

Notions de base et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QdF

Basic notions and useful concepts for understanding the modeling of flood regimes of basins in QdF models

G. Galéa et C. Prudhomme

Volume 10, numéro 1, 1997

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705271ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705271ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Galéa, G. & Prudhomme, C. (1997). Notions de base et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QdF. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 10(1), 83–101. <https://doi.org/10.7202/705271ar>

Résumé de l'article

Ces dernières années a été développé, au Cemagref du groupement de Lyon, un outil de synthèse (dit QdF) des régimes de crue des bassins versants, selon une approche multidurées et multifréquences des crues observées. QdF est donc un modèle continu de prédétermination des crues fréquentes à rares d'un bassin versant (observé ou non), qui permet de répondre à une conception de gestion intégrée des cours d'eau et de leurs bassins versants. Il nous a semblé utile, tout en se référant aux principales publications et travaux de thèses, d'insister sur les notions de base et les concepts à l'origine des modèles QdF. Les variables hydrologiques étudiées, débit moyen maximal ($VCXd$) et débit seuil maximal ($QCXd$) sont relatives à une durée continue d pouvant varier d'une seconde à trente jours. Pour tout échantillon de durée d , constitué selon une technique d'échantillonnages de valeurs maximales indépendantes au dessus d'un seuil donné, l'adéquation de la loi exponentielle est en général vérifiée pour les fréquences observables ($0.5 < T(an)^2 < 20$). Pour l'extrapolation aux fréquences rares ($20 < T(an)^2 < 1000$) une forme théorique dite esthétique du GRADEX est privilégiée. Des lois théoriques, relatives aux observations et extrapolations, peuvent être ensuite déduites les courbes débit (Q)-durée (d)-fréquence (F) d'un bassin versant. Le choix de deux descripteurs du régime local qui renseignent sur la fonction de transfert (D) et sur la fonction de production ($QIXA10$) permettent de rendre adimensionnel le faisceau de courbes QdF précédent. A partir de ce dernier faisceau, il est possible de transférer sur un site quelconque, dont les descripteurs D et $QIXA10$ sont connus, des quantiles de crue pour toute durée et toute fréquence. L'opération est grandement facilitée par un formalisme mathématique (*modèle QdF*) de ce faisceau de courbes adimensionnelles. Les trois modèles QdF opérationnels actuels, chacun d'eux étant représentatif d'une famille hydrologique de bassins versants, ont permis lors de nombreuses applications de rendre bien compte de la grande variabilité spatio-temporelle des débits.

Notions de base et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QdF

Basic notions and useful concepts for understanding
the modeling of flood regimes of basins in QdF models

G. GALÉA^{*,1} et C. PRUDHOMME²

Reçu le 20 juillet 1995, accepté le 18 novembre 1996*.

SUMMARY

Using a multi-duration and multi-frequency description of observed flows, we have recently developed the Cemagref QdF model to represent watershed flood regimes. The model is also used for the predetermination of flood characteristics, on both gauged and ungauged watersheds, in the range of frequent to rare floods. By allowing upstream and downstream recalculation of flood characteristics, the model answers questions relevant to integrated river management. In the present article we have emphasized the basic notions and concepts underlying the QdF models; more detailed descriptions can be found in the referenced publications and theses. The studied hydrologic variables, maximal average flow ($VCXd$) and maximal threshold discharge ($QCXd$), are linked to continuous duration, d , which can vary from one second to thirty days. For every sample of duration d , composed with a sampling method of independent maximal values above a given threshold, the exponential law is generally adequate for mean return periods, for means in the range from 0.5 to 20 years ($0.5 \leq T(\text{year}) \leq 20$). A theoretical form, called "esthetic" GRADEX, is used to extrapolate observed floods to rare frequencies floods ($20 < T(\text{year}) \leq 1000$). From theoretical laws, relative to observations and extrapolations, discharge (Q) - duration (d) - Frequency (F) curves of a basin are then deduced. Using two basin descriptors, one for the transfer function (D parameter) and one for production (QIXA10 parameter), the preceding curves are then converted into an adimensional or normative form. Such dimensionless curves are then used to predetermine floods quantiles for all durations and frequencies, both on gauged and ungauged basins, using known site parameters D and QIXA10. Quantiles are easily computed from a mathematical formulation (QdF model) of normative QdF curves. Validation of QdF curves on about 250 basins revealed three main groups of hydrological flood regimes. Using the same mathematical form, the great diversity in flood characteristics in each group is well represented by one set of model para-

1. Cemagref-Lyon, Division Hydrologie Hydraulique, 3bis, quai Chauveau, 69336 Lyon Cedex 09, France.

2. LHM, université Montpellier II, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 05, France.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 31 octobre 1997.

meters. The great variability of floods in space and time could then be predetermined in all basins, using three sets of fixed model parameters.

