

Modèles débit-durée-fréquence et conceptualisation d'un hydrogramme de crue synthétique : validation sur le BVRE de Draix

Gilles GALÉA (1) et Christel PRUDHOMME (2)

RÉSUMÉ

Les modèles de régionalisation des crues, développés ces dernières années au Cemagref (groupement de Lyon), permettent de caractériser sous forme de courbes débit(Q)-durée-fréquence le régime hydrologique en crue de bassins versants observés ou non. Ces modèles dits QdF, notamment ceux développés à partir de l'analyse de débits seuils caractéristiques du régime d'écoulement, permettent aussi de construire, pour un site donné, un Hydrogramme Synthétique Mono-Fréquence (HSMF) dont le volume est cohérent avec celui du régime des débits. En particulier, grâce à leur grande représentativité spatiale et à leur large intégration d'échelle (en superficie et en durée), ces modèles QdF en débits seuils peuvent être utilisés pour déterminer des HSMF sur des petits bassins versants de montagne à écoulement rapide. Il s'en suit donc une présentation des modèles et des résultats de validation sur les bassins versants du Laval (0,86 km²) et de la Roubine (1 330 m²) du BVRE de Draix.

Ces modèles QdF, qui permettent de caractériser le régime hydrologique en crue en tout point d'un cours d'eau et de traduire une certaine demande sociale, sont des outils opérationnels privilégiés de la modélisation hydraulique intégrée de bassin.

MOTS CLÉS : Débits de crues — Hydrologie statistique — Modèles synthétiques (débit-durée-fréquence) — Hydrogramme de crue.

ABSTRACT

FLOW-DURATION-FREQUENCY MODELS AND CONCEPTUALIZATION OF A SYNTHETICAL FLOOD HYDROGRAPH : VALIDATION ON THE DRAIX ERB

Regionalisation flood models, developed last years in Cemagref (Lyon department) allow us to characterise, with Flow(Q)-duration-Frequency curves, the flood hydrological regime of catchments gauged or not. These models, named QdF, and particularly those developed from the analysis of threshold discharges, characteristics of the flow regime, also allow us construction, for a given site, of a Mono-Frequency Synthetic Hydrograph (MFSH), the volume of which being consistent with the flow regime. Because of their spatial representativity and their scale integration (both in area and in duration), QdF models in threshold discharge can be used to establish MFSH on small mountainous basins with rapid runoff. So we present these models and the validation results obtained on the basins of Le Laval (0.86 km²) and La Roubine (1,330 m²), ERB of Draix.

QdF models, characterising flood regime in every point of a river and expressing some social need, are favoured operational tools in integrated basin hydraulic modeling.

KEYWORDS : Flood — Statistical hydrology — Synthetical models (flow - duration - frequency) — Flood hydrograph.

(1) Division hydrologie-hydraulique, Cemagref groupement de Lyon, 3 bis. quai Chauveau, 69336 Lyon Cedex 09, France.

(2) Université de Montpellier-II, place Eugène-Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 05, France ; Cemagref Lyon, Division hydrologie-hydraulique — GIS-AMHY.

1. INTRODUCTION

Le sujet proposé se déduit logiquement d'une approche, développée depuis quelques années, sur la connaissance du régime d'écoulement en crue des bassins versants observés ou non, au sens synthétique des débits-durées-fréquences. Nous ferons donc quelques indispensables rappels, pour qu'il soit bien situé.

2. MODÈLES QdF : RAPPELS

2.1. VARIABLES HYDROLOGIQUES DE CRUE

L'analyse des crues d'un bassin versant concerne nécessairement les variables hydrologiques de crue (fig. 1) les plus couramment utilisées en aménagement (OBERLIN *et al.*, 1989 a) et pour des durées d qui varient en général de 1 s à 30 jours ($1s \leq d \leq 30 j$) :

— le débit moyen (Volume) Caractéristique sur une durée continue d , maXimal dans la saison, qui est noté VCXd par convention ;

— le débit seuil (Q) Caractéristique continûment dépassé sur la durée d , maXimal dans la saison, qui est noté QCXd par convention ;

— le débit classé (D) Caractéristique, dépassé sur une durée d non continue (cumul), maXimal dans la saison, qui est noté DCXd par convention. Cette variable représente une notion particulière de débit seuil, non liée à un événement hydrologique particulier, dont l'intérêt pratique est très réduit ; elle est donc citée ici à titre de comparaison.

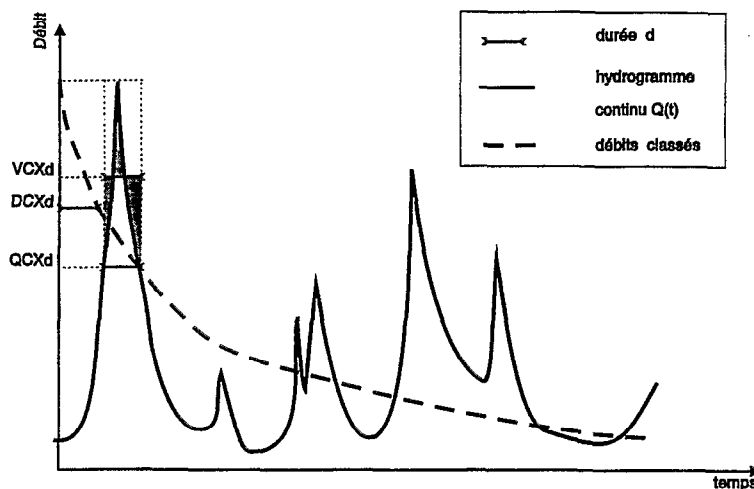


FIG. 1. — Définition des VCXd, QCXd et DCXd.

2.2. MODÈLES QdF EN VCXd

Le concept QdF (courbes débits (Q), durée (d), fréquence (F)) a été établi sur des bases objectives (GALÉA et PRUDHOMME, 1993) et son extension à des bassins versants non jaugés, par un processus de normalisation des courbes QdF, est à l'origine d'un outil puissant de modélisation dit QdF. Ce modèle permet de traduire, sous une forme synthétique opérationnelle, la grande variabilité spatio-temporelle des débits de crue (VCXd) d'un bassin versant observé ou non.

