mais encore fréquemment de l'ordre de 2 ou 3.

Lorsque ces cataclysmes se déchaînent, ils surprennent souvent de façon tragique les hommes qui, trop peu méfiants, ont établi leurs maisons dans des zones profondément inondables, même dans les lits fluviaux fréquemment à sec et jugés bien trop amples pour les grosses

(1) Cependant une inondation énorme a peut-être aussi eu lieu dans les mêmes parages en 1844.

crues probables du cours d'eau. Ainsi, avant 1903, dans la grande ville en pleine croissance de Kansas City, on avait jeté 17 ponts dont certains ne mesuraient pas 175 ni même 140 m., sur la Kansas River, dont la largeur naturelle entre berges avoisinait 250 mètres. La crue exorbitante de fin mai 1903, qui a roulé plus de 7.500 m³/sec. contre peut-être pas 3.000 pour le plus gros débit connu auparavant (celui de juin 1844, sans doute formidable n'ayant pu être précisé), a démolit 16 de ces ouvrages et produit dans la ville des dégâts presque inimaginables, les courants de submersion ayant été mis en charge par le resserrement signalé plus haut et par les obstacles artificiels. Ou bien, sur la Muskingum, affluent septentrional de l'Ohio, l'inondation fameuse de mars 1923, dépassant d'environ **5 mètres** les plus hautes cotes précédemment notées lors des crues de 10 à 11 mètres, déjà considérées comme monstrueuses, a surmonté de nombreux pieds les ponts de Zanesville et en a détruit cinq sur sept.

Le cas du Mississippi est encore plus critique, quoique dépourvu de mystère. L'ampleur des grandes inondations a très vite été soupçonnée puis observée dans cette vallée, où les eaux, selon les conditions naturelles d'écoulement, peuvent recouvrir, de Saint-Louis à la mer, une superficie en grande partie richement cultivée, supérieure à l'étendue de la Belgique et de la Hollande réunies, soit 90.000 km² qui effectivement ont été presque entièrement engloutis lors de la crue de 1882, moment où les digues étaient très insuffisantes. Le Mississippi peut donc produire des catastrophes fantastiques, et celle de 1927 restera mémorable.

C - NÉCESSITÉ ET ESPRIT DES RECHERCHES

Contre ces désastres de diverses origines et de types variés par leur genèse et leurs dates, comme par l'allure des variations hydrométriques et la puissance des maxima en débits et en hauteurs, il importait donc absolument de prévoir des moyens de lutte. Les ingénieurs américains ont fort bien et très vite discerné ce que l'on a parfois oublié chez nous, depuis l'époque rappelée plus haut où tant de savantes études ont vu le jour sur les méfaits de nos fleuves : à savoir qu'on ne peut pas organiser un combat rationnel contre les inondations sans connaître aussi exactement que possible leurs modalités et les masses d'eau qu'elles peuvent mettre en jeu. Pour procurer ces renseignements, les extrapolations mathématiques peuvent rendre quelques services, à condition de ne point flotter sur le

vide, et d'être maniées et interprétées avec prudence, et de nombreux hydrologues américains n'en font pas fi. Mais presque tous ont l'idée bien arrêtée qu'il leur faut avant tout déterminer les débits maxima déjà survenus, leurs causes pluviales et nivales, et l'influence des autres facteurs géophysiques, avant d'évaluer les plus redoutables phénomènes à craindre dans une région. Et pour étudier tous ces éléments du problème, ils déploient une activité aussi sagace et minutieuse que débordante et sans doute passionnée. Certes, ils ont le nombre, des crédits, du personnel, du matériel et le soutien de l'opinion publique et du gouvernement que les inondations alertent et préoccupent par la force des choses plus qu'en France. Mais, visiblement, ils considèrent aussi ces questions avec une curiosité devenue rare chez nous, avec une volonté tenace de les résoudre, et avec la certitude que de bonnes investigations d'apparence purement scientifique et désintéressée rendent toujours des services pratiques, en cette matière comme dans la plupart des domaines peut-on dire. L'esprit qui les anime dans ces recherches nous paraît à la fois très sensé et très élevé. Ils agissent à la fois en bons ouvriers et en savants.