Key words : *flood, statistical hydrology, synthetic models (flow-duration-frequency).*

RÉSUMÉ

Ces dernières années a été développé, au Cemagref du groupement de Lyon, un outil de synthèse (dit QdF) des régimes de crue des bassins versants, selon une approche multidurées et multifréquences des crues observées. QdF est donc un modèle continu de prédétermination des crues fréquentes à rares d'un bassin versant (observé ou non), qui permet de répondre à une conception de gestion intégrée des cours d'eau et de leurs bassins versants. Il nous a semblé utile, tout en se référant aux principales publications et travaux de thèses, d'insister sur les notions de base et les concepts à l'origine des modèles QdF. Les variables hydrologiques étudiées, débit moyen maximal ($VCXd$) et débit seuil maximal ($QCXd$) sont relatives à une durée continue d pouvant varier d'une seconde à trente jours. Pour tout échantillon de durée d , constitué selon une technique d'échantillonnages de valeurs maximales indépendantes au-dessus d'un seuil donné, l'adéquation de la loi exponentielle est en général vérifiée pour les fréquences observables ($0,5 \leq T(\text{an}) \leq 20$). Pour l'extrapolation aux fréquences rares ($20 < T(\text{an}) \leq 1\ 000$) une forme théorique dite esthétique du GRADEX est privilégiée. Des lois théoriques, relatives aux observations et extrapolations, peuvent être ensuite déduites les courbes débit (Q) - durée (d) - fréquence (F) d'un bassin versant. Le choix de deux descripteurs du régime local qui renseignent sur la fonction de transfert (D) et sur la fonction de production ($QIXA10$) permettent de rendre adimensionnel le faisceau de courbes QdF précédent. A partir de ce dernier faisceau, il est possible de transférer sur un site quelconque, dont les descripteurs D et $QIXA10$ sont connus, des quantiles de crue pour toute durée et toute fréquence. L'opération est grandement facilitée par un formalisme mathématique (*modèle QdF*) de ce faisceau de courbes adimensionnelles. Les trois modèles QdF opérationnels actuels, chacun d'eux étant représentatif d'une famille hydrologique de bassins versants, ont permis lors de nombreuses applications de rendre bien compte de la grande variabilité spatio-temporelle des débits.

Mots-clés : *débits de crue, hydrologie statistique, modèles synthétiques (débit-durée-fréquence).*

1 - INTRODUCTION

Les recherches menées ces dernières années au Cemagref (*groupement de Lyon*), autour de la modélisation régionale, ont permis d'aboutir à la mise au point de modèles synthétiques, dits QdF, qui permettent une bonne représentation différenciée, en débit (Q)-durée (d)-fréquence (F), des principaux régimes hydrologiques de crue, de bassins versants observés tant en France qu'en Europe. Elles ont donné lieu à différentes publications qui ont surtout traité de leur évolution mathématique et de leur validation, les notions de base et certains concepts à l'origine des modélisations ayant été présentés par OBERLIN (1989). Nous nous proposons ci-après, pour répondre à certaines difficultés rencontrées par les utilisateurs, notamment non hydrologues, de présenter les modèles QdF en rappelant les concepts et certains aspects méthodologiques de la modélisation synthétique des régimes de crue.

Une constatation générale (PRUDHOMME, 1995) est que la littérature scientifique internationale montre peu de modèles synthétiques régionaux traitant des débits-volumes (*moyens*) et des débits-seuils selon une approche multidurées et multifréquences des crues. On peut citer les travaux de BALOCKI et BURGES (1994) qui s'apparentent un peu à notre démarche. Par ailleurs, ces modèles se différencient dans leur conception des modèles classiquement utilisés en hydrologie régionale. Ces derniers, établis à partir d'une synthèse de l'information disponible (*pluie, débit, etc.*) dans un espace géographique donné (*territoire, bassin hydrographique, région, etc.*), ont en général une représentativité exclusivement liée à cet espace géographique. Le modèle de synthèse QdF quant à lui est établi à partir des seules observations (*pluie, débit*) d'un bassin versant particulièrement choisi et représentatif d'une typologie des régimes d'écoulement, ce qui lui confère une large représentativité spatiale, tant au niveau national qu'au niveau international, comme l'ont montré les nombreuses collaborations au sein du réseau UNESCO/FRIEND.

