

Contribution à une meilleure estimation des paramètres d'une crue décennale : la méthode « DELTAQIX »

Ali MOALLEMI-POUR (1), Claude MICHEL (1)

RÉSUMÉ

L'absence ou la rareté des données hydrométriques sur les bassins ruraux nous conduit à utiliser des approches empiriques en établissant des liaisons entre les débits et les facteurs géométriques ou climatologiques des bassins versants.

La méthode DELTAQIX proposée ici est une méthode intermédiaire entre deux méthodes fréquemment appliquées en France, SOCOSE et CRUPEDIX.

La méthode DELTAQIX améliore l'estimation du débit instantané maximum (QIX) décennal, par la prise en compte de variables hydrologiques intermédiaires. Elle propose également une nouvelle définition d'un temps caractéristique de crue (DELTA) ainsi qu'un hydrogramme de projet en utilisant les courbes débit-durée-fréquence.

MOTS CLÉS : Prédétermination des crues — Durée caractéristique — Relation débit-durée — Hydrogramme de projet.

ABSTRACT

CONTRIBUTION TO IMPROVED ESTIMATION OF THE 10 YEAR FLOOD : THE DELTAQIX METHOD

The scarcity of hydrological data relating to small rural basins leads to the use of empirical relationships between peak discharges and basin factors. The DELTAQIX method presented in this paper fills the gap existing between two methods currently used in France.

This new method improves the estimation of the peak discharge (QIX) relating to a return period of ten years, due to two hydrological factors. It introduces a flood characteristic duration (DELTA) and provides a design flood.

KEY WORDS : Flood estimation — Characteristic duration — Flow-duration relationship — Design flood.

1. INTRODUCTION

L'évaluation d'une crue de fréquence décennale est un problème classique qui reste néanmoins toujours d'actualité.

En effet, si la recherche d'un débit maximum instantané est pratique courante, l'obtention conjointe d'un débit maximum et d'une durée caractéristique de crue est moins répandue. Lorsqu'il n'existe aucune donnée relative aux débits sur le site étudié (c'est le cas général des petits bassins ruraux), on doit recourir à des formules régionales calées sur les bassins jaugés.

Actuellement, pour les bassins sans observations hydrométriques, deux méthodes sont plus particulièrement utilisées en France : SOCOSE et CRUPEDIX (Ministère de l'Agriculture, 1980-1982).

Nous commentons brièvement ces deux méthodes puis nous présentons une nouvelle approche d'estimation d'une crue décennale sur un bassin versant non jaugé.

(1) CEMAGREF, Division Hydrologie-Hydraulique, Parc de Tourvoie, BP 121, 92185 Antony Cedex.

2. REMARQUES SUR LES MÉTHODES CRUPEDIX ET SOCOSE

La méthode CRUPEDIX permet d'estimer le débit maximum instantané de fréquence décennale en fonction de la superficie et de la pluie journalière décennale. Elle possède l'avantage d'aboutir à une formule très simple d'utilisation :

$$QIX = R S^{0,8} \left(\frac{P}{80} \right)^2$$

P est la pluie journalière décennale en mm,

S est la superficie en km²,

R est un coefficient régional de valeur moyenne unité.

L'inconvénient de CRUPEDIX est l'absence d'une durée caractéristique de crue, complément indispensable pour concevoir un hydrogramme de projet.

La méthode SOCOSE repose sur un modèle classique de transformation pluie-débit.

Sa fonction de production est empruntée au Soil Conservation Service (SCS) du Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis :

$$R = \frac{(P - 0,2 J)^2}{P + 0,8 J}$$

P = pluie journalière décennale en mm,

J = interception potentielle décennale en mm.

Elle utilise un hydrogramme unitaire dépendant d'un paramètre homogène à un temps (la durée D) comme fonction de transfert. Toute la démarche pluie-débit est ramenée dans cette méthode à une suite de calculs algébriques que nous ne rappellerons pas et qui permettent d'obtenir le débit maximal instantané. J et D sont donnés par des expressions calées sur 187 bassins versants. Nous ne rappelons que l'estimation de D : le logarithme népérien de D est estimé par :

$$\ln D = - 0,69 + 0,32 \ln S + 2,2 \sqrt{\frac{P_a}{P t_a}}$$

L'écart-type de l'erreur de cette relation est 0,68.