Chez eux, la compétence abonde. Une quantité de ceux que nous avons tant de satisfaction à lire connaissent évidemment à merveille maintes lois générales de l'hydrologie. Ils conduisent leurs enquêtes et leurs calculs avec pénétration, raisonnent fort juste et ne se croient pas discrédités scientifiquement si leurs mémoires ne sont point bourrés d'algèbre, à la place de chiffres pluviaux, de débits maxima bien mesurés et de coefficients d'écoulement intelligemment établis et commentés, avec le souci constant de tous les phénomènes qui interviennent et des erreurs à éviter ou à réduire.

Les investigations sont menées dans tout le pays par les ingénieurs civils du GEOLOGICAL SURVEY, en collaboration fréquente avec les INGÉNIEURS DE L'ARMÉE (c'est-à-dire avec les OFFICIERS DU GÉNIE). C'est même ce corps militaire qui a la haute main sur la grandiose organisation que forme la MISSISSIPPI RIVER COMMISSION, dont le siège se trouve à Vicksburg, où fonctionne un célèbre laboratoire d'hydraulique. En outre, divers pouvoirs locaux ou régionaux se livrent à des études hydrométéorologiques de premier ordre. Signalons d'abord l'admirable TVA (TENNESSEE VALLEY AUTHORITY), fixée à Knoxville, et qui a mené à bien l'aménagement presque intégral du Tennessee

et de ses principaux affluents pour la force hydroélectrique (26 réservoirs contenant **27 milliards** de m³, 1.750.000 Kw. de puissance installée) et la navigation, en même temps que la rénovation de l'agriculture dans ce bassin ; puis le MIAMI CONSERVANCY DISTRICT, de Dayton (Ohio) et le MUSKINGUM CONSERVANCY DISTRICT de Zanesville. Ces deux derniers organismes ont réalisé, après en avoir mûri les plans avec une minutie patiente et une largeur exceptionnelle de vues, des systèmes importants de barrages-réservoirs, destinés à prévenir le retour de désastres comparables à ceux de mars 1913 dans les vallées en question (5 barrages en terre et 1.040.000.000 m³ retenus dans le domaine de Miami, 14 ouvrages avec une capacité de 1.630.000.000 m³ pour la Muskingum).

D - JAUGEAGES

Donc, lorsqu'une grande inondation se déclenche, les hydrologues américains déploient tout leur zèle pour la jauger à des cotes variées dont l'une ou plusieurs aussi proches que possible de la pointe. La chose est toujours possible pour le Mississipi qui, dans son cours inférieur, met plus d'un mois pour atteindre son maximum et des temps de même ordre pour redescendre à son niveau normal. De fait, la MISSISSIPPI RIVER COMMISSION procède, lors des années marquées par de grandes crues, à un nombre stupéfiant de mesures. En 1937, elle en fit 180 à Vicksburg, de 50 à 150 à d'autres échelles ; à Vicksburg, en janvier et février, 52 opérations, soit 5 jours sur 6 en moyenne. Et pourtant il s'agissait de débits énormes dont beaucoup étaient compris entre 40.000 et 60.000 m³ sur des largeurs dépassant un kilomètre, avec des

profondeurs moyennes de 15 à 21 mètres et des vitesses moyennes de 2 mètres à 2 m. 50 et plus. En ces cas, on mesure généralement la vitesse aux quatre sixièmes de la profondeur, et on applique ensuite, pour obtenir les vitesses moyennes, des coefficients de réduction, déduits de jaugeages complets, c'est-à-dire en toutes profondeurs, aux mêmes lieux, coefficients variables d'ailleurs selon les débits et les vitesses.

