

# Le calcul des crues

## Résultats obtenus sur le terrain expérimental d'Alrance Flood calculations by the unit hydrograph method (Alrance)

PAR P. CAPPUS

INGÉNIEUR AU SERVICE DES ÉTUDES ET RECHERCHES HYDRAULIQUES  
DE L'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

English synopsis, p. 112

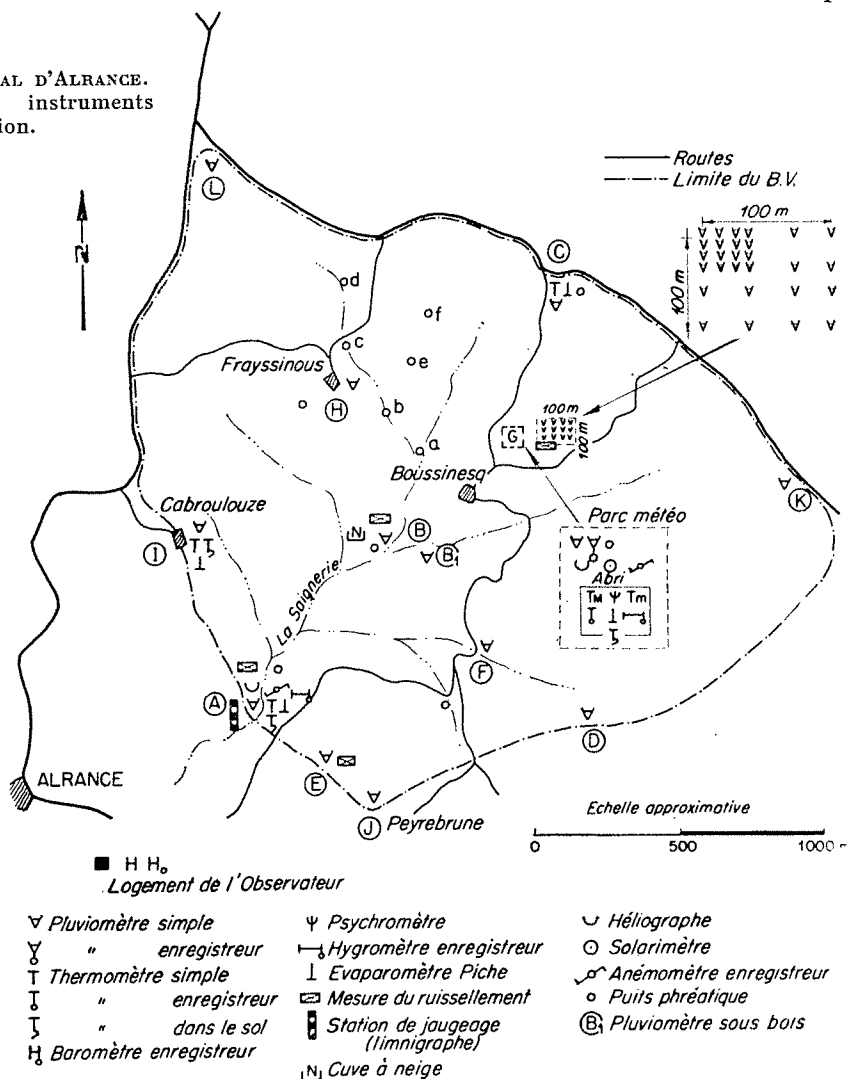
Le problème du calcul des crues préoccupe à juste titre les constructeurs de barrages et les hydrologues.

De la précision du calcul d'une crue peut en effet dépendre la destruction complète d'un ouvrage ou tout au moins des dégâts considérables.

La Division « Hydrologie » du Service des Etudes et Recherches de l'Electricité de France exploite depuis environ deux ans un terrain expérimental à Alrance, dans l'Aveyron.

Les caractéristiques topographiques du terrain, les divers appareils utilisés et leurs emplacements sont visibles sur le plan ci-joint (fig. 1).

FIG. 1  
TERRAIN EXPÉRIMENTAL D'ALRANCE.  
Emplacements des instruments  
d'observation.



Disons tout de suite que le but poursuivi sur le terrain d'Alrance n'est pas exactement l'étude des crues, mais l'étude plus générale des différents termes du bilan hydrologique.

Certains résultats apportent cependant des renseignements utiles pour le problème du calcul des crues : ce sont ces résultats que nous vous présentons aujourd'hui.

✱

Le problème du calcul d'une crue se décompose en plusieurs problèmes.

On sait en effet que la pluie tombée au cours d'une averse se divise en deux parties :

- Une partie ruisselle rapidement;
- Une autre partie est retenue ou retardée par la végétation et les petites irrégularités du terrain; elle s'écoule lentement, ou bien s'évapore, ou bien encore s'infiltré plus ou moins profondément : cette eau infiltrée alimentera plus tard les plantes et leur transpiration, ou bien remontera en surface par capillarité pour s'évaporer, ou bien finalement donnera lieu, par l'intermédiaire de la nappe phréatique à un écoulement plus ou moins retardé.

Ceci se traduit de la façon suivante sur la courbe des débits (fig. 2) :

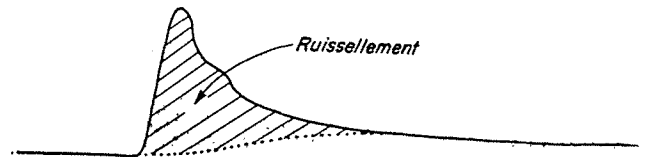


FIG. 2

C'est le ruissellement qui fait la crue.

