

MODÈLES PHYSIQUES SCHÉMATIQUES POUR L'ÉTUDE DE LA FORMATION DES CRUES A PARTIR DES PRÉCIPITATIONS ET DE LA PROPAGATION DE L'ONDE DE CRUE

par Cl. FABRET et le
Service Hydrologique Centralisateur du bassin de la Garonne

Ph. THORÉ, B. BAYER, A. CASTEX
Ingénieurs à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

Introduction

1. Les services du ministère de l'Équipement et du Logement ont à résoudre les problèmes nombreux, divers et difficiles posés par les crues sur l'ensemble du réseau hydrographique. Qu'il s'agisse de l'annonce des crues ou des projets d'ouvrages pour la défense contre les inondations, on cherche à mettre en évidence les paramètres essentiels intervenant dans la formation et la propagation des crues en vue de mieux connaître leur mécanisme et en tirer des conclusions utiles.

2. Le problème se pose dans les mêmes termes pour la formation des crues à partir des précipitations que pour la propagation de l'onde de crue : le bassin versant ou la section de rivière considéré constitue une « boîte » dans laquelle on introduit une certaine quantité d'eau modulée de façon variable (pluie ou débit à la station amont), quantité d'eau que l'on retrouve à la sortie de la boîte (en tout ou partie) modulée différemment; comment déterminer cette modulation ?

La grande majorité des formules utilisées représentent des phénomènes linéaires, c'est-à-dire que la transformée d'une somme d'impulsions d'entrée est égale à la somme des transformées de chaque impulsion. Nous avons entrepris d'estimer la validité d'une telle hypothèse et d'apprécier l'erreur commise en supposant les phénomènes linéaires, pour en déduire, éventuellement, des corrections ou des méthodes conduisant à une meilleure approximation. Tel est l'objet des modèles physiques que nous présentons.

3. Nous avons voulu donner à ces modèles un caractère aussi général que possible permettant d'étudier des cas très divers. Il ne s'agit donc pas de représenter à échelle réduite un bassin réel, mais, au contraire, de faire varier les caractéristiques du bassin pour montrer leur incidence sur la formation et la propagation des crues. Les modèles utilisés sont donc volontairement schématiques et de formes géométriques simples.

Formation des crues à partir des précipitations

Description du modèle.

Sur une table en béton, d'inclinaison variable, sont disposés vingt éléments carrés de 60 cm de côté, percés de trous de diamètre 0,7 mm. Ces éléments, répartis en cinq rangées indépendantes (que nous désignerons dans ce qui suit par le terme « panneaux ») constituées de quatre éléments chacune, assurent la distribution de la pluie sur le modèle. Le bassin versant est donc plan, rectangulaire (2,40 m \times 3,00 m) incliné selon sa plus grande longueur et reçoit la pluie de bas en haut.

Chaque panneau est commandé par une électro-vanne et alimenté par un bac à niveau constant de hauteur réglable. La répartition du débit dans les quatre éléments de chaque panneau peut être modifiée à volonté par des robinets. La charge appliquée à un panneau est contrôlée par un manomètre.

Présentation des résultats des essais.

1. Au cours de la première série d'essais, que nous rapportons ci-dessous, nous n'avons pas fait intervenir les pertes par infiltration ou évaporation. Les seuls paramètres pris en compte sont :

- la surface S du bassin versant pour laquelle nous avons retenu 5 valeurs correspondant à 1, 2, 3, 4 ou 5 panneaux;
- la pluie par son intensité π et sa durée τ .

2. L'hydrogramme résultant d'une pluie d'intensité constante et de durée infinie se présente de la façon suivante (fig. 1) :

- pendant un délai θ_0 , le débit à l'exutoire demeure pratiquement nul;
- entre θ_0 et θ_1 , l'hydrogramme présente une concavité positive;
- de θ_0 à θ_2 , l'hydrogramme est rectiligne de pente p ;
- à partir de θ_2 la concavité devient négative;
- au-delà de θ_3 , l'hydrogramme est une droite horizontale (régime permanent).

Tous ces paramètres ont été systématiquement étudiés :

- θ_0 ne varie pratiquement pas et semble dépendre essentiellement de la rivière et non du bassin versant;
- θ_1 , θ_2 , et θ_3 sont des fonctions croissantes de S et décroissantes de π ;
- le rapport p/π n'est pas constant et croît à peu près linéairement en fonction de π (dans la plage étudiée).