De la sorte, on peut calculer les débits de chaque jour, non d'après des courbes moyennes, $Q = f(h)$ applicables à une année entière ou à un groupe d'années, mais d'après des courbes valables seulement quelques jours, et sans cesse modifiées à mesure que se succèdent les mesures. Précaution non inutile, car les fonds varient beaucoup durant les crues, et à diverses stations, les débits croissants sont sensiblement plus forts que les débits décroissants, même aux lieux où, comme à Vicksburg, le fond moyen s'exhausse de plusieurs mètres (jusqu'à 6) pendant les montées pour revenir à un niveau voisin de celui d'auparavant vers la fin des baisses hydrométriques. Car la diminution des profondeurs et des sections mouillées est en ce point plus que compensée, lors du mouvement ascensionnel, par une augmentation de pente superficielle, tandis que durant les descentes la déclivité doit tomber au-dessous de sa valeur normale.

Lorsque les variations du plan d'eau sont rapides, les ingénieurs américains, très vite alertés, parviennent encore fréquemment à mesurer de très gros débits, tellement sont grands leurs moyens, et certainement aussi leur vouloir. Citons certains débits jaugés lors de crues exceptionnelles, et les débits maxima déduits des courbes prolongées.

Date	Rivière	Station	Plus gros débit jaugé en m ³	Maximum en m ³
Mars 1936	Susquehanna	Harrisburg	17.400	20.900
id.	id	Danville	7.050	7.080
id.	Marrimack	Lowell	4.160	4.900
id.	Ohio	Sewickley	15.350	16.250
id.	Connecticut	Thompsonville	7.850	7.990
id.	Potomac	Washington	13.400	13.700
Janvier 1937	Ohio à diverses stations		Les maxima, dont celui de 52.500 m ³ à Metropolis, ont été jaugés	
id.	Mississipi à toutes ses stations		Tous les maxima ont été jaugés	
Juin 1935	Colorado du Texas	Austin	13.500	13.600

A ce propos, nous rapporterons une anecdote significative. Le 19 mars 1936, l'ingénieur chargé des jaugeages à Washington reçut l'ordre de mesurer à tout prix le débit maximum du Potomac, dont la crue approchant de son apogée devait égaler ou battre le record déjà colossal de juin 1889. Opération nécessaire à tenter sur un pont de la capitale, car partout en amont les ouvrages étaient emportés, ou surmontés, ou rendus inaccessibles par la rupture de leurs voies d'accès. Le technicien s'exécuta, et parvint à jauger, presque en toutes profondeurs, malgré la violence du courant (environ 4 mètres en moyenne), les tourbillons causés par les piles, et les épaves volumineuses (débris de maisons, de ponts, cadavres de vaches, etc.), un débit très proche de la pointe (voir au tableau précédent). Deux moulinets furent emportés par les flots. Mais l'objectif fut atteint avec une approximation sans doute meilleure que 10 %. Et ce résultat fut d'importance : il révéla que le fleuve avait débité jusqu'à 13.700 m³, tandis que précédemment on attribuait 9.000 m³ ou un peu plus à la crue de 1889 seulement égalée (1) en définitive à Washington par celle de 1936. En même temps ce jaugeage héroïque permit de compléter, avec une exactitude suffisante, les courbes pour les stations d'amont, compte tenu des surfaces intermédiaires, des temps de montée, des chutes d'eau, etc. (voir plus loin).

**E - EXTRAPOLATION DES COURBES
EMPLOI DES FORMULES DE VITESSES**

Ainsi, pour beaucoup de stations, les ingénieurs yankees peuvent employer des courbes extrapolées sur des secteurs petits ou insignifiants par rapport aux longueurs expérimentales. Ou même, ils n'ont pas besoin de recourir à ces porte-à-faux. Cela confère aux chiffres dont ils font état pour les maxima des crues une véracité peu usuelle chez nous. Ou tout au moins, leurs incertitudes sont réduites à des pourcentages très supportables (2).

(1) Ces maxima représentent à Point of Rocks, un peu en amont, quelques 540 lit. sec. par km², chiffre énorme étant donné l'étendue de la surface réceptrice : 25.000 km². A Hancock, à l'amont, le flot de 1936, très supérieur à celui de 1889, représente 9.625 m³, soit, pour 10.550 km², 912 lit. sec. par km², phénomène plus terrible encore que la crue de la Garonne à Toulouse en juin 1875 à l'issue d'une étendue analogue.