Le problème du calcul d'une crue se décompose donc en trois problèmes différents :

1° *La pluie* : déterminer la quantité d'eau tombée sur le bassin (avec répartition dans l'espace et dans le temps).

2° *Le coefficient de ruissellement* : déterminer quelle est la proportion de cette eau qui ruisselle et engendre la crue.

3° *La forme de l'hydrogramme* : connaissant la quantité d'eau qui ruisselle, déterminer comment le débit de ruissellement varie en fonction du temps à l'exutoire du bassin.

En particulier, déterminer la pointe des débits (qui est la plus dangereuse pour le barrage).

✱

Reprenons séparément chacun de ces trois problèmes.

## I. — LA PLUIE

Il s'agit de déterminer la quantité totale de pluie tombant sur le bassin.

La méthode utilisée consiste à répartir des pluviomètres en  $n$  points du bassin; puis on déduit des mesures en ces  $n$  points la pluie sur l'ensemble du bassin, par extrapolation. On admet quelquefois que la pluie moyenne sur le bassin est égale à la moyenne des  $n$  mesures (quelquefois moyenne pondérée), ou bien on admet une loi de variation de la pluie en fonction des facteurs topographiques (altitude, pente du terrain, exposition, abri) et météorologiques (direction du vent pluvieux).

L'erreur sur la quantité totale de pluie sur le bassin est donc la somme de deux types d'erreurs :

- 1° Les erreurs sur la mesure de la pluie aux  $n$  points de mesure;
- 2° Erreurs dans l'extrapolation.

### 1. Précision d'une mesure pluviométrique

Pour étudier la précision d'une mesure pluviométrique, nous avons installé à Alrance, sur

un terrain bien dégagé et à peu près plat, 16 pluviomètres dans un carré de 100 m de côté (où il semblait raisonnable d'admettre que la pluie était uniforme).

Les pluviomètres sont du type courant (Association) et les mesures sont faites de la manière habituelle, en versant le contenu du seau dans un éprouvette graduée de 0 à 100 dixièmes de millimètre.

Des mesures journalières sont faites depuis septembre 1950.

Nous avons constaté des écarts assez importants entre les 16 mesures :

a) Admettons tout d'abord que la pluie est uniforme sur le carré de 100 m de côté.

Admettons d'autre part que la vraie valeur de la pluie est la moyenne des 16 mesures.

Alors les écarts constatés caractérisent la précision d'une mesure pluviométrique (tout au moins dans les conditions où sont faites ces mesures).

En divisant chaque jour de pluie les 16 mesures par la moyenne des 16, nous obtenons un tableau des écarts journaliers en %.

Pour les 115 jours de pluie qui ont eu lieu de

septembre 1950 à août 1952, l'écart type est de 8,2 % (après avoir éliminé les jours de neige et les pluies < 20 dixièmes).

Les écarts types des totaux mensuels, calculés pour chaque mois, sont plus faibles, variables suivant les mois, compris entre 2 et 6 %.

En admettant que la loi de répartition des écarts en % est une loi normale,

la précision d'une mesure journalière est de :  
 $\pm 16 \%$

la précision d'une mesure mensuelle :  
 $\pm 5 \text{ à } 10 \%$

b) Nous avons admis en première approximation que la pluie était uniforme sur le carré de 100 m de côté. En réalité il n'en est rien, la pluie varie, même sur un espace aussi restreint.

La surface qui représente la quantité de pluie en chaque point du terrain présente une multitude de bosses et de creux. Nous ne savons pas quelle est l'amplitude de ces irrégularités; nous ne savons pas non plus si ce sont des bosses et creux très rapprochés ou s'il s'agit d'ondulations (dont nous ne connaissons pas la période spatiale), ou bien peut-être des bosses et creux rapprochés superposés à des ondulations.

Quoi qu'il en soit, les écarts constatés entre les 16 pluviomètres ont deux origines différentes :

1° La non-uniformité de la pluie sur le carré de 100 m.

2° Les erreurs de mesure qui sont variables suivant les pluviomètres :

— Les erreurs dues au pluviomètre (inclinaison du pluviomètre, inclinaison de la pluie, perturbation des filets d'air par l'obstacle que constitue le pluviomètre);

— Les erreurs dues à l'observateur (pertes d'eau dans le transvasement, erreurs de lecture dues à l'inclinaison de l'éprouvette, ou à l'épaisseur du ménisque).

Il est malheureusement impossible de distinguer, dans les écarts constatés, quelle est la part due à la non-uniformité de la pluie et quelle est la part due aux erreurs de mesures.

Au problème de la précision d'une mesure pluviométrique vient donc se superposer un problème différent : celui de la structure fine de la pluie.

Nous ne voulons pas nous attarder sur un sujet qui nous écarterait un peu trop du problème du calcul des crues.

Signalons seulement ce que nous avons entrepris pour étudier la structure fine de la pluie :

Nous avons d'abord installé 16 pluviomètres dans un carré de 30 m de côté; si la demi-période des ondulations de la surface de pluie était

de l'ordre de 30 m, on aurait constaté, soit des écarts plus faibles dans le carré de 30 que dans le carré de 100 m, soit des corrélations entre les écarts de certains pluviomètres du carré de 30 m : il n'en est rien.

Nous avons donc encore rapproché les pluviomètres : nous installons actuellement un appareil constitué par 100 cases pluviométriques juxtaposées; les erreurs de mesures sont réduites au minimum; le pluviomètre à cases permettra l'étude de la structure fine de la pluie.