Pour résumer, on peut dire que lorsque la pluie augmente, il se produit un déplacement de l'hydrogramme vers la gauche du graphique, la transformation étant difficile à définir simplement et avec exactitude (fig. 3). On peut toutefois en donner une approximation sous la forme d'une affinité horizontale dont le rapport serait pour cinq pan-

neaux et en prenant pour base la courbe correspondant à 120 mm/h, de l'ordre de :

- 0,73 pour 250 mm/h,
- 0,55 pour 380 mm/h,
- 0,52 pour 460 mm/h.

Ce rapport varie donc dans de larges proportions surtout pour les faibles pluies.

Au contraire lorsque la surface du bassin versant augmente il y a étirement de l'hydrogramme vers la droite du graphique.

3. L'hydrogramme résultant d'une pluie d'intensité constante π et de durée τ est identique au précédent jusqu'à l'instant τ .

A partir de cet instant τ , il prend une concavité négative et présente un maximum pour $t = \tau + \Delta t$.

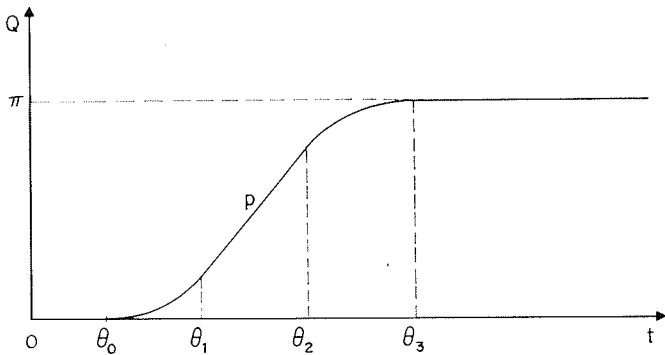
Après le maximum Q_m , la courbe de décroissance prend rapidement l'allure d'une exponentielle (appelons α la sous-tangente).

Si τ est assez petit, Δt reste constant lorsque τ varie (Δt_0).

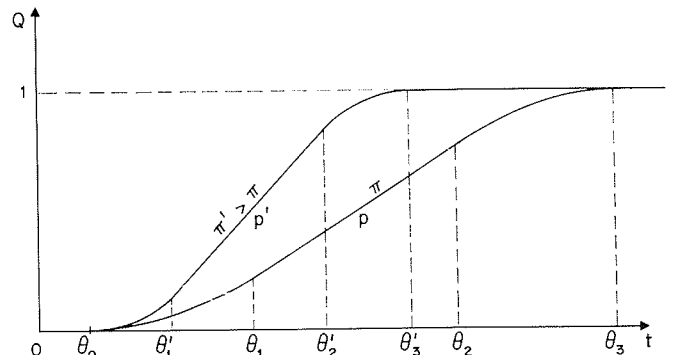
En simplifiant beaucoup on pourrait dire que tout se passe alors comme si une partie seulement du bassin versant participait à la formation du débit maximum. Lorsque τ augmente, cette fraction de bassin versant s'accroît mais, le volume d'eau étant plus grand, les vitesses augmentent également et ceci compense sensiblement cela pour ce qui concerne le temps de concentration de l'eau au maximum de la crue.

Mais lorsque cette fraction de bassin versant devient égale à la totalité du bassin, il se produit un effet de frontière qui se traduit par la décroissance de Δt et par des singularités dans les variations des divers paramètres de l'hydrogramme (fig. 5).

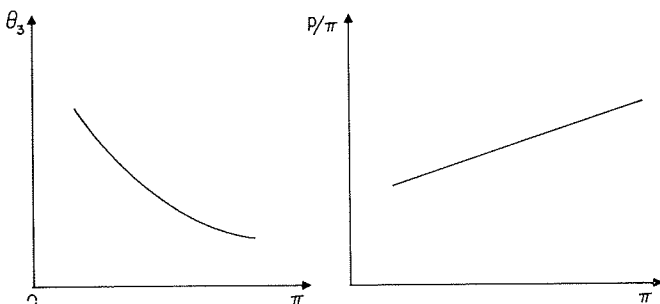
Par ailleurs α est une fonction décroissante de τ et Q_m , proportionnel à π en régime permanent, croît plus vite