(2) Les Américains emploient encore les moulinets Price-Curley à axe vertical ; les Européens préfèrent de beaucoup, et pour des raisons qui nous semblent bonnes, les moulinets à axe horizontal. Nous nous permettons de soupçonner ici un très léger défaut des mesures américaines. Mais il est compensé amplement, nous semble-t-il, par le soin avec lequel sont conduites les expériences, et rectifiées au besoin leurs résultats.

Dans les cas forcément très nombreux où les parties incertaines des courbes ont une grande extension, les prolongations satisfaisantes exigent beaucoup de travail et de science. On opère outre Atlantique, non en déterminant les gros débits d'après l'équation du segment connu, ni en prolongeant celui-ci par la tangente comme on le fait trop chez nous, mais par divers procédés qui se trouvent presque tous être ceux que nous recommandons et appliquons dans nos études depuis longtemps. Ils ne fournissent de garanties d'approximation convenable que moyennant l'examen approfondi de tous les éléments locaux ou généraux du problème.

En ceci, les Américains sont des maîtres actuellement inégalés ; et les explications qu'ils fournissent fréquemment sur la souple application de leurs méthodes nous paraissent presque toujours très probantes et rassurantes.

Une spécialité où ils paraissent de nos jours sans rivaux est l'emploi des formules de rugosité, du genre de celle de Chézy (Slope area method), ou de la formule de la dénivellation brusque (« remous » ; « contracted opening », « drop-off ») pour le calcul des débits maxima non jaugés, forcément très nombreux ; car les praticiens ne peuvent se multiplier ni surgir en tous lieux vers le moment où passent les plus hautes eaux des rivières à variations très rapides.

Donc peu de temps et souvent aussitôt après les grandes crues, dans les secteurs où les jaugeages manquent (rivières torrentielles de l'ouest ou du Texas notamment, ruisseaux de toutes les parties du pays), les gens du GEOLOGICAL SURVEY arrivent, longent les rivières, interrogent les habitants et examinent les traces laissées par les eaux. Ils nivellent sur chaque rive de nombreux points qui permettent de tracer les lignes moyennes des pentes superficielles produites lors des maxima. Ils choisissent si possible des sections rectilignes et homogènes en largeur et en pente de l'amont à l'aval. Lorsqu'ils ont trouvé un bon parcours fluvial de ce genre ils y relèvent plusieurs sections mouillées, à faibles distances les unes des autres, puis ils font les calculs. Avant 1930 ou 1925, ils accordaient le plus de faveur à la formule de Ganguillet et Kutter. Maintenant ils emploient surtout celle

de Manning : $V_m = \frac{1,486}{n} R^{2/3} I^{1/2}$ (en unités anglo-saxonnes) pas beaucoup plus aléatoire que la précédente et bien plus simple. Le coefficient n applicable à chaque section est

celui qu'on prendrait pour la formule de Ganguillet et Kutter, et qui ne donnerait pas d'ailleurs avec celle-ci un résultat identique pour la vitesse.

Les Américains ont un flair tout spécial pour le choix de ces coefficients. Ils s'efforcent de les déduire de cas plus ou moins semblables où les débits connus par des jaugeages directs ont permis de déduire n . D'autre part, frappés comme on l'est toujours devant les chiffres expérimentaux de ce genre par la variation des coefficients en un même lieu lorsque les débits changent (1), ils ont adopté, pour réduire ces fluctuations et pour obtenir plus d'exactitude, un moyen qui semble efficace. Lorsque sur deux sections successives et proches, la seconde est plus petite que la première, ils évaluent la perte de charge qui découle de ce rétrécissement et corrigent en conséquence le chiffre de la pente à inscrire dans la formule. Au cas contraire, une correction inverse est appliquée, mais seulement pour moitié du gain, de manière à tenir approximativement compte de la dissipation d'énergie en turbulence.

La formule de dénivellation brusque sous les ponts, bien moins aléatoire si h a pu être correctement mesuré, est très en faveur outre-Atlantique. On y emploie aussi les formules du déversoir, moins sûres jusqu'à présent lorsque la lame d'eau sur le seuil est très épaisse.