D est exprimé en heure, S est la superficie en km², P la pluie décennale en mm, P_a la pluie annuelle moyenne en mm, et t_a la température annuelle moyenne ramenée au niveau de la mer en °C.

La méthode SOCOSE est donc plus complète que CRUPEDIX car elle définit un temps caractéristique et elle propose un hydrogramme de crue. Cependant malgré sa complexité conceptuelle elle n'apporte pas d'amélioration sensible à l'estimation du débit maximum par rapport à la méthode CRUPEDIX.

D'autre part, l'hydrogramme de crue de SOCOSE déterminé à partir de D et de QIX concerne une pointe de crue isolée. Il nous a semblé indispensable de réviser cette notion de durée caractéristique de crue pour pouvoir prendre en compte également les crues complexes.

La méthode que nous proposons ci-après est intermédiaire : plus complète que CRUPEDIX et moins conceptuelle que SOCOSE.

Cette nouvelle approche modifie et la détermination de QIX et celle d'une durée de crue telle que D. Nous allons d'abord présenter la nouvelle approche de QIX puis celle d'un nouveau temps caractéristique de crue.

3. ÉVALUATION DU DÉBIT INSTANTANÉ MAXIMUM DÉCENNAL

La méthode CRUPEDIX mise au point à partir des données de 630 bassins versants nous montre qu'à l'exception de la superficie et de la pluie journalière, les autres paramètres géométriques, morphologiques et climatologiques n'ont pas pu être significativement corrélés avec le débit décennal.

Notre échantillon confirme également ce fait. Par conséquent, en vue de la recherche d'une amélioration de l'estimation de QIX, nous avons introduit deux facteurs hydrologiques intermédiaires que l'on peut estimer avec une bonne précision soit à partir de cartes régionales soit à partir d'une durée très courte de mesures hydrométriques. Ce sont le module interannuel et l'indice d'écoulement de base B défini par :

$$B = \frac{\text{Volume annuel sous le débit de base}}{\text{Volume annuel total}}$$

L'idée est de s'appuyer sur ces variables hydrologiques intermédiaires qui exigent peu de données pour leur estimation.

Nous avons utilisé la technique de la régression multiple pour expliquer le logarithme du débit décennal en fonction des variables explicatives suivantes :

ln S où S = surface du bassin versant (km²),
 ln P où P = pluie journalière décennale (mm),
 ln M où M = module interannuel (mm)
 B = indice d'écoulement de base.

L'expression suivante a été établie :

$$QIX = \frac{\Phi}{400} S^{0,9} P^{1,1} M^{0,3} \exp(-1,9 B)$$

(10) (19) (9) (5) (6)

où Φ vaut 1 en moyenne sur l'ensemble du territoire, mais pourrait être modifié dans une région où il s'en écarte systématiquement.

Avec une erreur standard égale à 0,50 sur les logarithmes de QIX contre 0,58 en l'absence des facteurs M et B, on obtient un intervalle de confiance à 70 % égal à (0,6 QIX, QIX/0,6).

Les valeurs entre parenthèses sont les rapports de STUDENT qui montrent que les coefficients de régression sont bien significatifs.

La figure 1 montre le graphique des couples « valeur calculée-valeur observée ».

GRAPHE DE CONTROLE

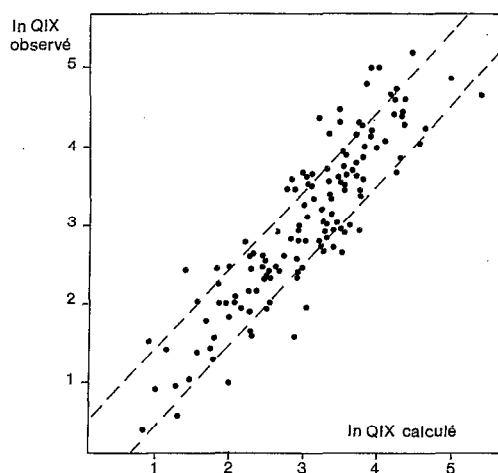


FIG. 1. — Graphique « valeurs observées-valeurs calculées » concernant le débit maximum instantané de fréquence décennale (QIX).