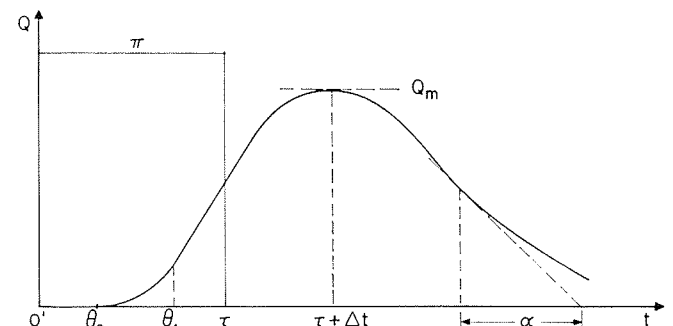
1/



3/



2/



4/

que cette variable pour les valeurs de τ immédiatement supérieures à θ_1 .

4. La valeur moyenne de Δt (10 s environ) lorsque τ est petit, caractérise assez bien le bassin versant du point de vue de la formation des crues et constitue le délai de prévision des débits maximums à partir des précipitations constatées.

Il est donc intéressant d'examiner l'hydrogramme élémentaire correspondant à chaque pluie de durée 10 s isolée, par la pensée, de l'ensemble de la perturbation provoquant la crue. On constate, en particulier que cet hydrogramme est très sensiblement fonction du « rang » de la pluie correspondante (fig. 6) c'est-à-dire du degré de « superposition » des pluies (non linéarité des phénomènes).

Propagation de l'onde de crue

Description du modèle *

Long de 48,50 m, le canal a une section trapézoïdale. Le fruit des berges est égal à 2, la pente longitudinale est de 0,655 ‰ et la largeur au radier 16,67 cm.

Il est constitué par des éléments en matière plastique de 3 m de longueur assemblés bout à bout et reposant sur une armature de cornières perforées. Des pertuis ont été implantés tout au long du canal pour représenter « l'encombrement » du lit d'une rivière.

L'alimentation du canal est assurée par une conduite qui prélève l'eau dans un réservoir à niveau constant.

L'installation fonctionne en circuit fermé.

Présentation des résultats des essais.

1. La première série d'essais a consisté à comparer, pour trois configurations différentes du canal, et pour trois crues

* L'acquisition des données et leur traitement a été assuré grâce aux programmes rédigés et mis au point notamment par MM. Manou et Carryon de l'équipe de traitement en temps réel dirigée par M. Jean.

amont, l'onde de crue effectivement enregistrée à l'aval avec l'onde de crue reconstituée à partir des réponses (enregistrées) à des impulsions positives (accroissement du débit) et négatives (diminution du débit). L'onde de crue a été enregistrée en plusieurs points du canal de façon à ce qu'on puisse suivre sa déformation.

2. Pour caractériser la réponse à une impulsion positive (courbe IP) ou négative (courbe IN) nous avons retenu les paramètres suivants (fig. 7) :

- t_0 est l'instant auquel on constate, à l'aval, la première manifestation de l'impulsion amont;
- t_1 est l'abscisse du point d'inflexion lorsqu'il existe;
- t_2 est l'instant auquel le régime permanent est rétabli;
- a est la sous-tangente au point d'inflexion comptée sur l'horizontale d'ordonnée $Q_0 + \delta Q$.

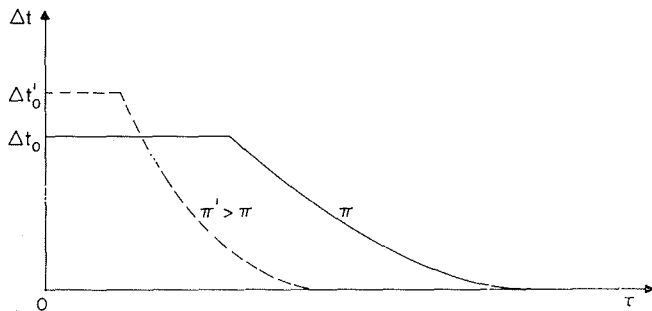
Nous avons étudié les variations de ces paramètres en fonction :

- du nombre n de pertuis (4, 8 ou 16);
- de la longueur de canal prise en compte, mesurée par l'abscisse x de la jauge comptée à partir de l'amont ou par le numéro j de cette jauge.