En France, trois modèles QdF de référence (Vandenesse, Soyans et Florac), dont les seules entrées sont les caractéristiques locales D et $QIXA10$ des bassins versants, permettent une bonne restitution des courbes débit-durée-fréquence des principaux régimes de crue observés. Nous rappelons que D est une durée caractéristique de crue du bassin versant. Au sens de la méthode de Socose (CTGREF, 1980-1982), elle est définie comme étant la valeur de la

médiane conditionnelle des $d_s(1)$ pour la valeur du débit (Q) Instantané maXimal Annuel décennal (QIXA10). La figure 2 montre l'estimation de la durée caractéristique de crue (D) du bassin versant de la Roubine ($S = 1\,330\text{ m}^2$) du BVRE de Draix, à partir d'hydrogrammes observés par le Cemagref (groupements d'Aix-en-Provence et Grenoble).

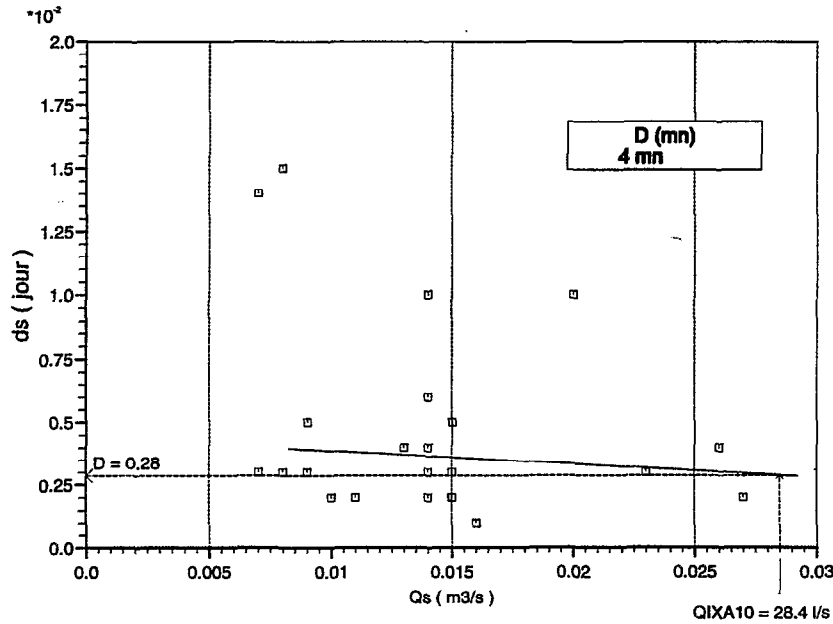


FIG. 2 a. — BVRE de Draix, la Roubine ($S = 1\,330\text{ m}^2$). Durée caractéristique de crue D du bassin.

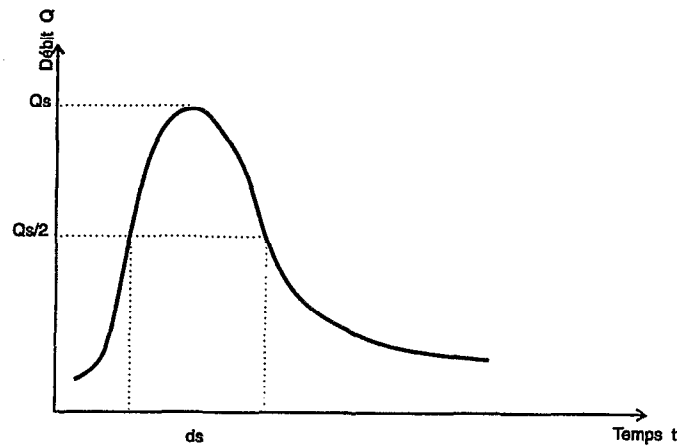


FIG. 2 b. — Crue : définition des caractéristiques d_s et Q_s (couples de la figure 2a).

Pour un bassin versant non observé, la validité du transfert effectué dépend du modèle QdF choisi, pour représenter le régime des crues, mais aussi de la précision de l'estimation des caractéristiques locales D et $QIXA10$, marqueurs du régime du site (GALÉA, 1989).

En l'absence d'information hydrométrique, diverses méthodes statistiques (CTGREF, 1980-1982 ; CEMAGREF-Lyon, 1989), ou plus conceptuelles (CEMAGREF-Lyon, 1994a) permettent d'estimer ces caractéristiques locales, notamment celles de petits bassins ($0,1 \leq S(\text{ha}) \leq 1\,500$) dont la réaction rapide (quelques min à 2 ou 3 h) à une précipitation est accompagnée d'un fort écoulement superficiel direct (ruissellement + hypodermique).

1 Pour une crue donnée, d_s est le temps pendant lequel la moitié du débit de pointe Q_s est dépassé.

2.3. CHOIX D'UN MODÈLE QdF, REPRÉSENTATIVITÉ POUR LE SITE ÉTUDIÉ

Le choix du modèle QdF, représentatif de l'écoulement d'un site, nécessite de considérer à la fois le gradex des pluies maximales (G_p) qui renseigne sur le régime pluviométrique (simple influence de type océanique, continentale ou méditerranéenne, ou influence complexe) et les caractéristiques locales D et $QIXA10$, marqueurs des processus de genèse des crues. La validation des trois modèles précités, sur une soixantaine de bassins versants, a permis de donner une représentation des couples (d/D , $G_p(d/D)/QIXA10$). La répartition de ces couples (fig. 3) montre que le domaine d'adéquation de Florac est intermédiaire entre celui de Vandenesse et celui de Soyans. Etant donné sa situation, une certaine dispersion expérimentale le caractérise. Pour y inclure le plus grand nombre de couples expérimentaux le concernant, nous avons opté pour un choix de limites (L_1 et L_2) dont les équations sont définies ci-après (PRUDHOMME, 1993) :

— Limite entre les modèles de Vandenesse et de Florac :

$$G_p(d/D)/QIXA10 = 1/(0,768.d/D + 2,332) \quad (L_1)$$

— Limite entre les modèles de Florac et de Soyans :

$$G_p(d/D)/QIXA10 = 1/(0,419.d/D + 1,580) \quad (L_2)$$

Autrement dit, selon que la valeur de $(G_p(d)/QIXA10)_{\text{site}}$ est inférieure à L_1 , comprise entre L_1 et L_2 , ou supérieure à L_2 , le choix du modèle portera respectivement sur Vandenesse, Florac ou Soyans.