En conclusion, il est bon de se rappeler :

1) L'ordre de grandeur des erreurs sur une mesure pluviométrique :

mesure journalière (ou mesure d'une averse) :  
 $\pm 15 \%$

mesure mensuelle :  
 $\pm 5 \text{ à } 10 \%$

2) L'interdépendance des deux problèmes de la précision d'une mesure pluviométrique et de la structure fine de la pluie.

## 2. L'extrapolation

Elle consiste à calculer la pluie sur l'ensemble du bassin à partir des mesures en  $n$  points en tenant compte des facteurs topographiques et météorologiques.

Il est difficile d'évaluer la précision d'une telle extrapolation.

Signalons seulement que les 12 pluviomètres répartis sur le terrain d'Alrance (3,7 km<sup>2</sup>) donnent des résultats différents (ce qui est tout à fait normal étant données les différences d'altitude,  $\sim 200$  m, de pente et d'exposition); mais d'autre part la répartition spatiale de la pluie sur le bassin est assez variable.

Nous avons calculé cette répartition jour par jour : nous avons donc chaque jour 12 coefficients qui représentent les 12 mesures rapportées à leur moyenne. Considérons par exemple le pluviomètre A : son coefficient est presque toujours supérieur à l'unité : il est en moyenne de 120 %, mais il n'est pas tous les jours égal à 120 %; il s'écarte plus ou moins de 120 % : et l'écart quadratique moyen (calculé sur deux ans de mesure) est de l'ordre de 27 %.

Pour les autres pluviomètres, l'écart quadratique est :

$\sim 15 \text{ à } 20 \%$  pour les pluies journalières,

$\sim 10 \text{ à } 15 \%$  pour les totaux mensuels.

Ces chiffres montrent la variabilité de la répartition spatiale de la pluie sur un terrain aussi peu étendu que celui d'Alrance, et permettent, pour un terrain plus étendu et plus

mouvementé, de douter de la précision d'une extrapolation qui ne tiendrait compte que des

facteurs topographiques et supposerait par conséquent la répartition spatiale constante.

## II. — LE COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT

Une fois déterminée la quantité totale de pluie tombée sur le bassin, il faut déterminer quelle est la proportion qui ruisselle et engendre la crue.

Nous avons calculé le coefficient de ruissellement pour une quinzaine de crues du terrain d'Alrance, correspondant à des averses assez bien définies pour que l'on puisse connaître exactement la pluie et déterminer le ruissellement correspondant d'après l'enregistrement du limnigraphe.

Le coefficient de ruissellement varie de 1 % pour de toutes petites crues engendrées par des orages d'été isolés tombant sur un terrain sec, de 5 % pour de petites crues de printemps où le terrain était moins sec, et 5 à 15 % pour des crues d'hiver où le terrain était plus voisin de la saturation.

Les appareils de mesure du ruissellement récemment installés (on recueille le ruissellement d'une surface de pente, terrain et végétation variables) semblent confirmer l'ordre de grandeur de ces coefficients.

Disons tout de suite que ces crues méritent à peine leur nom; la plupart d'entre elles ont

donné des débits de pointe de quelques dizaines de l/s/km<sup>2</sup>; la plus forte crue en un an et demi a atteint 500 l/s/km<sup>2</sup>. Elles étaient en effet engendrées par des averses de 20 ou 30 mm en quelques heures, ne dépassant jamais 40 mm. Et si le terrain est imperméable (schistes décomposés), la pente n'est pas excessive (pente moyenne entre 10 % et 15 %).

Il est donc difficile de tirer de ces résultats des conclusions pour l'étude de véritables crues qui, dans ces régions du bassin du Tarn ou de l'Aveyron, sont engendrées par des pluies d'au moins 50 mm.

On peut cependant en tirer les enseignements suivants :

1° Si l'on veut étudier les crues importantes d'un bassin, on risque d'attendre longtemps pour avoir seulement quelques exemples.

2° Les coefficients de ruissellement pour des crues importantes sont certainement plus forts que ceux mesurés à Alrance. Mais ils sont probablement assez différents de l'unité et certainement *très variables suivant l'état d'humidification du terrain, et les conditions atmosphériques.*

## III. — LA FORME DE L'HYDROGRAMME DE CRUE

Ayant déterminé la quantité totale d'eau tombée au cours de l'averse et la proportion qui ruisselle, autrement dit le débit total de la crue, il s'agit maintenant de calculer la courbe des débits en fonction du temps.

On se contente bien souvent de calculer le débit maximum, le temps qui sépare le début de la crue du maximum, et la durée totale de la crue (fig. 3) :

La méthode de calcul généralement utilisée est la méthode bien connue de l'hydrogramme unitaire.

Rappelons que cette méthode ne s'applique qu'au débit de ruissellement et qu'elle repose sur 3 postulats :

1) Sur un terrain saturé, une averse uni-

forme de durée unité et d'intensité unité donne naissance à un hydrogramme qui ne dépend que de la forme du bassin : c'est l'hydrogramme unitaire du bassin.

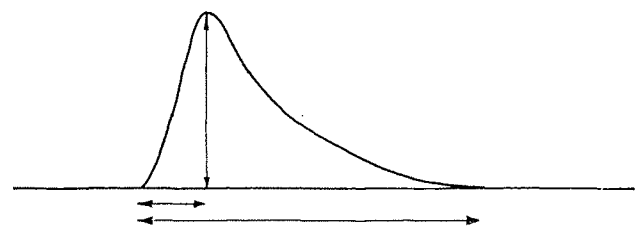


FIG. 3

2) La même averse, avec une intensité  $i$ , donne un hydrogramme obtenu en multipliant par  $i$  les ordonnées de l'hydrogramme unitaire.

3) Des averses successives donnent lieu à un hydrogramme obtenu par addition de leurs hydrogrammes respectifs, décalés dans le temps.