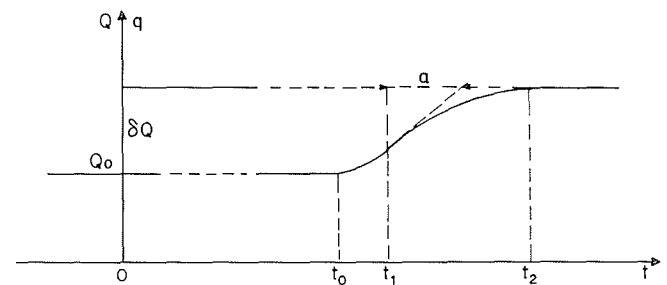
Nous avons fait également une comparaison des résultats obtenus pour des impulsions positives et des impulsions négatives, puis nous avons examiné l'influence de l'amplitude de l'impulsion amont.

3. t_0, t_1, t_2 sont des fonctions croissantes de x et n : lorsque x ou n augmente il y a étirement des courbes IP et IN comme l'indique la figure 8.

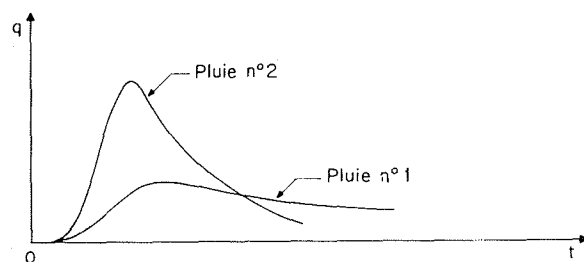
Nous noterons que la réponse à une impulsion négative est (au signe près) très voisine de la réponse à une impulsion positive pour ce qui concerne les paramètres t_0 et a . Mais t_2 est plus grand pour les courbes IN que pour les courbes IP.



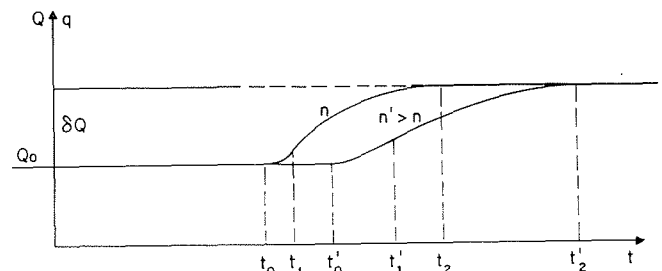
5/



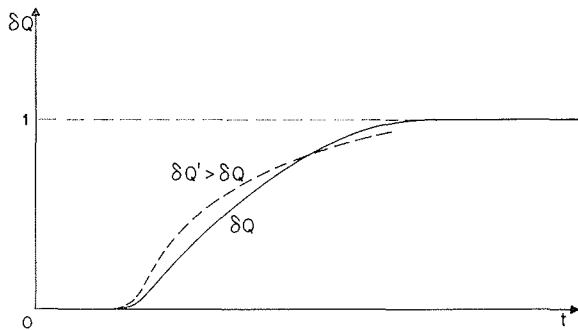
7/



6/



8/



9/

4. Les courbes IP se déforment lorsque l'amplitude δQ de l'impulsion augmente (fig. 9) et la transformée d'une impulsion de grande amplitude n'est pas parfaitement représentée par la superposition des courbes IP élémentaires.

En d'autres termes, la transformée de la somme de deux impulsions n'est pas égale à la somme des transformées.

5. En ce qui concerne la propagation des crues proprement dites nous noterons les points suivants.

L'abscisse du maximum de la courbe reconstituée est, en général, sensiblement égale à celle du maximum de la courbe réelle.

Mais, en ce qui concerne l'ordonnée de ce maximum, on enregistre une erreur systématique par défaut, de l'ordre de 10 à 15 %.

De plus, la montée des eaux est assez bien reconstituée mais la décrue est, comme le maximum, estimée par défaut au voisinage de ce dernier, puis par excès en fin de crue.

Ces écarts sont évidemment à rapprocher de la variation de la réponse à une impulsion positive en fonction de son amplitude δQ .