Pour tenir compte de la dispersion expérimentale relative à la situation particulière du domaine de Florac, ce critère de choix doit être calculé pour plusieurs pas de temps. Le maximum de réalisations dans un domaine donné permettra alors de préciser le choix du modèle.

Si on considère par exemple le bassin versant de la Roubine ($D = 4$ min, $QIXA10 = 28.4$ l/s), on notera (tabl. I) les valeurs de gradex $G_p(d)$ des pluies maximales ; ensuite, pour différentes durées, on calcule L_1 , L_2 et le rapport

$L_0 = \frac{G_p(d)}{QIXA10}$. Le tableau II donne les valeurs des limites L_1 , L_2 et du rapport L_0 .

L_0 étant compris entre L_1 et L_2 , le choix portera donc sur le modèle QdF de Florac pour représenter l'écoulement en crue du bassin versant de la Roubine.

TABLEAU I
Gradex des pluies maximales représentatives du bassin versant

Gradex des pluies	d (h)				
	0,168	0,336	0,504	0,672	0,840
$G_p(d)$ (mm)	4,50	5,47	6,20	7,00	7,50
$G_p(d)$ (l/s)	9,90	6,01	4,54	3,85	3,30

TABLEAU II
Critères de détermination du modèle de référence, représentatif de l'écoulement en crue du bassin versant

	d (h)				
	0,168	0,336	0,504	0,672	0,840
L_2	0,380	0,272	0,211	0,173	0,146
L_0	0,349	0,211	0,160	0,136	0,116
L_1	0,235	0,162	0,123	0,100	0,084

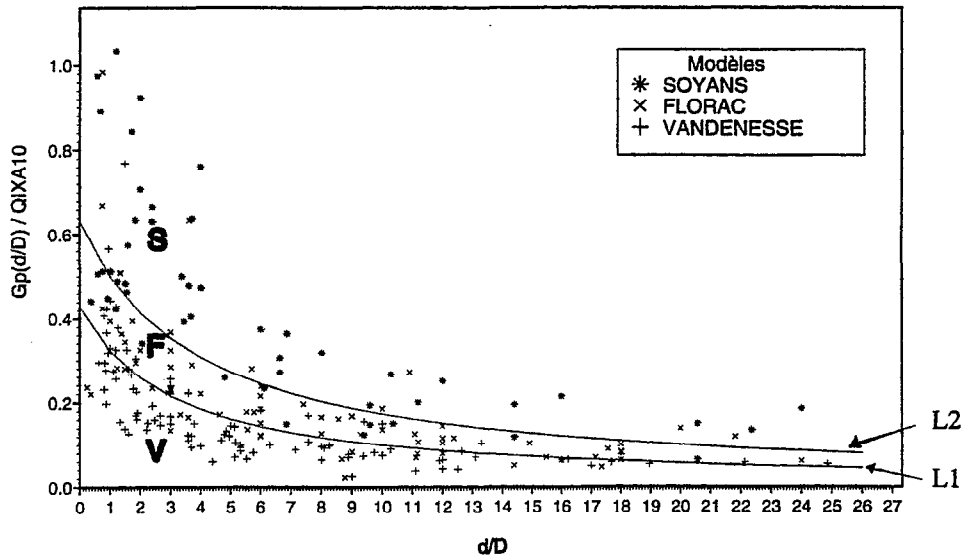


FIG. 3. — Critère de choix des modèles QdF.

3. MODÈLES QdF EN QCXd

Ces modèles, développés à partir de l'analyse des débits seuils (QCXd), répondent directement aux besoins hydrologiques d'une modélisation hydraulique intégrée de bassin. En effet, pour répondre à la demande sociale, notamment en matière de lutte contre les inondations, il est nécessaire de considérer les notions classiques de fréquence (2), mais aussi de durée de submersion (3) ou de hauteur maximale (4). Toutes ces notions doivent être comparées entre elles pour que l'on puisse définir des objectifs de protections clairs et concevoir des aménagements capables de prendre en compte l'ensemble de ces demandes (GILARD *et al.*, 1993). Les courbes QdF en QCXd rendent possible une telle comparaison, puisqu'elles permettent de transformer toutes ces demandes en une variable comparable, correspondant à la période de retour d'une crue de durée nulle, autrement dit la période de retour (T) du débit de pointe correspondant à l'Objectif de Protection (TOP). Par ailleurs, les entrées des modèles hydrauliques transitoires nécessitent des hydrogrammes de crue. Par cohérence avec le traitement des objectifs de protection, il est nécessaire d'établir, pour la modélisation hydraulique des aléas, des hydrogrammes monofréquence. Les Hydrogrammes Synthétiques Mono-Fréquences (HSMF) répondent à cette attente. Il est certain que cette cohérence n'implique pas pour autant qu'ils constituent des phénomènes réels, mais ils sont certainement plus réalistes que des hydrogrammes triangulaires déterminés à partir du seul débit de pointe, en ce sens qu'ils représentent la réunion des débits seuils maximaux dépassés, de même fréquence et pour différentes durées, qui sont des caractéristiques du régime d'écoulement du bassin versant. Par ailleurs, les volumes qu'ils définissent sont cohérents avec ceux pouvant être déduits des observations (cf. § 4).

3.1. DÉFINITION SYNTHÉTIQUE

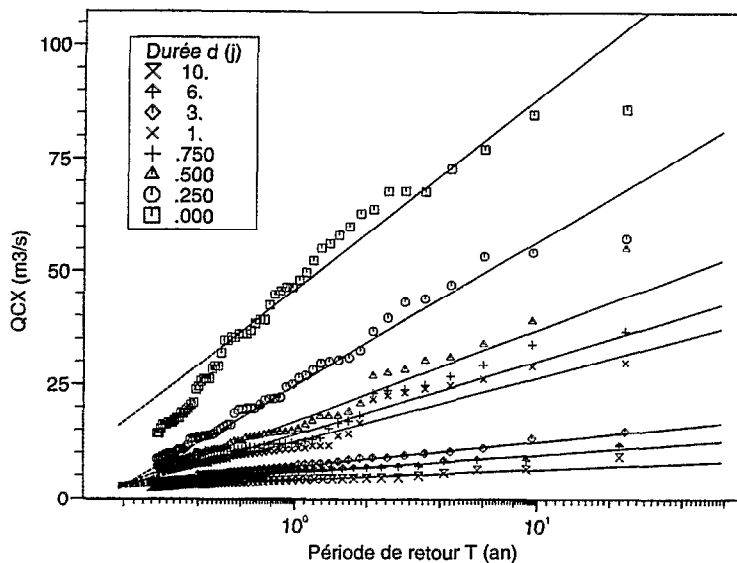
L'élaboration des modèles QdF pour les débits seuils QCXd suit la même démarche que celle mise en œuvre pour les débits moyens VCXd (GALÉA et PRUDHOMME, 1993). Par exemple, nous nous intéressons ici au modèle de Soyans.