Ces trois postulats équivalent à l'hypothèse que la transformation pluie débit est linéaire.

L'hypothèse de l'uniformité spatiale de la pluie n'est d'ailleurs pas absolument nécessaire. Au lieu de considérer l'intensité, on peut considérer l'intensité moyenne sur le bassin; il est bien évident alors que, pour une même intensité moyenne, la forme de l'hydrogramme dépend de la répartition de la pluie. La méthode de l'hydrogramme unitaire reste applicable à condition de supposer que la répartition spatiale de la pluie est la même pour toutes les averses.

L'hydrogramme unitaire, temps unité, intensité unité, peut théoriquement être calculé si l'on connaît la topographie exacte du bassin et la vitesse de ruissellement en chaque point; ces données manquent en général et le calcul serait certainement très long.

En pratique, on le détermine expérimentalement par la méthode dite « de l'averse isolée », en enregistrant l'hydrogramme de la crue provoquée par une averse bien isolée de durée unité et d'intensité unité. Il suffit en pratique d'enregistrer l'hydrogramme de la crue provoquée par une averse d'intensité  $i$  et de durée  $t$  petite devant le temps moyen d'écoulement sur le bassin. On peut alors prendre  $t$  comme durée unité et l'hydrogramme unitaire se déduit de l'hydrogramme enregistré par réduction des ordonnées dans le rapport  $i$ .

La méthode « de l'averse isolée » n'est pas applicable si l'on n'a pas de limnigraphe à l'exutoire du bassin étudié.

On a alors recours à d'autres méthodes.

Citons par exemple l'étude qui nous a été signalée par M. le Président BARRILLON :

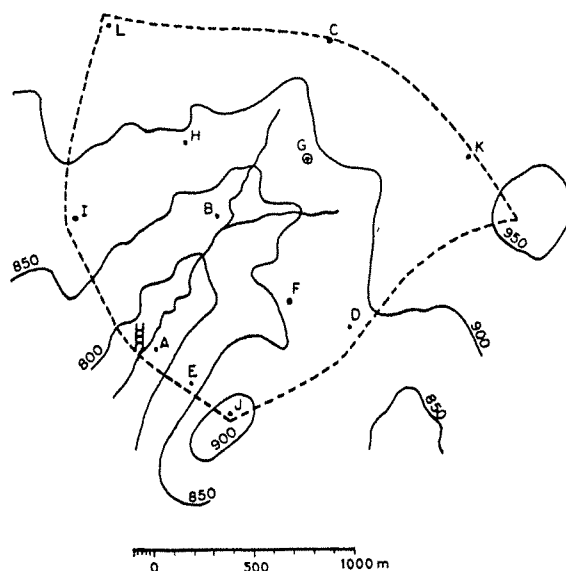
« UNIT HYDROGRAPH LAG AND PEAK FLOW RELATED TO BASIN CHARACTERISTICS »

publiée dans le fascicule d'avril 1952 des T.A.G.U.

« L'étude exposée ici vise à donner une méthode simple pour construire un hydrogramme unitaire dans le cas de bassins où l'on n'a pas d'observations directes — en fonction des caractéristiques géographiques (surface, longueur des cours d'eau et pentes), et de la durée de l'averse envisagée. C'est là un problème qui a été abordé maintes fois par les hydrologues américains, et auquel on ne peut espérer fournir une solution que dans le cadre d'une région donnée.

« Les auteurs se sont ici appuyés sur l'analyse de 65 crues, relatives à 20 bassins différents, situés dans la moitié nord de la région côtière atlantique des U.S.A.

« Les débits maxima observés au cours de ces 65 crues sont compris entre 0,15 et 2 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>.



- Pluviomètre simple
- ⊙ Pluviomètre enregistreur
- ≡≡≡ Limnigraphe

Fig. 4

« En ajustant par les moindres carrés des relations tantôt exponentielles, tantôt paraboliques, les auteurs obtiennent des formules permettant d'exprimer le décalage (intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de l'averse de la pointe de débit) et le débit maximum lui-même, en fonction des grandeurs suivantes, qui leur ont paru les plus représentatives :

« — Surface du bassin versant.

« — Distance maximum de parcours (longueur du cours d'eau principal).

« — Distance, mesurée le long du cours d'eau, entre l'exutoire et le centre de gravité du bassin.

« — Pente d'un canal uniforme ayant même longueur et même temps de parcours que le cours d'eau principal.

« — Enfin, durée de l'averse exceptionnelle envisagée (supposée uniforme).

« Pour achever une détermination approximative de l'hydrogramme unitaire, on recom-