Il y a lieu de tenir compte, pour le calcul de l'onde de crue aval, de la pente de l'onde de crue amont pour le choix des courbes IP à prendre en compte. A chaque débit de base Q_0 , il correspond une limite des courbes IP expérimentales lorsque l'amplitude δQ de l'impulsion amont tend vers zéro et qui caractérise le lit de la rivière à ce niveau.

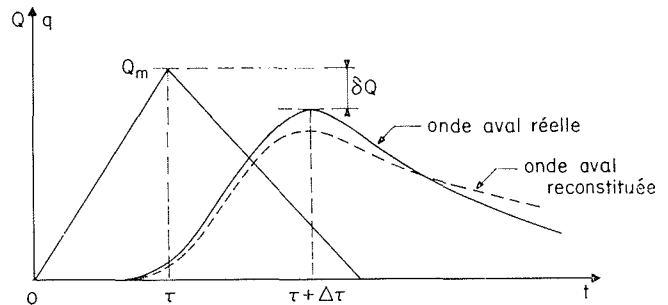
Mais, lorsque δQ croît, ou bien, ce qui revient au même lorsqu'on superpose des impulsions (avec un décalage inférieur à t_2), les courbes IP se déforment dans le sens d'une augmentation de la pente au voisinage de t_1 .

6. Par ailleurs, le temps de propagation $\Delta\tau$ du maximum de l'onde de crue et l'atténuation δQ du débit maximum (fig. 10) sont des fonctions croissantes du nombre de pertuis et de l'abscisse x .

Mais, pour une configuration donnée du canal et en un même point, $\Delta\tau$ n'a pas la même valeur pour toutes les crues qui ont pourtant le même débit maximum et, pour certaines séries d'essais le même volume. La forme de l'onde de crue amont a donc une influence sensible sur $\Delta\tau$: au cours de son déplacement l'onde se « redresse » et tend à devenir plus symétrique au voisinage de son sommet.

Transposition aux bassins versants réels

Parmi les procédés susceptibles de permettre cette transposition, celui sur lequel nous comptons le plus et qui nous a guidés dans nos essais ne nécessite pas la reproduction sur le modèle du phénomène réel : il s'agit de dégager une



10/

méthode d'analyse des hydrogrammes grâce à la possibilité qu'offre le modèle de réaliser à peu près n'importe quelles conditions et par conséquent de voir l'importance et l'influence de tel ou tel paramètre. Armés de cette méthode d'analyse, nous espérons parvenir, grâce à quelques hydrogrammes enregistrés sur le bassin réel, à détecter les paramètres essentiels qui permettraient ensuite de reconstituer la plupart des phénomènes susceptibles de se produire sur ce même bassin.

Par exemple, connaissant grâce aux essais sur modèle, le sens de la variation des paramètres tels que Δt , p , α , etc., il est possible de dégager sur des enregistrements de crues réalisés sur tel bassin, les valeurs approximatives de ces paramètres qui, en quelque sorte, résument les caractéristiques hydrologiques du bassin. Au lieu de se trouver en présence d'un nombre infini de paramètres tels que la surface du bassin versant, sa forme, sa pente moyenne, sa rugosité, sa couverture végétale, sa géologie, etc., on a, en main, un « condensé » du bassin versant permettant de reconstituer les phénomènes hydrologiques essentiels.

De la même façon la connaissance de la réponse à une impulsion à l'aval d'une section de rivière résume ce qui se passe entre les deux stations de sorte qu'il n'est même pas utile d'analyser la configuration de cette section de rivière.

Conclusions provisoires

1. Les modèles que nous avons utilisés et les essais que nous avons réalisés ne couvrent pas l'ensemble des problèmes qui se posent à l'hydrologue en matière de formation et de propagation des crues; il s'en faut de beaucoup.

En ce qui concerne la formation des crues, nous avons laissé totalement de côté le problème de l'infiltration qui, non seulement affecte le volume d'eau ruisselé, mais encore a une influence sur la forme des hydrogrammes. A volume égal, ceux-ci n'ont pas, en effet, la même allure selon l'état de saturation du sol. Nous avons également travaillé avec un bassin versant de pente et de rugosité constantes et la rivière est restée inchangée pour tous les essais. Sur le deuxième modèle nous n'avons pas non plus étudié des phénomènes essentiels tels que l'effet du champ d'inondation et de la variation de la pente du canal.