Pour les fréquences observables ($T \leq 20$ ans), on vérifie que la distribution de fréquence des QCXd est de type exponentielle (fig. 4) ; loi ajustée par la méthode du maximum de vraisemblance.

(2) Un aménagement visera à se protéger d'une crue de fréquence centennale.

(3) Un champ pourra supporter d'être inondé pendant toute une semaine au maximum.

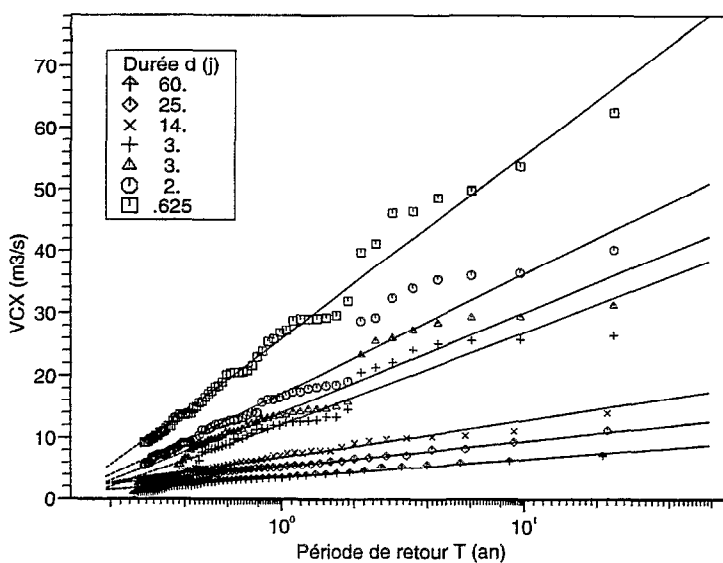
(4) Un verger ne supportera pas d'eau au-dessus de un mètre.



Loi exponentielle		
$QCX(T,d) = G_q(d) * \ln(T) + QCX_0(d)$		
Durée (d) (Jour)	$G_q(d)$ (m^3/s)	$QCX_0(d)$ (m^3/s)
0,000	18,3	46,3
0,250	13,8	25,1
0,500	8,70	17,1
0,750	7,00	14,2
1,000	6,08	12,6
3,000	2,34	7,23
6,000	1,71	5,76
10,000	0,982	4,21

FIG. 4. — Le Roubion à Soyans ($S = 186 \text{ km}^2$). Loi exponentielle $QCX(T,d) = G_q(d) \cdot \ln T + QCX_0(d)$.

Pour les fréquences rares ($T > 20$ ans), l'extrapolation des débits seuils par le gradex des pluies maximales est impossible. seuls les débits moyens sont extrapolables par la méthode du Gradex (MICHEL, 1982). Nous pouvons cependant remarquer, en comparant les distributions relatives aux $QCXd$ et $VCXd$ établies pour $0,5 \leq T \text{ (an)} \leq 20$, que pour toute distribution de fréquence des débits seuils $QCXd$ peut être trouvée une distribution de fréquence des débits moyens (tabl. III, fig. 4 et 5) telle que $QCX(T,d) = VCX(T,d')$ (GALÉA et PRUDHOMME, 1994). En supposant que cela reste vrai au-delà des fréquences observables, on peut utiliser cette « analogie statistique » pour définir des quantiles de débit seuil de fréquences rares.



Loi exponentielle		
$VCX(T,d) = G_q(d) * \ln(T) + VCX_0(d)$		
Durée (d) (Jour)	$G_q(d)$ (m^3/s)	$VCX_0(d)$ (m^3/s)
0,625	12,8	26,3
1,750	8,30	17,4
2,710	6,95	14,2
3,460	6,40	12,4
14,000	2,59	6,90
25,000	1,79	5,37
60,000	1,30	3,61

FIG. 5. — Le Roubion à Soyans ($S = 186 \text{ km}^2$). Loi exponentielle $VCX(T, d) = G_q(d) \cdot \ln T + VCX_0(d)$.

TABLEAU III
Analogie établie entre les quantiles de débit seuil et les quantiles de débit moyen

Quantile de débit	T (an)					
	0,5	1	2	5	10	20
QCX(T,d = 6 h)	15,5	25,1	34,7	47,3	56,9	66,4
VCX(T,d' = 15 h)	17,4	26,3	35,2	46,9	55,7	64,6
QCX(T,d = 12 h)	11,2	17,2	23,2	31,1	37,1	43,2
VCX(T,d' = 42 h)	11,7	17,4	23,1	30,7	36,5	42,2
QCX(T,d = 18 h)	9,35	14,2	19,1	25,5	30,3	35,2
VCX(T,d' = 65 h)	9,49	14,3	19,1	25,5	30,3	35,1
QCX(T,d = 24 h)	8,49	12,6	16,9	22,5	26,7	30,9
VCX(T,d' = 83 h)	7,96	12,4	16,8	22,7	27,1	31,6
QCX(T,d = 3 j)	5,61	7,23	8,85	11,0	12,6	14,2
VCX(T,d' = 14 j)	5,11	6,90	8,70	11,1	12,9	14,7
QCX(T,d = 6 j)	4,58	5,76	6,95	8,51	9,70	10,9
VCX(T,d' = 25 j)	4,13	5,37	6,61	8,25	9,49	10,7
QCX(T,d = 10 j)	3,53	4,21	4,89	5,79	6,47	7,15
VCX(T,d' = 60 j)	2,70	3,60	4,50	5,69	6,59	7,49