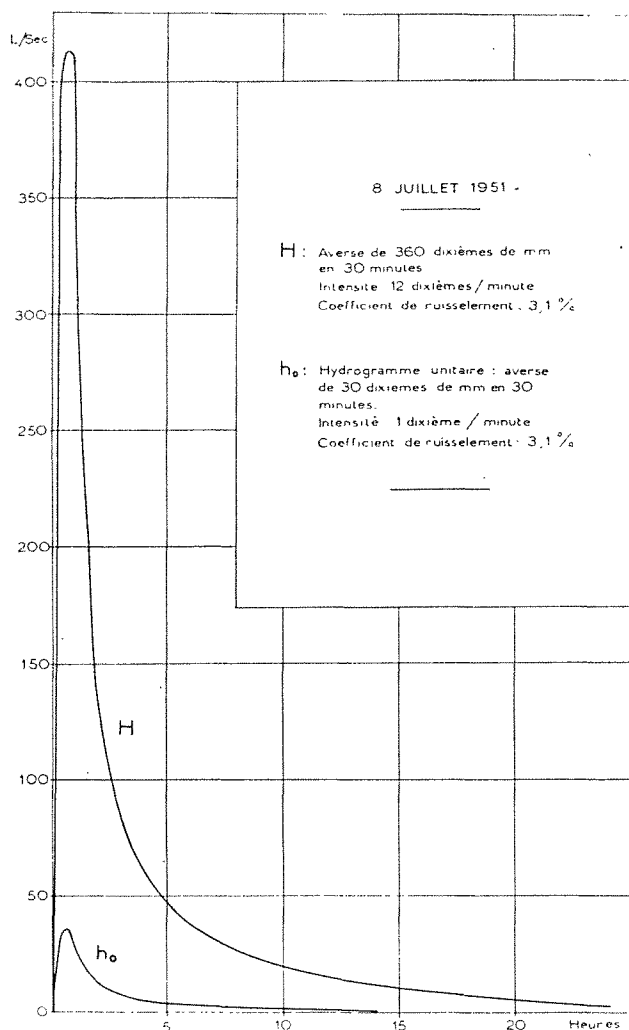


Fig. 5

mande l'emploi d'une formule établie précédemment par le Corps of Engineers, donnant en fonction des mêmes variables la largeur de l'hy-

## CONCLUSION

Nous avons vu qu'une certaine imprécision était inévitable dans le calcul de la pluie totale tombant sur un bassin; à l'imprécision des mesures pluviométriques proprement dites vient s'ajouter l'imprécision dans l'extrapolation. A ce point de vue, la seule chose à faire est d'améliorer les moyens de mesure et de préciser les lois de variation spatiale de la pluie en fonction des facteurs topographiques et météorologiques.

Nous avons vu d'autre part que si l'on connaît la quantité de ruissellement, une méthode simple: la méthode de l'hydrogramme unitaire, permet de calculer de façon satisfaisante la forme de l'hydrogramme de crue.

drogramme pour des débits égaux respectivement à 50 % et à 75 % du maximum.

« Les auteurs soulignent que la validité de la méthode qu'ils ont ainsi mise sur pied est purement locale.

« On peut observer de plus que les formules analytiques ajustées portent sur des distributions à corrélation relativement médiocre — témoin le calcul dans lequel les auteurs ont éliminé, sur 20 points, 7 d'entre eux qu'ils ont jugé aberrants.

« Néanmoins, les exemples donnés d'applications à des bassins autres que ceux entrant dans le matériel utilisé, conduisent à des résultats satisfaisants. »

Dans le cas du terrain d'Alrance, nous avons pu déterminer l'hydrogramme unitaire par la méthode de l'averse isolée\* (fig. 5):

Nous avons ensuite calculé un certain nombre de petites crues de la façon suivante (fig. 4):

Les 12 pluviomètres simples répartis sur le bassin donnent la pluie totale.

Le pluviomètre enregistreur situé au centre du bassin donne la répartition de l'averse dans le temps.

L'enregistrement limnigraphique permet de calculer le coefficient de ruissellement.

La comparaison des hydrogrammes calculés et des hydrogrammes réels est tout à fait satisfaisante (fig. 6 à 13):

- La forme de l'hydrogramme est bien rendue;
- La valeur du débit de pointe n'est pas calculée exactement;
- L'abscisse du débit de pointe est calculée avec une précision satisfaisante.

Ces exemples montrent que:

- Il serait bon de gagner sur la précision;
- Mais que, jusqu'à preuve du contraire, la méthode de l'hydrogramme unitaire est parfaitement justifiée.

Donc, une fois connue la pluie (par hypothèse ou par mesure plus ou moins précise), l'important du problème consiste à déterminer quelle est la proportion de la pluie qui ruisselle et qui fait la crue.

\* La crue du 8 juillet 1951 correspond à une averse de 36 mm en 1/2 heure; le coefficient de ruissellement est de 3,1%. D'où, par réduction des ordonnées, l'hydrogramme unitaire correspondant à une averse de 1/2 heure (ce temps n'est pas négligeable devant le temps moyen d'écoulement sur le bassin, mais nous n'avons pas mieux), à l'intensité unité: 1 dixième/minute, et au coefficient de ruissellement: 3,1%.