De plus, ces modèles sont de véritables « caricatures » de bassins versants et de rivières. Les pluies réalisées sont très fortes, les différences de niveaux constatées entre l'amont et l'aval de la section de rivière sont énormes.

2. Ils ont cependant montré qu'il fallait manipuler les schémas linéaires avec beaucoup de prudence, ce qui ne veut pas dire qu'il faille abandonner de tels schémas, bien

au contraire, car ils sont d'une grande commodité. Mais il est nécessaire de leur apporter des corrections surtout lorsqu'on étudie des cas exceptionnels du point de vue de l'intensité de la pluie ou de la rapidité de montée des eaux.

Ces modèles ont également permis d'approcher une méthode d'analyse des données hydrologiques qu'il s'agit de préciser.

3. *La prochaine série d'essais* aura la même orientation que la première mais sera plus complète.

Le modèle d'étude de la formation des crues à partir des précipitations sera agrandi et de nombreux paramètres interviendront : rugosité et pente du bassin versant et de la rivière, forme du bassin pour une surface donnée, répartition spatiale de la pluie, infiltration, etc. C'est d'ailleurs en vue de l'étude de l'infiltration que le procédé de

représentation de la pluie par arrivée d'eau de haut en bas a été choisi, car la mise en dépression des ajutages à la fin de la pluie permettra de réaliser cette infiltration.

Quant au modèle de propagation de l'onde de crue, il sera aménagé pour l'étude de l'effet du *champ d'inondation* sur la déformation et l'atténuation de l'onde. L'influence de la pente du canal sera également analysée.

4. En conclusion, et pour simplifier, nous dirons que l'objectif est de « fabriquer » et de propager des crues dans les conditions les plus diverses pour faire apparaître le plus grand nombre possible de phénomènes, les étudier sur des hydrogrammes enregistrés et non pas imaginés, en vue de concevoir une technique d'analyse que l'on appliquerait sur les hydrogrammes de bassins réels. Nous voulons apprendre à « lire » dans les données hydrométéorologiques.

Discussion

Président : M. J. ESTIENNE.

M. le Président remercie M. FABRET dont l'exposé venant après les développements mathématiques entendus hier, nous a paru « rafraichissant » car il nous a ramenés à l'aspect physique de l'écoulement. Il souligne l'intérêt du type d'analyse présenté par M. FABRET pour les ingénieurs appelés à orienter les études d'avant-projet; à ce stade, certaines méthodes classiques de l'hydraulique sont trop onéreuses et exigent trop de temps. Ne serait-ce qu'à ce titre, ce genre de recherche mérite d'être encouragé.

M. le Président ouvre ensuite la discussion.

« Au moment où M. FABRET est venu nous proposer l'étude en collaboration de la propagation des crues, dit M. THIRRIOT, j'ai proposé d'utiliser les canaux existant dans notre laboratoire en créant un allongement artificiel par distorsion et en localisant les pertes de charge dans des diaphragmes dont on peut régler l'ouverture et donc la loi de débit. En somme, cela revient à distinguer l'effet d'accumulation de l'effet de transmission (la conductance hydraulique étant pratiquement réglée par l'ouverture des diaphragmes et leur nombre). Le phénomène d'accumulation est déjà représenté par le remplissage des biefs. L'influence relative de l'accumulation par rapport à la dissipation d'énergie est modifiée par la variation du nombre de diaphragmes ou de leur distance. »

M. REMENIERAS confirme l'intérêt pour les problèmes de propagation de ce genre de modèle réduit « à distorsion » (à deux ou même trois échelles, celle des longueurs, celle des largeurs et celle des hauteurs). Des modèles distordus à deux échelles — l'une pour les dimensions en plan, l'autre pour les hauteurs — ont été largement utilisés avec succès par le laboratoire de Beauvert de la S.H.F., entre 1940 et 1945, pour l'étude de la propagation des longues intumescences produites par les éclusées des usines hydro-électriques (étude parrainée par le Ministère des Travaux Publics).