Si nous répétons la même opération pour l'estimation du débit journalier décennal on s'aperçoit que l'amélioration apportée par ces deux facteurs hydrologiques M et B est encore plus appréciable.

Voici l'expression établie en fonction des quatre variables explicatives :

$$QJX = \frac{\Phi}{625} S^{0,9} P^{0,8} M^{0,5} \exp(-1,8 B)$$

(14) (25) (8) (10) (7)

où Φ pourrait être le même coefficient que dans la relation estimant QIX et de valeur 1 en l'absence de justification régionale.

Avec une erreur standard de 0,38, on obtient un intervalle de confiance à 70 % approximativement égal à :

$$\left(\frac{2}{3} QJX, \frac{3}{2} QJX \right)$$

Tandis qu'en l'absence des deux paramètres hydrologiques M et B nous aurions obtenu une erreur standard égale à 0,53 donc nettement moins satisfaisante.

La figure 2 donne le graphe des couples « valeur calculée-valeur observée ». Notons que le gain d'information apporté pour l'estimation des débits par les deux facteurs hydrologiques est très appréciable et ce sans introduire de coefficient régional.

Ce gain pourrait être encore plus patent en introduisant des coefficients régionaux permettant un peaufinage des estimations par une meilleure prise en compte des spécificités locales.

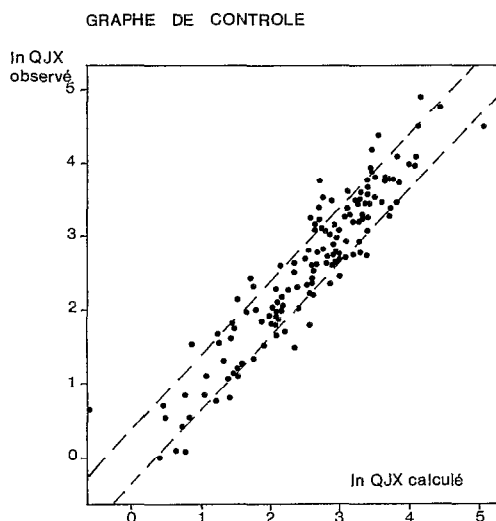


FIG. 2. — Graphique « valeurs observées-valeurs calculées » concernant le débit journalier de fréquence décennale (QJX).

4. LES COURBES DÉBIT-DURÉE-FRÉQUENCE (QDF)

Il est certain que dans un problème du type de l'estimation de la durée des inondations, la prise en compte d'un paramètre de durée tel que D conduit à une sous-estimation des temps de submersion car la méthode SOCOSE ne s'intéresse qu'à des pointes isolées de crue. On a donc choisi de décrire de façon plus globale la durée des crues, avec une approche en tout point similaire à celle entreprise depuis longtemps pour les pluies dans l'établissement des courbes intensité-durée-fréquence (CHEN-LUNG, 1983). Pour ce faire, sur des bassins jaugés, on exploite la chronique complète et continue des débits.

On définit une crue par le passage continu du débit d'une rivière au-dessus d'un seuil donné.

Pour avoir une définition uniforme d'un bassin à l'autre, nous avons choisi ce seuil égal à 4 fois le module interannuel.

Une fois les hydrogrammes de crue séparés, on peut distinguer deux types de variables : QIX, QtX :

QIX : est le débit maximum instantané.

QtX : est la valeur maximale du débit sur un laps de temps t donné (fig. 3).

Une analyse statistique permet de déterminer pour chacune des variables QIX, QtX, les quantiles de fréquence donnée.

Si pour chaque fréquence, nous portons les débits (QtX) en ordonnée, les durées en abscisse, on obtient un faisceau de courbes que l'on appelle les courbes débit-durée pour la fréquence considérée (fig. 4).

Nous allons utiliser ces courbes QDF pour identifier une nouvelle durée caractéristique de crue.

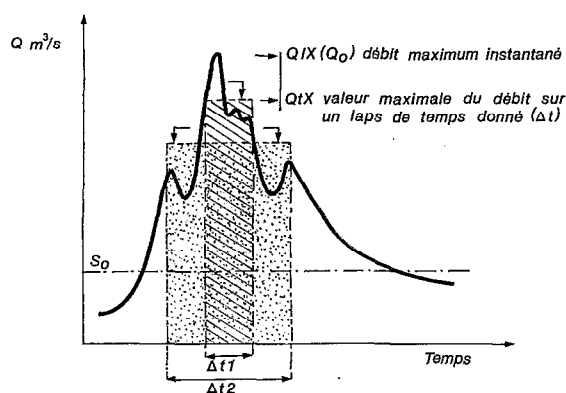


FIG. 3. — Débits à pas de temps variable.