Dans les enquêtes les meilleures, on opère ces calculs à des postes nombreux d'une rivière principale et de ses affluents (Miami River après mars 1913) ; et partout où l'on applique la « slope area method », on prend les moyennes des débits calculés à plusieurs profils rapprochés de la même station. Lorsqu'il y a discordance entre les débits des stations échelonnées de l'amont à l'aval, on rectifie les chiffres les plus suspects de manière à les rendre compatibles avec ceux qui inspirent le plus de confiance. Cet accord doit jouer surtout, compte tenu des écoulements intermédiaires constatés ou évalués, pour les volumes totaux, car les pointes souvent s'aplatissent. Et si certains éléments de cet ensemble cohérent se trouvent confirmés par de bons jaugeages, ou par d'autres indices, les

chiffres connexes bénéficient en gros de la vérification (1).

F - ÉTUDE DES PLUIES

Pour parvenir à plus d'exactitude, on tâche que les débits soient justifiés par les chutes d'eau ou par les fusions nivales, sous réserve de déficits causés par l'évaporation, la rétention souterraine, etc... On accorde donc beaucoup d'attention aux quantités de neige disponibles avant et après les crues, et surtout aux averses.

Et l'on a remarqué que, pour expliquer certains débits extravagants, il fallait admettre, surtout lors des pluies torrentielles du type **cloudburst**, des chutes locales bien plus intenses que celles recueillies aux pluviomètres trop clairsemés. Les hommes du GEOLOGICAL SURVEY parcourent donc, après l'événement, les zones très arrosées, ils interrogent les habitants, les fermiers surtout. Et ils obtiennent des données souvent nombreuses et précises sur les quantités de pluie constatées dans tels ou tels récipients et sur la durée des averses, sur les vents, les phénomènes électriques connexes, etc... Très souvent ces recherches donnent des indications très utiles et d'un haut intérêt scientifique. D'ailleurs, d'accord avec le WEATHER BUREAU, on accroît le plus possible le nombre des pluviomètres, surtout dans les régions de riche agriculture exposées à des submersions graves. On utilise encore les relevés aux pluviomètres enregistreurs, bien plus nombreux qu'en France, dans le bassin en question ou au voisinage, pour établir la chronologie de l'averse et la répartition de son total moyen, par périodes d'une ou de plusieurs heures. Ainsi, on explique bien mieux les particularités des crues.

G - COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT

Lorsqu'on connaît bien les chiffres relatifs à la pluie, augmentée ou non par les produits de la fonte des neiges, on se livre à des calculs variés sur les rapports entre les précipitations et

(1) $\frac{1}{n}$ décroît lorsque I augmente considérablement et aussi lorsque les transports solides deviennent très considérables ; et les corrections rendues indispensables par ces phénomènes ne peuvent être satisfaisantes que lorsqu'on procède par voie d'analogie, ce qui est le cas fréquent aux Etats-Unis.

(1) En France, après la crue désastreuse de septembre 1866, le grand Ingénieur Sainjon a établi pour la Loire, vers Orléans, des courbes exprimant les débits par des équations du type $Q = m h^{1/2}$, ces courbes étant basées elles-mêmes sur la formule de Chézy. Partant de ces bases, et tenant compte de divers facteurs, et notamment des retenues sur le champ d'inondation, il a dressé d'autres courbes, pour tout le cours moyen et inférieur, puis pour les bas tronçons des affluents. Tous ces chiffres impliquent des volumes totaux cohérents, bien qu'ils comportent des maxima s'abaissant de 9.800 m³ au Bec d'Allier à moins de 5.000 à Nantes en octobre 1846. De bons jaugeages récents ont vérifié les parties hautes de ces tracés vers Saumur et vers Nantes, à 5 ou 10 % près, ce qui implique la confirmation des dessins à toutes les autres échelles.