Les pertes de charge « concentrées » étaient matérialisées non par des diaphragmes qui ont l'inconvénient de donner une perte de charge de la forme KU^2 (U étant la vitesse moyenne de l'eau dans le bief considéré), mais par des pertuis profilés fonctionnant plus ou moins en déversoirs noyés; il est possible de calculer puis d'ajuster expérimentalement le profil de ces pertuis — réalisés en tôle mince — de façon à reproduire exactement la loi $Q = f(z)$ donnant l'altitude du plan d'eau z en fonction du débit Q, telle qu'elle a été relevée dans la section homologue du cours d'eau représenté sur le modèle.

Il faut évidemment veiller à ce que dans l'emprise des pertuis le régime reste toujours fluvial, ce qui est facile à réaliser en fixant judicieusement leur espacement.

M. ROCHE exprime les réserves suivantes :

En ce qui concerne la propagation d'une crue dans un canal, le modèle hydraulique constitue une représentation peut-être schématique mais très valable du phénomène naturel : en particulier, il est régi par les mêmes équations. Il n'en va pas de même pour le ruissellement sur le bassin qui ne s'assimile en rien au ruissellement sur une plaque. Il faut effectivement s'attendre, chaque fois

qu'on opérera sur des plaques, à obtenir des réactions non linéaires. Par contre, toutes les analyses qui ont été faites dans la nature ne peuvent infirmer l'hypothèse de linéarité, ni l'existence réelle d'un « hydrogramme unitaire » à condition qu'on se place dans le cadre des hypothèses qui sont à la base de la méthode : pluie assez courte, assez homogène, et surtout assez intense pour qu'il y ait ruissellement sur la totalité du bassin. En effet, lorsqu'on cherche à établir des « hydrogrammes unitaires » pour des averses d'intensités croissantes, ceux-ci se déforment en devenant généralement plus pointus, ceci jusqu'à une limite qui est, en fait, le véritable « hydrogramme unitaire ».

M. le Président remercie M. ROCHE de son intervention et observe que c'est pour la prévision des crues moyennes — pour lesquelles « l'hydrogramme limite » n'est pas atteint — que M. FABRET a ressenti la nécessité de nouvelles études. Celui-ci répond, en ces termes, aux observations de M. ROCHE :

« Je suis tout à fait d'accord avec M. ROCHE lorsqu'il dit que le modèle tel que nous l'avons conçu ne représente pas bien l'écoulement tel qu'il se fait sur un bassin versant réel, et, en particulier, comme il l'a dit hier, le modèle concernant un bassin assez grand ne peut être déduit des petits modèles correspondant aux petites parcelles qui composent le dit bassin. Il n'empêche que nous avons retrouvé, grâce à nos essais, des éléments que nous avons observés sur les bassins versants réels.

« D'autre part, j'ai essayé toutes sortes de modèles linéaires pour représenter la grande crue de 1960 de la Corrèze et de la Vézère, et je n'y suis pas arrivé. Or, d'après les témoins, durant cette crue, le ruissellement s'étendait à toute la surface du bassin et était extrêmement important. Dans ce cas particulier réel, on constate donc la non-linéarité des phénomènes et c'est ce qui m'a amené à étudier la validité des hypothèses qui sont à la base des modèles linéaires.

« Ainsi que l'a dit M. ROCHE, il existe effectivement un « hydrogramme linéaire limite »; malheureusement, il peut être considérablement différent de celui qui permet de retrouver les hydrogrammes observés lors des crues moyennes; autrement dit, le modèle linéaire parfaitement acceptable dans la plupart des cas peut être en défaut — de façon très importante — dans certains cas exceptionnels. »

Cela provient, remarque M. ROCHE, du fait que les hydrogrammes unitaires sont souvent construits à partir d'averses et de crues d'intensité trop faible; il n'y a pas de linéarité possible s'il n'y a pas ruissellement sur tout le bassin.

Sur une question de M. REMENIERAS, M. FABRET confirme que l'écoulement sur son modèle est dans l'ensemble laminaire. Dans ce cas, observe M. REMENIERAS, on pourrait tenter de retrouver par le calcul les résultats expérimentaux obtenus, à partir des lois de « l'overland flow » étudiées par divers auteurs anglo-saxons (1).

(1) Voir notamment CARL F. IZZARD : Peak discharge for highway drainage design. *Trans ASCE*, CXIX, 1954, p. 1 005-15.