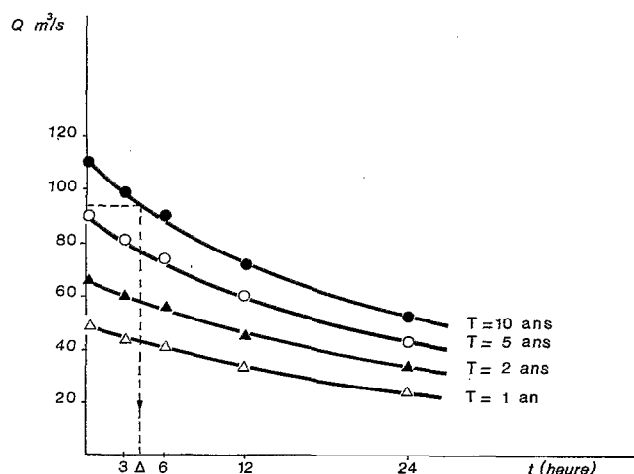


FIG. 4. — Courbes Débit-Durée-Fréquence (QDF). Bassin du Volp à Ste-Croix (91 km²).

5. NOUVELLE DÉFINITION D'UN TEMPS CARACTÉRISTIQUE DE CRUE

Nous avons étudié plus particulièrement la courbe débit-durée décennale. On peut alors définir une nouvelle durée caractéristique de crue de la façon suivante : c'est la durée pendant laquelle le débit sur cette durée est égale à 0,85 fois le débit maximum instantané (fig. 5). Nous le noterons Δ .

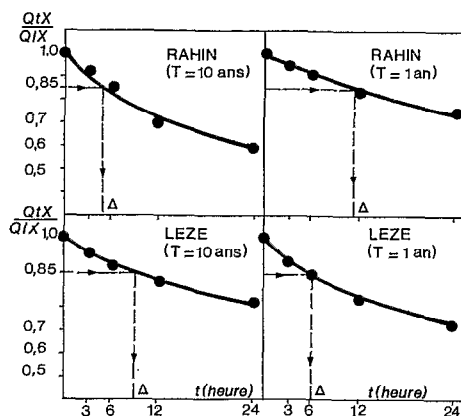


FIG. 5. — Exemple de la détermination de Δ (ou Δ' pour $T = 1$ an).

Ce rapport de 0,85 a été choisi pour trouver des valeurs numériques pas trop éloignées de celle bien connue de la durée D de la méthode SOCOSE et pour rester dans une partie assez régulière de la courbe QDF.

Pour permettre la détermination de cette nouvelle durée Δ sur des bassins non jaugés, nous avons essayé d'expliquer cette variable avec des paramètres climatologiques, géométriques et morphologiques des bassins versants. Les valeurs de Δ obtenues sur plus de 100 BV de la banque ARHMA du Ministère de l'Agriculture nous ont permis d'établir la relation suivante :

$$\ln \Delta = 2,5 + 0,1 \ln \frac{S}{I_g^2} + 0,7 \ln \frac{P_a}{P t_a} \quad (51) \quad (5) \quad (7)$$

L'erreur standard est 0,53. Les valeurs entre parenthèses sont les rapports de STUDENT qui montrent que les coefficients de régression sont bien significatifs.

La régression a été faite sur les logarithmes népériens des variables. Les notations employées sont expliquées ci-après :

- S = superficie (km²),
- P = pluie journalière décennale (mm),
- P_a = pluie annuelle moyenne (mm),
- I_g = indice de pente de DUBREUIL (m/km),
- t_a = température annuelle moyenne réduite au niveau de la mer (°C),
- Δ = durée caractéristique de crue décennale (heure).

A titre de comparaison on a essayé d'expliquer le D de SOCOSE avec les mêmes variables explicatives et sur les mêmes bassins versants ; on a obtenu une erreur standard de 0,63, très sensiblement supérieure à celle relative à Δ.