Nous rappelons que pour les VCXd (et pour $d \geq D/2$), nous avons utilisé une des variantes de l'extrapolation par le Gradex (MICHEL et OBERLIN, 1987), la forme ci-après (1), dite d'extrapolation esthétique (MICHEL, 1982) :

$$VCX(T, d) = VCX(T = 10, d) + G_p(d) \cdot \ln \left(1 + \frac{G_q(d)}{G_p(d)} \cdot \frac{T - 10}{10} \right) \quad (1)$$

où — $VCX(T=10,d)$ = seuil d'extrapolation déduit de la loi exponentielle (fig. 5) ;

— $G_q(d)$ = Gradex des débits pour la durée d ;

— $G_p(d)$ = Gradex des pluies maximales sur la durée continue d (exprimé dans la même unité que les débits). Comme pour les débits, on vérifie pour les pluies maximales le même type de loi exponentielle.

De la même manière que pour l'extrapolation des VCXd aux fréquences rares, nous utilisons pour les QCXd la forme (1) mais cette fois-ci avec un gradex des pluies maximales de durée d' (tabl. III) :

$$QCX(T, d) = QCX(T = 10, d) + G_p(d') \cdot \ln \left(1 + \frac{G_q(d)}{G_p(d')} \cdot \frac{T - 10}{10} \right) \quad (2)$$

Ainsi, peuvent être définies des courbes QdF de débits seuils maximaux pour des périodes de retour fréquentes ($T = 0,5$ an) à rares ($T = 1\ 000$ ans).

3.2. PRÉSENTATION FORMELLE

La présentation formelle des modèles QdF en QCXd est analogue à celle des modèles QdF en VCXd (GALÉA et PRUDHOMME, 1993). Nous présentons ci-après les équations générales des modèles QdF avec les paramètres x_i auxquels ils sont associés pour décrire les quantiles de crue $Q(T,d)$ relatifs aux débits moyens (VCXd) ou aux débits seuils (QCXd).

L'utilisation générale des modèles QdF peut être faite dans les limites suivantes, validées sur des BVRE et plus d'une centaine de bassins versants observés en France et en Europe (PRUDHOMME, 1993) :

$$0,0003 \leq d \text{ (h)} \leq 720 \quad 0,5 \leq T \text{ (an)} \leq 1\,000$$

$$\text{(instantanée) (30 jours)} \quad 0,001 \leq S \text{ (km}^2\text{)} \leq 4\,000$$

Pour $0,5 < T \text{ (an)} \leq 20$: généralisation d'une loi exponentielle adaptée aux valeurs supérieures à un seuil, avec d/D et QIXA10 :

$$Q(T, d) = (A \cdot \ln(T) + B) \cdot \text{QIXA10} \quad (3)$$

avec

$$A = \frac{1}{x_1 \cdot d/D + x_2} + x_3$$

$$B = \frac{1}{x_4 \cdot d/D + x_5} + x_6$$

Pour $20 < T \text{ (an)} \leq 1\,000$: généralisation de la forme d'extrapolation esthétique (1) des débits par le gradex des pluies maximales (MICHEL, 1982) avec d/D et QIXA10 :

$$Q(T, d) = Q(10, d) + \left(C \cdot \ln \left(1 + \frac{A}{C} \cdot \frac{T - 10}{10} \right) \right) \cdot \text{QIXA10} \quad (4)$$

où $Q(10, d)$ est obtenu par la formule (3).

$$\text{avec } C = \frac{1}{x_7 \cdot d/D + x_8} + x_9$$

Le tableau IV récapitule les paramètres x_i relatifs à chacun des trois modèles QdF (en VCXd ou QCXd).

TABLEAU IV
Paramètres des modèles QdF

Modèles QdF	PARAMETRES (x_i)								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
Vandenesse									
VCXd	2,635	6,19	0,016	1,045	2,385	0,172	1,083	1,750	0,000
QCXd	3,970	6,48	0,010	1,910	1,910	0,097	3,674	1,774	0,013
Florac									
VCXd	1,12	3,56	0,00	0,95	3,18	0,039	1,56	1,91	0,085
QCXd	3,05	3,53	0,00	2,13	2,96	0,010	2,78	1,77	0,040
Soyans									
VCXd	0,87	4,60	0,00	1,07	2,50	0,099	0,569	0,690	0,046
QCXd	2,57	4,86	0,00	2,10	2,10	0,05	1,490	0,660	0,017

Remarques :

Les nombreuses validations des modèles QdF de référence sur des sites observés (PRUDHOMME, 1993) ont permis de vérifier les hypothèses initiales de transfert, à savoir que :

$$\left(\frac{Q(T, d/D)}{\text{QIXA10}} \right)_{\text{bassin de référence}} = \left(\frac{Q(T, d/D)}{\text{QIXA10}} \right)_{\text{bassin non observé}}$$

avec

$$\left(\frac{d}{D} \right)_{\text{bassin de référence}} = \left(\frac{d}{D} \right)_{\text{bassin non observé}}$$

De même, pour les fréquences rares ($T > 20$ ans), le terme C de la relation (4) représente un gradex des pluies maximales implicite tel que :

$$\left(\frac{G_p(d/D)}{QIXA10} \right)_{\text{bassin de référence}} = \left(\frac{G_p(d/D)}{QIXA10} \right)_{\text{bassin non observé}}$$

3.3. PROPRIÉTÉ DES COURBES QdF EN QCXd (EX. : MODÈLE DE SOYANS)

Pour analyser les propriétés des courbes QdF, nous avons considéré le modèle de Soyans.