17 JUIN 1951 -

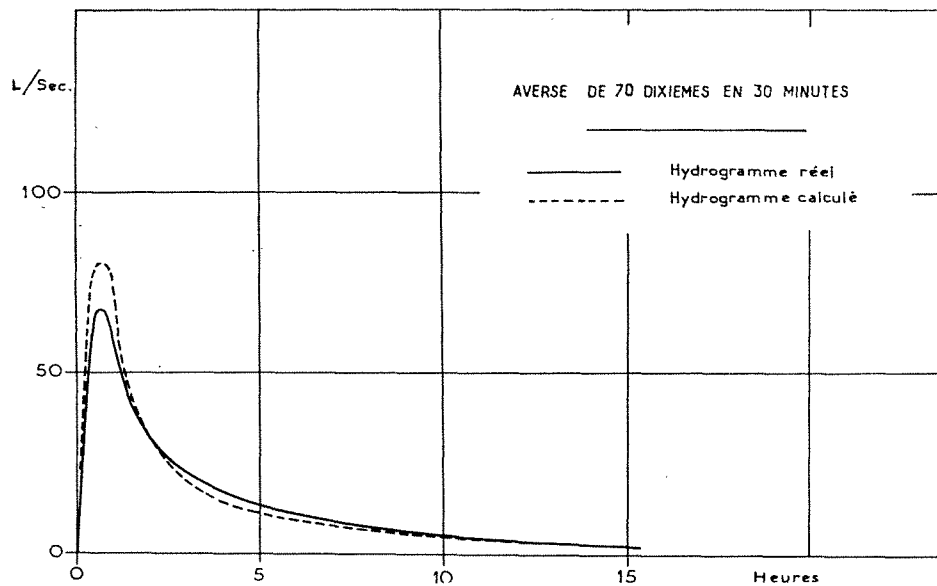


FIG. 6

- 19 JUIN 1951 -

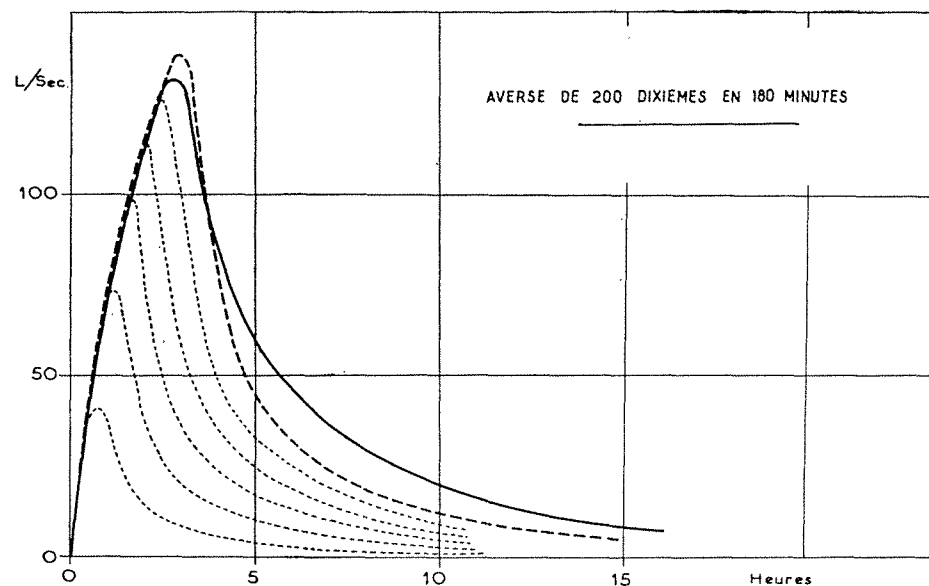


FIG. 7

- 22 JUIN 1951 -

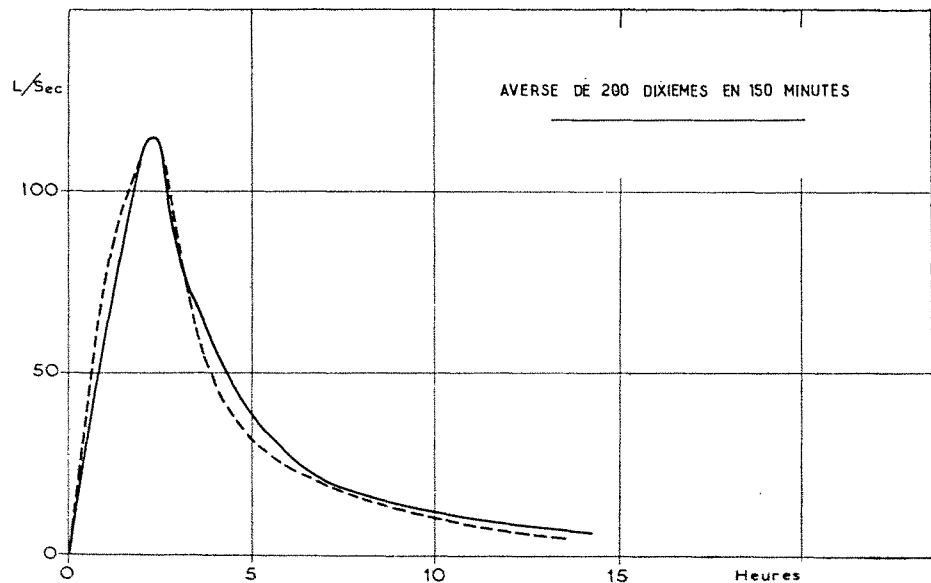


FIG. 8

- 19 MARS 1952 -

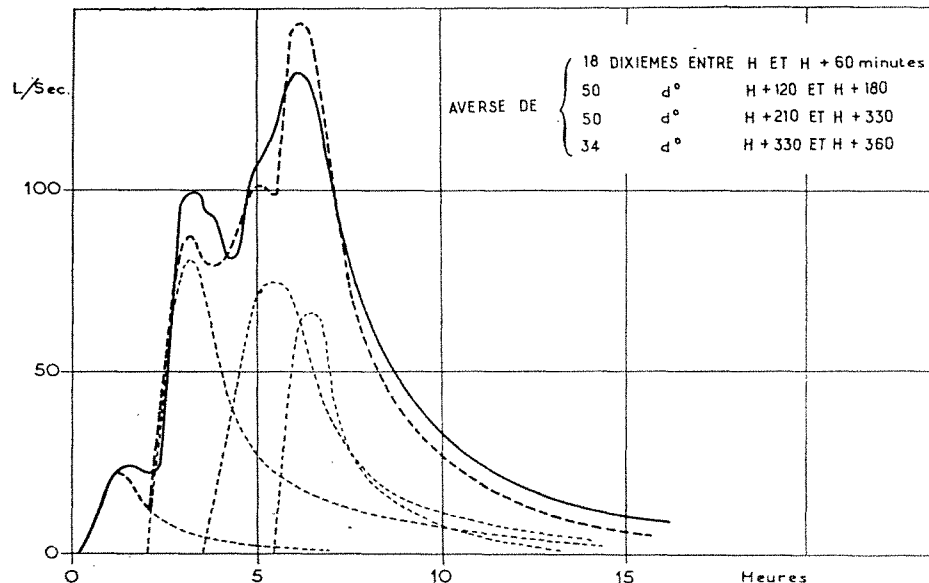


FIG. 9

- 22 AVRIL 1952 -

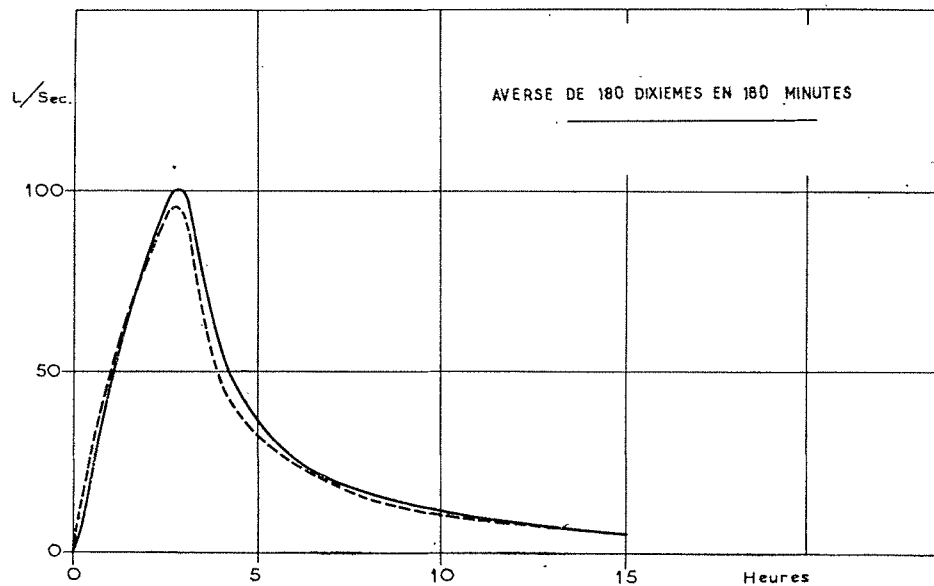


FIG. 10

- 2 MAI 1952 -

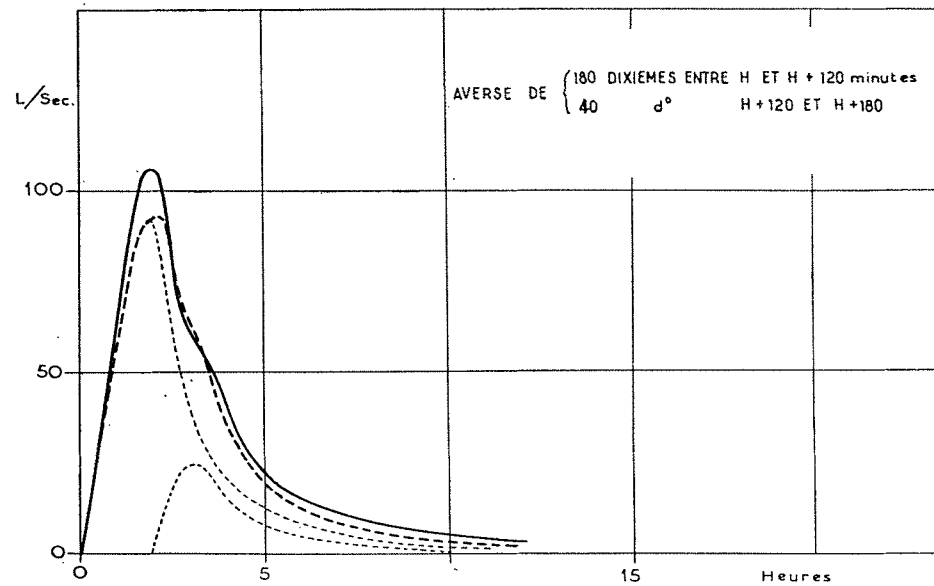


FIG. 11

- 3 MAI 1952 -

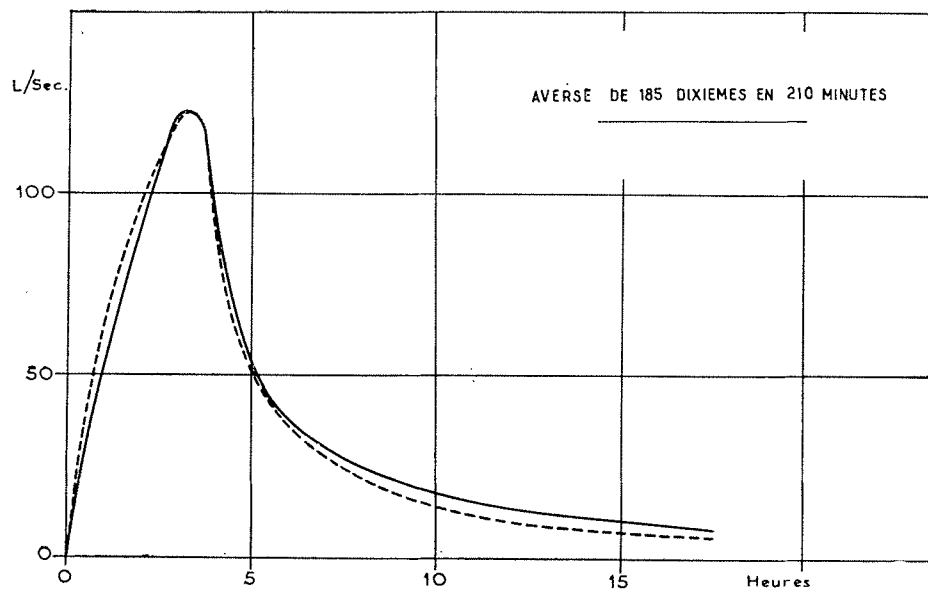


FIG. 12

- 6 MAI 1952 -

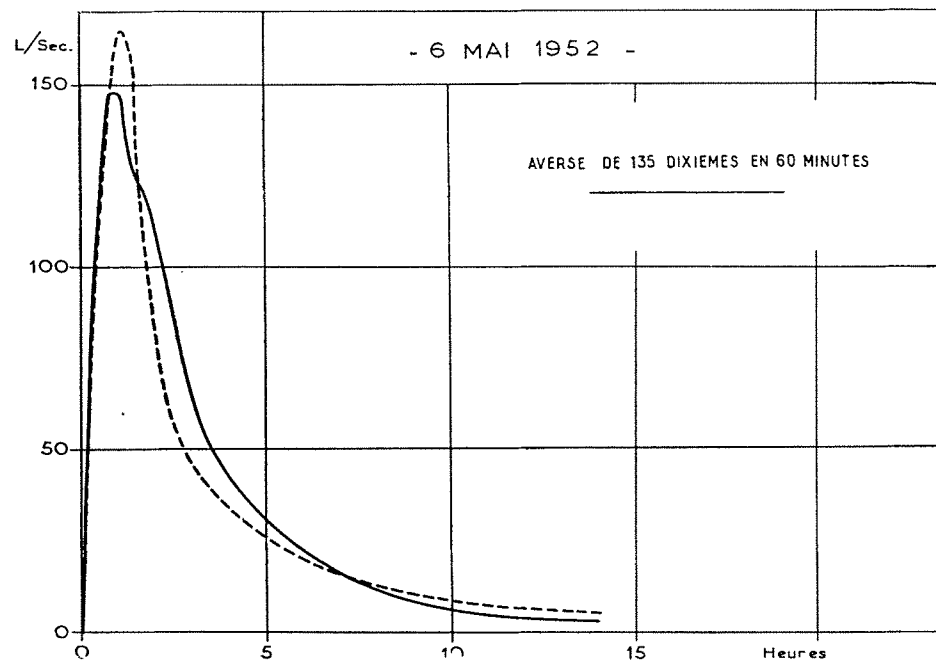


FIG. 13



Il est certain que, pour des crues importantes, les coefficients de ruissellement sont plus forts que dans les exemples que nous avons donnés : le déficit de ruissellement n'a pas, en général, l'importance énorme qu'il prend sur le terrain d'Alrance.

Il n'en reste pas moins que les coefficients de ruissellement peuvent être assez différents de l'unité et certainement très variables suivant les conditions météorologiques et l'état d'humidification du terrain.

*Par conséquent, les erreurs introduites dans la détermination du coefficient de ruissellement sont aussi importantes, sinon plus, que les erreurs introduites dans le calcul de la forme de l'hydrogramme de crue.*