les crues. On détermine les coefficients d'écoulement de celles-ci, de manière à prévoir quels volumes totaux résulteraient en telle ou telle saison des averses logiquement à craindre sur un bassin dont les caractéristiques géophysiques ont été bien analysées. On cherche quels facteurs influent sur ces bilans et dans quelle mesure. Certains auteurs, par la méthode des **unit-hydro-graphs** due à L. K. Sherman et à Merrill M. Bernard, déterminent quels pourcentages des volumes totaux passent à chaque station étudiée dans des temps successifs de durée égale ; par exemple le premier jour depuis le début de l'averse, le deuxième, ou bien le premier, le second groupe de 12 ou de 6 heures, etc... Et d'après ces proportions, on évalue quels débits maxima seraient les conséquences de diverses précipitations donnant lieu à tel ou tel vraisemblable coefficient d'écoulement.

Notons que dans le calcul du volume total, les ingénieurs du GEOLOGICAL SURVEY retranchent, comme nous le faisons d'après divers procédés, les débits qui se seraient écoulés, même si la crue n'avait point eu lieu, et qui ont pour cause la « queue » d'une intumescence précédente ou les eaux infiltrées lors d'une pluie préparatoire, ou de l'averse décisive, et qui commencent à ressortir par les sources. En certaines monographies, on essaie de distinguer ce qui, dans ce « débit de base » à soustraire, provient des eaux souterraines. L'étude des coefficients ou des déficits d'écoulement de crues aide à vérifier les débits obtenus au moyen de jaugeages et d'extrapolations appuyées sur l'usage des formules. Et elle fournit des précisions capitales sur le fonctionnement des réservoirs existants ou projetés, en certaines circonstances prévisibles.

H - EXACTITUDE DES RÉSULTATS

Les auteurs s'attachent en général à discerner les causes météorologiques des phénomènes : dépressions, anticyclones, fronts chauds ou froids. On peut ainsi, dans une certaine mesure, prévoir quelles situations atmosphériques sont susceptibles de provoquer de dangereux afflux en une région donnée.

De toutes façons, les débits exceptionnels à craindre dans les diverses régions des Etats-Unis commencent à être bien connus. Ici nous devons formuler un jugement sur la valeur de ces chiffres.

Certains auteurs attribuent aux formules et

aux extrapolations caractérisées brièvement plus haut, une exactitude intrinsèque, presque absolue, qu'elles ne sauraient offrir. D'autres, très nombreux chez nous, ne leur accordent pour ainsi dire aucun crédit. Cette opinion provient d'abord de facteurs peu évitables, et qui sautent aux yeux, d'inexactitudes partielles, notamment sur les calculs de la pente, de la section mouillée lors des maxima, sur le choix des coefficients. Elle a aussi pour base le fait que, dans notre pays, on n'essaie pour ainsi dire plus, faute de crédit, de temps ou par indolence, d'exécuter de telles études, et que partout on est tenté, à son insu, de légitimer cette abstention en dédaignant les méthodes.

Mais en ce domaine la négation est aussi peu fondée, aussi mal raisonnée que la foi aveugle. Nous n'hésiterons pas à affirmer qu'elle s'explique en partie par l'ignorance hydrologique. Ceux qui lisent sans parti-pris les rapports américains sur ces recherches et qui connaissent les relations admissibles entre les précipitations et les débits, ne peuvent qu'être impressionnés et convertis par la vraisemblance des maxima et des volumes liquides obtenus grâce aux calculs ici discutés. En particulier, les coefficients d'écoulement dont ces recherches gratifient la Miami River à Dayton et à Hamilton, lors de la crue fantastique de mars 1913, à savoir 90 et 86 %, ne peuvent qu'entraîner l'adhésion. Du moins est-il fort invraisemblable, pour tout hydrologue averti, que ces volumes soient exagérés de plus de 5 à 10 % à Dayton, et de plus de 5 % à Hamilton, étant donné la puissance du cataclysme qui engendra le phénomène (243 mm. sur la Miami du 23 au 27 mars), puis la date, les températures, et la saturation préalable du sol. Et souvent des jaugeages directs ont vérifié suffisamment les chiffres qu'on avait précédemment avancés d'après des calculs indirects. Mais évidemment ceux-ci ne peuvent inspirer confiance qu'à condition d'être effectués, non par emploi mécanique des formules, mais avec doigté, par des gens assez sagaces et érudits, et au besoin intuitifs, pour comprendre ou pressentir que tel ou tel chiffre est acceptable ou suspect, pour deviner et déceler les causes éventuelles d'erreurs et pour pratiquer les rectifications nécessaires lorsque cela se peut.