Nous avons également effectué la même étude sur les courbes débit-durée de fréquence annuelle (on désigne par ce qualificatif le quantile de période de retour égale à 1 an).

On peut définir de la même façon une durée Δ' et caler une formule pour son estimation sur les bassins non jaugés.

La comparaison des formules obtenues pour Δ et Δ' nous montre qu'elles sont très peu différentes.

Cela nous conduit à accepter l'hypothèse simple d'un temps caractéristique indépendant de la fréquence.

6. DESCRIPTION ANALYTIQUE D'UNE COURBE DÉBIT-DURÉE DE FRÉQUENCE DÉCENNALE

La recherche d'une formulation mathématique pour exprimer une relation débit-durée permet de compléter l'information donnée par Δ comme cela a été fait en Grande-Bretagne (NERC, 1975).

Notons Q_{IX} le débit maximum instantané et Q_{tX} le débit sur la durée t, tous les deux étant relatifs à cette fréquence décennale. Si nous portons sur un papier bi-logarithmique les valeurs de (Q_{IX}/Q_{tX} - 1) en ordonnée et (t) en abscisse, on constate que pour chacun des bassins étudiés les points sont assez bien alignés (fig. 6) ; on peut donc écrire :

$$\ln \left(\frac{Q_{IX}}{Q_{tX}} - 1 \right) = \alpha \ln (t) + \beta$$

avec : $\beta = - \alpha \ln \Theta$, nous avons :

$$\frac{Q_{IX}}{Q_{tX}} = 1 + \left(\frac{t}{\Theta} \right)^\alpha$$

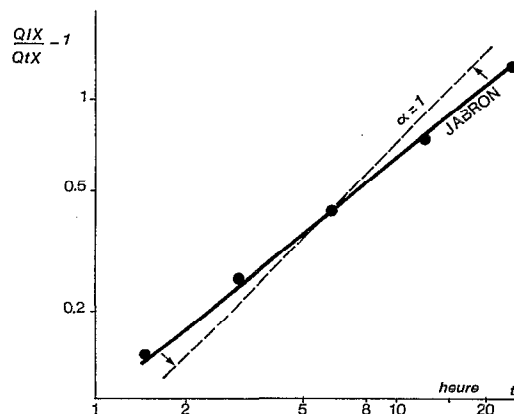


FIG. 6. — Approximation hyperbolique.

Les paramètres α et Θ varient d'un bassin à l'autre. Nous avons rencontré des difficultés pour corrélérer ces paramètres α et Θ avec des paramètres climatologiques, géométriques et morphologiques des bassins versants.

En étudiant la distribution du paramètre α on constate qu'elle est gaussienne avec une valeur médiane non significativement différente de l'unité et un écart-type assez faible.

Par conséquent, en tenant compte des erreurs éventuelles dues à l'échantillonnage, il nous semble réaliste d'imposer la valeur $\alpha = 1$ pour tous les cours d'eau (fig. 6).

Dans ce cas, pour la quasi-totalité des bassins, la valeur de Θ est directement liée à la valeur de Δ et la formule précédente permet de voir que $\Theta \approx 6 \Delta$ ($17/3 \Delta$ exactement).

On peut donc admettre l'expression suivante pour décrire une courbe QDF de fréquence décennale :

$$QtX = \frac{QIX}{1 + \frac{t}{\Theta}}$$

pour un bassin non jaugé on prendra :

QIX = le débit instantané calculable à partir de méthodes régionales ;

Δ = temps caractéristique de crue, calculable à partir de la formule régionale vue plus haut (heure) ;

et $\Theta \approx 6 \Delta$.

7. HYDROGRAMME DE CRUE TYPE OU HYDROGRAMME DE PROJET

La courbe QDF ne donne pas un hydrogramme de crue type. On peut cependant chercher à bâtir un tel hydrogramme en choisissant une règle de répartition des débits entre montée et décrue.