Les caractéristiques locales du bassin versant du Roubion à Soyans (186 km²) sont $D = 6$ h et $QIXA10 = 88,5$ m³/s. À partir des équations du modèle de Soyans (équations (3) et (4) associées aux paramètres du tableau IV)

TABLEAU V
Quantiles de débit moyen déterminés à partir des observations (VCX(T, d)) et calculés (VCX'(T,d))
par intégration des courbes QdF en QCX(T,d)

d	T(an)								
(h)	0.5	1	2	5	10	20	50	100	1000
0,0003	33,70	46,40	59,10	75,90	88,50	101,00	159,00	214,00	446,00
0,0003	33,90	46,60	59,20	75,90	88,50	101,00	147,00	196,00	449,00
6,0	24,10	35,50	46,90	62,10	73,50	84,90	121,00	156,00	310,00
6,0	23,60	33,70	43,90	57,30	67,40	77,50	110,00	142,00	286,00
12,0	18,70	28,40	38,10	50,90	60,60	70,30	98,20	124,00	228,00
12,0	19,00	27,60	36,20	47,60	56,20	64,90	90,80	115,00	222,00
18,0	15,70	24,40	33,10	44,50	53,20	61,80	85,40	106,00	189,00
18,0	16,40	23,90	31,50	41,50	49,10	56,60	78,60	99,00	186,00
24,0	13,80	21,70	29,60	40,00	47,90	55,90	76,50	94,40	165,00
24,0	14,60	21,40	28,20	37,20	43,90	50,70	70,00	87,60	162,00
48,0	11,80	16,80	21,80	28,40	33,40	38,40	51,70	63,30	109,00
48,0	11,10	16,00	21,00	27,50	32,40	37,40	50,70	62,70	112,00
72,0	10,20	14,30	18,40	23,90	28,00	32,10	42,80	52,00	88,20
72,0	9,47	13,40	17,40	22,70	26,60	30,60	41,20	50,50	88,60
144,0	9,03	11,40	13,80	16,90	19,30	21,60	28,10	34,00	57,40
144,0	7,48	10,10	12,70	16,10	18,70	21,30	28,20	34,20	58,50
240,0	5,91	8,02	10,10	12,90	15,00	17,10	22,50	27,00	44,70
240,0	6,49	8,34	10,20	12,60	14,50	16,30	21,20	25,60	43,00
720,0	3,62	4,87	6,12	7,77	9,02	10,30	13,20	15,60	24,60
720,0	5,29	6,11	6,94	8,03	8,86	9,69	12,00	14,10	23,00

Pour chaque durée d et période de retour T : 1^{re} ligne : VCX(T,d) (ex. 33,7) ; 2^e ligne : VCX'(T,d) (ex. 33,9).

et de ses caractéristiques, on peut calculer les quantiles de crue en débits seuils pour toute fréquence et toute durée comprises dans les limites fixées au § 3.2. On peut reporter dans un système d'axes orthonormés ces courbes QdF (monofréquence) de débits seuils, puis calculer pour chacune d'elles les volumes correspondant à différentes durées. On remarque que l'on obtient des volumes égaux aux débits moyens maximaux calculés sur les mêmes durées à partir des observations, ou tout simplement à partir du modèle QdF en VCXd. Cette propriété vérifiée sur les observations reste vraie pour les extrapolations aux fréquences rares (tabl. V). Ces derniers résultats satisfaisants permettent de valider la démarche d'extrapolation présentée antérieurement (§ 3.1).

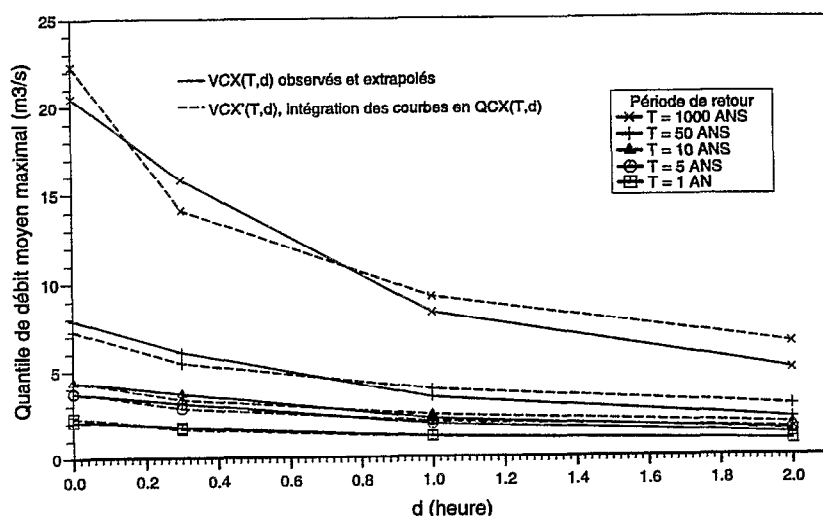
Il va de soi que cette propriété des courbes QdF en QCXd revêt un intérêt majeur pour la conceptualisation des hydrogrammes de crue nécessaires à la modélisation hydraulique transitoire (cf. § 4). Cela est particulièrement vérifié pour le modèle Inondabilité (GILARD *et al.*, 1993) où les propriétés des courbes QdF en QCXd énoncées antérieurement, et plus précisément de conservation des volumes, permettent de croiser vulnérabilité et aléa hydrologique pour une cartographie réaliste du risque d'inondation.

3.4. EXEMPLES DE VALIDATION DES MODÈLES QdF EN QCXd — BVRE DE DRAIX

Nous avons vérifié les propriétés des modèles QdF en QCXd sur deux petits bassins versants du BVRE de Draix (Alpes-de-Haute-Provence). Le bassin versant du Laval ($S = 0,86 \text{ km}^2$, $D = 0,33 \text{ h}$, et $QIXA10 = 4,39 \text{ m}^3/\text{s}$) est représenté par le modèle QdF de Soyans (fig. 6). Le bassin versant de la Roubine ($S = 1\,330 \text{ m}^2$, $D = 0,067 \text{ h}$, et $QIXA10 = 28,4 \text{ l/s}$) est modélisé par le modèle QdF de Florac (fig. 7). Pour ces deux bassins versants, nous vérifions bien la propriété de conservation des volumes des courbes QdF en QCXd, relatives à chaque modèle.