I - PUBLICATIONS

Les études que nous venons de définir et de commenter donnent lieu à des publications de plus en plus nombreuses. Les unes sont des arti-

cles d'actualité, déjà très scientifiques, de la **Monthly Weather Review**, ou de l'**Engineering News Record**, puis des monographies spéciales du **Weather Bureau**, et surtout des **Water Supply Papers** édités par la **Geological Survey** ⁽¹⁾. Citons en ce genre les W. S. P., N^{os} 798, 799 et 800 consacrés à la crue de mars 1936 dans le Nord-Est appalachien (records battus sur l'Ohio supérieur, le Connecticut, le Merrimack, la Mohawk, la Susquehanna, la James), œuvres puissantes, de 466 + 380 + 351 pages ; le W. S. P. N^o 838, aussi monumental (746 pages) en son genre et qui étudie la crue inouïe de l'Ohio, en janvier 1937 (24 m. 40 à Cincinnati, record antérieur pourtant formidable surpassé de 3 m. 15 à Louisville, 52.500 m³ à Cairo).

Des **Water Supply Papers** plus anciens analysent les inondations fameuses de mai-juin 1903 sur le Missouri, la Kansas River et le haut Mississippi, et la catastrophe terrible (plus de 600 morts) de mars 1913 dans le bassin de l'Ohio. Puis des ouvrages de la même famille, mais plus riches en données sur les débits (N^{os} 796-G et 796-B) étudient les crues du type **cloudburst** arrivées en mai et juin 1935 sur la haute République, vers les mêmes dates au Texas ⁽²⁾ et en juillet suivant dans les Etats de New-York et de Pennsylvanie.

Encore plus fouillées et admirables sont les deux épaisses monographies rédigées sur les crues californiennes de décembre 1937 (N^o 843, 497 pages) et mars 1938 (N^o 844, 399 pages). Comme beaucoup d'autres, elles résultent du travail en commun de nombreux chercheurs et c'est cette collaboration qui explique leur richesse documentaire.

Mais nous ne faisons que mentionner quelques ouvrages dans une liste considérable. Et il y a déjà plus de 23 ans que le glorieux **Miami Conservancy District** a fait paraître ses livres mémorables, parmi lesquels :

— **Calculation of flow in open channels**, par Ivan E. Houk (1918, 283 pages).

— **Rainfall and Runoff in the Miami Valley** (1921, 234 pages), par le même auteur.

— **Hydraulics of the Miami Flood Control**

Project, par Sherman M. Woodward (1920, 343 pages) et **Storm Rainfall of Eastern United States** (1917, 310 pages). Ce dernier ouvrage, qu'une réédition a porté à 352 pages en le mettant à jour jusqu'en 1932 inclusivement, étudie les surfaces couvertes dans l'intervalle de chaque isohyète en 1, 2 ou plusieurs jours consécutifs, pour les **160 plus grandes averses cycloniques arrivées** ⁽¹⁾ sur tout le territoire situé à l'Est des Rocheuses depuis l'origine des observations. En outre, ces phénomènes et leurs effets sont succinctement mais suffisamment expliqués et décrits. Et des comparaisons sont présentées avec les crues européennes.