Nous pouvons donc calculer notre hydrogramme de projet de telle façon que le débit maximum sur une durée t satisfasse à la relation hyperbolique obtenue précédemment et qui s'écrit :

$$QtX = \frac{QIX}{1 + \frac{t}{\Theta}}$$

cette relation concerne un débit moyen sur la durée t , il faut dériver cette expression pour décrire des débits instantanés (fig. 7). On obtient :

$$Q(t) = \frac{QIX}{\left(1 + \frac{t}{\Theta}\right)^2}$$

et l'on peut vérifier que :

$$\frac{1}{t} \int_0^t Q(u) du = QtX$$

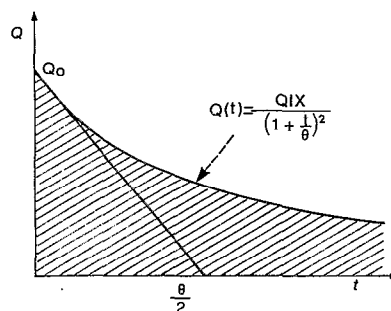


FIG. 7. — Hydrogramme de la courbe QDF : $Q(t) = QIX / (1 + t/\Theta)$.

On peut calculer que la tangente à l'origine coupe l'axe des temps en un point d'abscisse $t = \Theta/2$.

Du fait de la montée instantanée, le graphe précédent tiré de la courbe QDF ne peut pas décrire un hydrogramme de projet. Cependant, on peut proposer une légère modification pour simuler un temps de montée acceptable.

Le procédé proposé ci-après est approximatif mais conserve les volumes au premier ordre (fig. 8).

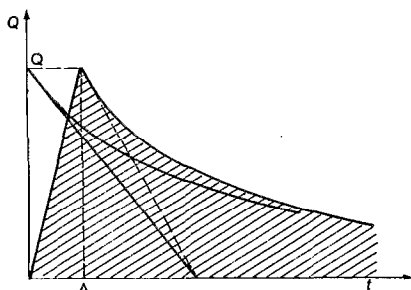


FIG. 8. — Hydrogramme de projet de fréquence décennale.

Nous faisons un déplacement horizontal du point d'ordonnée Q d'une valeur donnée par :

$$\delta t = \frac{\Theta}{6} \frac{Q(t)}{QIX}$$

On obtient ainsi une droite de montée d'équation :

$$Q(t) = QIX \frac{6}{\Theta} t$$

et une décrue :

$$Q(t) = \frac{QIX}{\left(1 + \frac{t - \delta t}{\Theta}\right)^2}$$

c'est-à-dire :

$$Q(t) = \frac{QIX}{\left(1 + \frac{t}{\Theta} - \frac{Q(t)}{6 QIX}\right)^2}$$

qui s'exprime explicitement en t :

$$t(Q) = \Theta \left(\frac{Q}{6 QIX} + \sqrt{\frac{QIX}{Q}} - 1 \right)$$

avec : $\Theta = 6 \Delta$.

8. RELATION DÉBIT-DURÉE AU-DELÀ DE 24 HEURES

La relation débit-durée avec les données à pas de temps variable a été établie en étudiant les débits maximaux sur un pas de temps inférieur ou égal à 24 heures centré sur la valeur maximale. Cela conduit à poser la question suivante : est-ce que cette relation hyperbolique est valable au-delà de 24 heures ?

Pour y répondre, l'exploitation des données instantanées conduisait à des temps de calcul très longs.

Par contre, l'exploitation de données journalières nous permet d'investiguer facilement des intervalles de temps jusqu'à 5 ou 7 jours, et donc de répondre à la question précédente.

Etant donné que les débits journaliers de la banque ARHMA sont d'origine fixe, il a fallu effectuer une correction statistique pour obtenir des débits centrés sur le maximum de chaque crue.

Nous avons utilisé une correction déjà proposée pour les pluies (L.L. WEISS), pour obtenir le débit maximal sur $n \times 24$ heures d'origine libre.

Cette correction consiste à multiplier les données sur n jours par le coefficient :

$$C_w = \frac{24 n}{24 n - 3}$$

Après avoir corrigé les valeurs des débits moyens sur 1 à 7 jours avec la correction de WEISS, nous avons calculé et dessiné les courbes débit-durée-fréquence, et on a constaté que, comme pour les données en continu, la forme générale des courbes QDF avec les données journalières reste hyperbolique. Nous avons porté sur un papier à coordonnées cartésiennes les valeurs de $1/Q$ en fonction de t , permettant ainsi de mettre en évidence la relation hyperbolique qui devient une relation affine :

$$QtX = \frac{QIX}{1 + \frac{t}{\Theta}} \Leftrightarrow \frac{1}{QtX} = a + b t$$

La figure 9 nous montre pour un exemple de bassin que les points sont effectivement assez correctement alignés.