4. HYDROGRAMME SYNTHÉTIQUE MONOFRÉQUENCE (HSMF)

Les modèles QdF, établis pour une « signature » des débits seuils dépassés QCXd pendant une durée continue d , permettent de concevoir la représentation synthétique d'un hydrogramme monofréquence (non naturel, mais représentatif du régime des crues), appelé HSMF. Cet hydrogramme monofréquence (ex. fig. 8 : HSMF centennial du bassin versant de la Roubine) est défini par son débit de pointe, une courbe de montée (droite) dont le temps (t_m) est égal à la durée caractéristique de crue (D) du bassin versant et d'une courbe de décrue correspondant ici à la



Validation du modèle QdF de Soyans sur les observations

d (h)	T(an)					
	0.5	1	2	5	10	20
0,0003	1,43	2,12	2,80	3,71	4,39	5,08
0,0003	1,68	2,31	2,93	3,76	4,39	5,01
0,5000	0,86	1,14	1,42	1,79	2,07	2,35
0,5000	0,71	1,06	1,40	1,87	2,22	2,56
1,0000	0,60	0,78	0,95	1,18	1,36	1,53
1,0000	0,50	0,74	0,98	1,30	1,55	1,79
1,5000	0,51	0,69	0,87	1,10	1,28	1,46
1,5000	0,41	0,60	0,78	1,03	1,21	1,40
2,0000	0,46	0,63	0,80	1,03	1,20	1,37
2,0000	0,37	0,52	0,67	0,87	1,02	1,17
2,5000	0,39	0,52	0,65	0,82	0,95	1,09
2,5000	0,34	0,47	0,59	0,76	0,88	1,01

∇ d : 1^{re} ligne : QCX(T,d) observé ;
2^e ligne : QCX(T,d) modélisé.

FIG. 6. — BVRE de Draix, le Laval ($S = 0,86 \text{ km}^2$). Validation du modèle QdF de Soyans en QCXd.

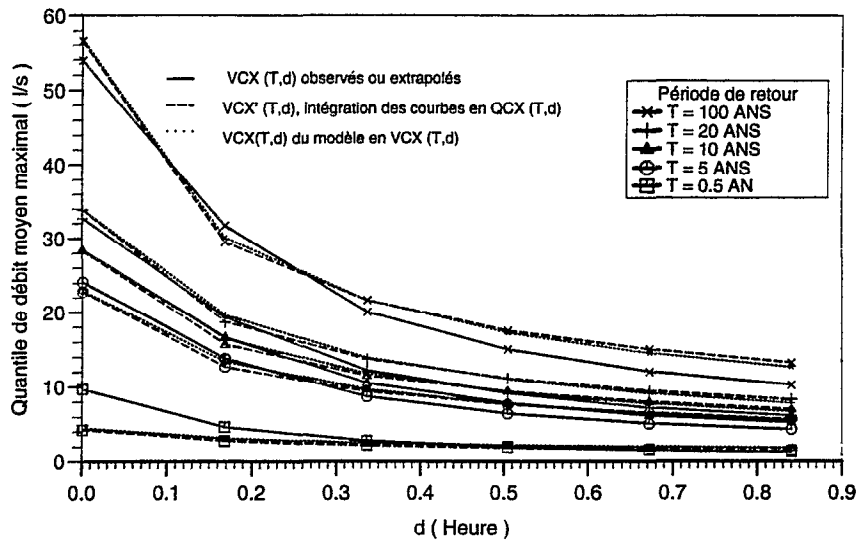


FIG. 7. — BVRE de Draix, la Roubine (S = 1 330 m²). Validation du modèle QdF de Florac en QCXd.

courbe QdF centennale (T = 100 ans) en QCX(T,d) pour 0,0003 ≤ d (h) ≤ 0,840. Celle-ci est obtenue à partir des équations (3) et (4) du modèle QdF de Florac (paramètres du tableau IV), connaissant D = 0,067 h et Q_{IXA10} = 28,4 l/s.

TABLEAU VI
 Vérification de la cohérence du volume de l'HSMF (cf. fig. 8)

d(h)	0,0003	0,168	0,336	0,504	0,672	0,840
VCX(100,d) l/s	53,9	31,7	20,0	15,0	12,0	10,2
VCX'(100,d) l/s	56,5	29,5	21,6	17,5	15,0	13,2

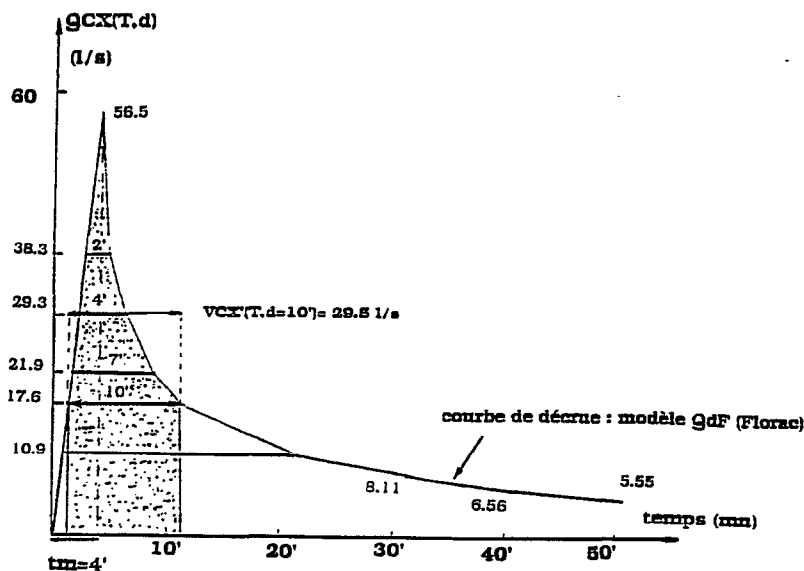


FIG. 8. — HSMF (T = 100 ans) du bassin de la Roubine (S = 1 330 m²).

L'intégration de cet hydrogramme (HSMF), en valeur de volume centrée sur le débit de pointe (ex. : $d = 10'$ de la figure 8), permet d'obtenir un quantile de débit moyen maximal $VCX'(T,d)$ proche (tabl. VI) de la réalité observée (cf. fig. 7) ou modélisée ($VCX(T,d)$).

Ainsi par construction, l'HSMF vérifie la propriété énoncée antérieurement (respect des volumes), quel que soit le temps de montée.

Par ailleurs, diverses études (GALÉA *et al.*, 1991 ; CEMAGREF-Lyon, 1994 b ; etc.) ont permis de montrer que le temps de montée (t_m) est voisin de la durée caractéristique de crue du bassin versant ($t_m = D$). Si pour une raison ou pour une autre, le temps de montée choisi est différent de D ($t_m \neq D$), il doit cependant satisfaire à la condition générale $t_m \leq D$.