Si l'on imagine les difficultés que présente la prévision d'un coefficient de ruissellement, il est permis d'affirmer que, une fois connue la pluie, le problème du coefficient de ruissellement constitue le problème essentiel du calcul des crues.

## DISCUSSION

Président : M. MASSÉ

M. le Président remercie M. CAPPUS et estime encourageants les résultats de l'hydrogramme unitaire qu'il a exposés.

M. RODIER pense, d'après les mesures faites dans son service, que les écarts de répartition spatiale de la pluie peuvent modifier la forme de l'hydrogramme, d'où la nécessité de multiplier les pluviomètres enregistreurs en rapport avec la surface du bassin versant; que, d'autre part, la capacité d'infiltration du terrain diminue au fur et à mesure des averses successives, et que le ruissellement recueilli à Alrance pourrait intéresser une petite partie du bassin, étant donné la faiblesse des averses et l'irrégularité de la capacité d'infiltration du sol.

M. BARRILLON félicite M. CAPPUS de s'attacher, sous la direction de M. SERRA à ces problèmes captivants. Comme perfectionnements de l'expérience, M. BARRILLON propose de multiplier les postes de mesure de débit à défaut d'un plus grand nombre de pluviomètres enregistreurs et de suivre l'évolution du tarissement des exutoires après la fin de l'averse et de la crue. Il serait intéressant de vivre un peu sur le terrain ou dans le pays pour avoir une vue objective du phénomène.

M. FERRY attire l'attention sur la précision relative des mesures pluviométriques :

1° La précision intrinsèque de 5 % trouvée par M. CAPPUS pour une mesure mensuelle dans une région de quelques mètres autour du pluviomètre dans laquelle la répartition de la pluie est supposée uniforme, serait théoriquement améliorée dans un grand bassin, proportionnellement à la racine carrée du nombre de pluviomètres; par exemple, elle atteindrait 1 % avec 25 pluviomètres, c'est-à-dire que l'erreur de mesure serait pratiquement éliminée.

2° L'écart-type de 30 % trouvé pour la répartition spatiale de la pluie dans le terrain d'Alrance (3,7 km<sup>2</sup>) serait également réduit à 6 % sur un bassin de grande surface comportant 25 pluviomètres répartis au hasard, ce qui serait déjà satisfaisant; mais comme la répartition des pluviomètres dans les bassins entièrement accessibles est basée sur certaines considérations rationnelles qui limitent son caractère aléatoire, la précision finale des mesures moyennes à l'échelle mensuelle peut être meilleure que celle des mesures correspondantes de débits.