Par conséquent, on peut dire que cette relation hyperbolique est valable au-delà de 24 heures et est accessible avec des données journalières.

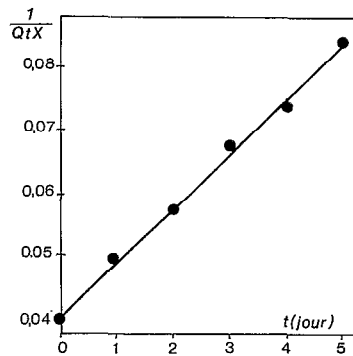


FIG. 9. — $1/Q$ est presque une fonction affine de t . Bassin de l'Orgeval au Theil (104 km^2).

9. CONCLUSION

La démarche des courbes débit-durée-fréquence développée ici nous a permis de mettre au point une méthode intermédiaire (que nous avons appelée DELTAQIX) plus complète que CRUPEDIX et à la fois moins conceptuelle et plus générale que SOCOSE.

Plus complète que CRUPEDIX car elle propose une durée caractéristique. Nous avons vu que cette nouvelle définition d'un temps caractéristique de crue (Δ), présente par rapport au classique temps de concentration et à la durée D de SOCOSE, le double avantage d'être plus opérationnelle car elle intègre les crues complexes (en ce sens elle est plus générale que SOCOSE) et de conduire à une estimation plus précise sur les bassins non jaugés.

L'expression hyperbolique décrivant la relation débit-durée est en général acceptable et proche de la réalité pour le territoire métropolitain.

Cette expression hyperbolique nous permet, tout en restant sommaire, de ne pas nous contenter d'estimer seulement le débit de pointe et une durée caractéristique, mais d'aller plus loin et de présenter une forme acceptable d'hydrogramme de crue, utilisable notamment pour les problèmes de lutte contre les inondations dans les bassins versants non jaugés (fig. 10).

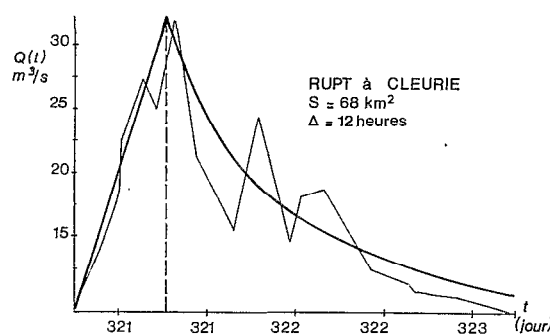


FIG. 10. — Ajustement de l'hydrogramme type sur une crue réelle.

Elle est plus simple que SOCOSE et plus précise que CRUPEDIX car, sans aucune complexité conceptuelle, elle améliore l'estimation du débit maximum instantané grâce à deux facteurs hydrologiques, qui sont le module et l'indice d'écoulement de base, comme variables explicatives supplémentaires. Cela nous permet de diminuer les intervalles de confiance d'environ 8 %.

Néanmoins, il faut noter que l'estimation de ces deux facteurs pour un bassin sans aucune mesure comporte une certaine erreur qui se reporte sur le calcul des crues et atténue le gain prévu.

Cette erreur devient négligeable lorsque l'on dispose d'une très courte durée d'observation qui se trouve ainsi valorisée pour l'estimation des crues.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 17 avril 1989

BIBLIOGRAPHIE

CHENG-LUNG, 1983. — Rainfall intensity-duration-frequency formula.

Ministère de l'Agriculture, 1980-1982. — Synthèse Nationale sur les crues des petits bassins versants. Fascicule 1 : éléments de pluviométrie ; fascicule 2 : la méthode SOCOSE ; fascicule 3 : la méthode CRUPEDIX ; fascicule 4 : caractéristiques averses-crues.

Natural Environment Research Council, London, 1975. — Flood studies report, vol. 1, hydrological studies.

WEISS (L.L.), 1964. — Ratio of true to fixed-interval maximum rainfall. *Journal of the Hydraulics Division*, January.