5. CONCLUSION

Les résultats satisfaisants obtenus sur les bassins versants du Laval et de la Roubine permettent d'étendre la validité de la méthodologie QdF à des bassins de faible superficie, notamment rapides. De manière générale, ces modèles QdF permettent de caractériser le régime hydrologique en crue en tout point d'un cours d'eau. Selon que l'on se déplacera de l'aval vers l'amont, on fera de l'upstreaming, ou vice versa, du downstreaming. Cette propriété d'intégration d'échelle, liée à la superficie en particulier, permet de concevoir à partir des modèles QdF à large représentativité spatiale une approche réaliste de la régionalisation des régimes d'écoulement en crue des bassins versants observés ou non (PRUDHOMME, 1993).

Par ailleurs, les modèles QdF en QCXd (courbes débit-durée-fréquence et HSMF en particulier) sont des outils qui répondent bien à une conception rationnelle des projets d'aménagements intégrés de bassin où la diversité des objectifs considérés ne permet plus de se contenter d'une unique crue de projet et où l'économie ne permet pas non plus d'opérer des simulations continues $Q(P)$ de longue durée. Cela est particulièrement vrai en inondation (OBERLIN *et al.*, 1989 b), où les besoins réels de protection sont liés à l'occupation des sols et toujours exprimables (traduction de la demande sociale) *in fine* en durée-fréquence, profondeur et vitesse d'une inondation acceptable ou devant être tolérée. Les HSMF, de par leurs propriétés (respect du quantile de débit moyen maximal sur d , et représentativité du régime des crues) et leur simplicité de définition (cf. ci-dessus), sont d'usage courant en aménagement de cours d'eau (CEMAGREF, 1992) et constituent plus particulièrement les entrées hydrologiques des modèles hydrauliques transitoires utilisés en prévention contre les inondations.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les services producteurs et gestionnaires (Diren) de l'information hydrométrique sur la banque nationale Hydro, en particulier Rhône-Alpes, Languedoc-Roussillon et Bourgogne. Nous remercions également l'équipe gestionnaire du BVRE de Draix (Cemagref, groupements de Grenoble et d'Aix-en-Provence, ONF-RTM de Digne) pour la fourniture et la critique des données des bassins du Laval et de la Roubine.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 6 janvier 1995

BIBLIOGRAPHIE

- CTGREF, SRAE, DIAME, SH, 1980-1982 — *Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants*. Fascicule 2 : « La méthode SOCOSE » in : Information Technique, n° 38-2 (juin 1980). Fascicule 3 : « La méthode CRUPEDIX ».
- CEMAGREF-Lyon, 1989 — *Analyse des crues des petits bassins versants du Sud-Est de la France. Estimation sommaire des débits décennaux et biennaux par des méthodes de type CRUPEDIX et SOCOSE régionalisées*. Document de synthèse, IX^e contrat de plan État-Région. Collaboration des laboratoires suivants : LAMA (CNRS, URA 344), SRAE Rhône-Alpes et Provence-Côte-d'Azur. Producteurs de données : SRAE, SN, EDF, Cemagref.
- CEMAGREF-Lyon, 1992 — *Étude de l'inondabilité du bassin du Rival*. Cemagref-Lyon, Div. hydrologie-hydraulique.
- CEMAGREF-Lyon, 1994 a — *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en vignoble de coteau (actualisation)*. Guide à l'usage des aménageurs.
- CEMAGREF-Lyon, SOGREAH, SIEE, 1994 b — *Étude hydrologique du bassin versant de l'Ouvèze*.
- GALÉA (G.), 1989 — Prédétermination de quantiles de crue, formulations sommaires (SOCOSE, CRUPEDIX) et formulation QdF. Note interne 14.06.89, Cemagref-Lyon, Div. hydrologie-hydraulique.

- GALÉA (G.), RAMEZ (P.), RIBOT (J.B.), 1991 — Érosion en vignoble, actualisation des outils de maîtrise et incidence sur les aménagements réalisés, site expérimental de Mercurey (Saône-et-Loire, région Bourgogne). Cemagref-Lyon, Div. hydrologie-hydraulique, HHLY 10.12.91.
- GALÉA (G.), PRUDHOMME (C.), 1993 — « Characterization of large scale variations in river flow behaviour with reference to hydrological macro-regionalization ». In : FRIEND Conference, Technische Universität Braunschweig, 11-15 oct. 1993.
- GALÉA (G.), PRUDHOMME (C.), 1994 — « The Mono-Frequency synthetic hydrograph (MFSH) concept : definition, interest and construction from regional QdF models built with threshold discharges, for little mountainous basins with rapid runoff ». In : International Conference, 12-16 sept. 1994, Stara Lesna (Slovakia).
- GILARD (O.), OBERLIN (G.), CHASTAN (B.), GIVONE (P.), 1993 — « Inondabilité : une méthode pour gérer rationnellement l'occupation des sols en lit majeur ». In : Réunion de la V^e section du CCGREF., 17 nov. 1993.
- MICHEL (C.), 1982 — *Extrapolation par la méthode de GRADEX*. Note interne n° KG 03.05.82, Cemagref-Antony, Div. hydrologie.
- MICHEL (C.), OBERLIN (G.), 1987 — Seuil d'application de la méthode du GRADEX. Cemagref-Antony, Div. hydrologie-hydraulique, *La Houille Blanche* n° 3.
- OBERLIN (G.), BEN MANSOUR (H.), ORTIZ (R.), 1989 a — Generalization and standardization for 3 types of flow-duration-frequency curves in flood regime description and transfert. Friends in Hydrology, Bolkesjö, *AISH*, n° 187.
- OBERLIN (G.), GALÉA (G.), GIVONE (P.), 1989 b — « Inondabilité, comment progresser ? ». In : Journées d'études organisées à Tonnerre (Bourgogne) par l'AFBSN sur l'aménagement et l'entretien des rivières, Cemagref-Lyon, Div. hydrologie-hydraulique.
- PRUDHOMME (C.), 1993 — *Analyse et régionalisation des régimes hydrologiques méditerranéens*. Thèse doct. Hydrol. (en cours), Cemagref-Lyon, Div. hydrologie-hydraulique, LHM USTL, Montpellier.