On signalera encore les Annuaires de tous les jaugeages exécutés par la **Mississippi River Commission**, avec indication des sections mouillées, des largeurs, des profondeurs, des vitesses. Puis, pour revenir aux **Water Supply Papers** du **Geological Survey**, des volumes qui visent plus qu'à la description d'une crue : par exemple, le W. S. P. N^o 915 (1947, 137 pages), examine avec un sens critique très éveillé les relations entre pluies tombées ou neiges fondues et lames d'eau écoulées **lors de crues remarquables, les unes hivernales et les autres de saison chaude, dans les Etats de New-York et en Pennsylvanie**. Le W.S.P. N^o 996 (1947, 158 pages), expose les **caractères géologiques de la Vallée du Connecticut en rapport avec des crues récentes**. Dans cette œuvre originale, on arrive à la conclusion, d'après les couches superposées d'alluvions dues aux eaux débordées, que la crue géante de mars 1936 (pluie sur neige) presque égalée par celle de septembre 1938 (cyclone tropical remontant jusqu'à la Nouvelle Angleterre) est probablement la plus formidable qui ait atteint les rives du Connecticut depuis des centaines d'années. Les recherches du **Miami Conservancy District** et du **Muskingum Conservancy District**, d'après des raisonnements fondés sur les pluies, avaient aussi démontré le caractère tout à fait extraordinaire de l'averse de mars 1913. Cependant, les systèmes modèles de protection exécutés par ces offices ont été conçus de manière à neutraliser des phénomènes supérieurs de 40 % et de 30 % respectivement aux terribles débits causés par cette pluie.

Comme de juste, l'angoisse des plus grandes crues possibles hante les hydrologues américains qui, pour tenter de la résoudre, appellent à leur

(1) Signalons aussi des articles isolés ou des numéros spéciaux entièrement consacrés aux crues dans les **Transactions** de l'**American Society of Civil Engineers**.

(2) Ces **Water Supply Papers** sont particulièrement instructifs par le fait qu'ils exposent avec exemples à l'appui les méthodes de calculs par formules et les précautions prises contre diverses méprises.

(1) La seconde édition de ce livre analyse bien plus de 160 averses.

secours et torturent dans tous les sens les formules mathématiques de probabilité. Sur ce problème, le **Geological Survey** a publié en 1936 un **Water Supply Paper** N° 771, de 497 pages, **Floods in the United States**, sous la direction de Clarence S. Jarvis et où diverses méthodes de calculs sont analysées par le grand hydrologue Robert E. Horton et par Thorndike Saville. Suivant les principes américains, hostiles à toute spéculation sur des données géophysiques vagues ou rares, l'ouvrage présente pour 207 stations les listes des débits maxima de toutes les crues, même petites, observées depuis l'origine des relevés jusqu'à 1934. Une autre série très précieuse de tableaux, compare, pour nombre de rivières, les pointes des plus grosses crues et les débits maxima moyens de 24 heures.

Nous nous flattons que cet aperçu ne laissera aucun doute sur l'intérêt à la fois scientifique et pratique des études américaines relatives aux crues. Nous ne cachons point, pour terminer, qu'elles nous inspirent à la fois un profond respect et de l'enthousiasme. Et nous engageons nos lecteurs à se familiariser avec elles, dans l'espoir que cette découverte et cette fréquen-

tation exciteront en eux des sentiments analogues aux nôtres.

APPENDICE. — Depuis que nous avons rédigé ces lignes, nous avons reçu encore deux **Water Supply Papers** remarquables du **Geological Survey**. L'un (N° 867, Washington 1940, 562 p.) étudie la crue extraordinaire due au cyclone tropical de septembre 1938 en Nouvelle-Angleterre. Cet ouvrage indique les débits et les bilans de l'écoulement à des centaines de postes, et évalue, selon les zones arrosées, les taux horaires d'infiltration pendant l'averse. Le **W. S. Paper** N° 997 « **Floods in Colorado** » (il s'agit de l'**Etat** de Colorado) Washington, 1948, 149 p., 3 fig., 3 pl., est particulièrement intéressant parce qu'il examine près de 90 inondations de **Cloudbursts** et fournit des détails impressionnants sur la violence de ces phénomènes, et notamment sur les « murs d'eau » par lesquels ils débutent en un grand nombre de cas. En outre, on a bien voulu nous envoyer, peu de semaines après l'événement, des détails déjà précis et nombreux sur la crue désastreuse de la Columbia en mai-juin 1948.