En ce qui concerne les variables hydrologiques de ces modèles QdF, il nous a semblé nécessaire, pour que leur définition et leur choix puissent être mieux perçus, de les présenter parmi l'ensemble des variables hydrologiques, relatives aux crues et étiages, caractéristiques du régime d'écoulement d'un bassin versant.

L'Hydrologie est une science relativement complexe qui fait intervenir un nombre important de notions relatives, entre autres, à l'hydrométrie (*section de contrôle, tarage, pas de temps d'acquisition, discrétisation, chroniques de débit, etc.*), à l'hydrologie descriptive d'événements observés, tant pluviométriques (*pluie maximale locale, pluie maximale sur une région donnée (épicentrage), etc.*) qu'hydrométriques (*crue : débit de pointe, temps de montée, durée, etc.*) et à l'hydrologie quantitative (*variable hydrologique, saison, loi, fréquence, quantile, modèle, etc.*). L'imbrication de ces différentes notions et la technicité de l'approche hydrologique proprement dite font que les résultats de l'hydrologie opérationnelle, qui doivent être souvent repris par des non spécialistes, apparaissent complexes et peu interprétables. Il est donc nécessaire de les expliciter et de les « simplifier ».

La notion de *durée* est évidemment essentielle dans une science traitant de chroniques temporelles. En outre, en matière d'étude des régimes de crue des bassins versants, il est nécessaire, pour la bonne compréhension des développements ultérieurs, de prêter une attention particulière à cette notion de durée qui intervient dans bon nombre de concepts hydrologiques concernant en particulier la définition et le choix des variables hydrologiques, la caractérisation de l'écoulement d'un bassin versant (*transfert plus ou moins rapide*), la demande sociale en matière de besoins, de risques, de dégâts, etc., toutes choses étroitement liées aux événements hydrologiques temporels.

2 – LES TROIS PRINCIPALES VARIABLES DE DÉBIT LIÉES À UNE DURÉE DONNÉE

2.1 Définition des variables hydrologiques

A l'heure actuelle, l'hydrologie est capable de répondre à beaucoup de questions plus ou moins directement liées à des notions de durée et de fréquence d'événements hydrologiques observés ou susceptibles de se produire. Aussi, convient-il de bien définir les besoins spécifiques (*chroniques, variables, etc.*), à chaque projet d'étude, pour répondre correctement à la demande.

En règle générale l'enregistrement limnographique (*papier ou numérique*), associé aux courbes de tarage, permet d'obtenir un hydrogramme continu $Q(t)$ dont l'information surabondante ne permet pas de répondre directement à la demande sociale. Cette information doit donc être synthétisée par des variables hydrologiques représentatives de la variabilité temporelle du régime hydrologique du bassin versant. Nous présentons ci-après les trois variables hydrologiques les plus courantes pour caractériser le régime hydrologique d'un bassin versant.

Débit moyen

L'intégration (*fig. 1*) de l'hydrogramme continu $Q(t)$ sur une durée continue d permet d'obtenir le volume d'eau (m^3 ou l) écoulé pendant cette durée et d'en déduire le débit moyen correspondant (m^3/s ou l/s). Il est noté V (*Volume*) pour rappeler que c'est une intégrale. Ces débits moyens sont très utilisés en hautes et moyennes eaux, un peu moins en basses eaux.

Débit seuil

Cette variable « débit seuil » correspond à une notion de débit qui est toujours dépassé (*ou qui n'est jamais dépassé*) pendant une durée continue d . Elle est notée Q (m^3/s ou l/s). Dans ce cas, on ne s'intéresse pas du tout au volume mis en jeu. Cette notion est adaptée à l'hydrologie opérationnelle, liée en particulier à des contraintes hydrauliques ou topographiques.

Débit classé

La notion de débits classés a longtemps été utilisée pour construire les courbes débit-durée (VEN TE CHOW, 1964). Elle diffère de la précédente, en ce sens que la durée (d) de dépassement (*ou de non dépassement*) n'est pas continue mais correspond à des Durées cumulées (*dans le temps*) sur une saison (*l'année par exemple*). Cette variable est exprimée par le symbole D . Elle représente une notion particulière de débit seuil, non liée à un événement hydrologique particulier, dont l'intérêt pratique est limité aux analyses de fréquence de débordement d'un cours d'eau ou à l'évaluation des débits réservés par exemple. Elle est cependant explicitée et définie ci-après, à titre de comparaison avec les autres variables hydrologiques.

2.2 Notation appliquée

Pour chaque variable hydrologique, nous rappelons que la durée considérée sera notée d et non t qui est strictement réservé au temps (*chronique, pas de temps de mesure, etc.*). Les symboles précédents (V , Q , D) vont être associés à

la lettre **C** (OBERLIN, 1992) pour traduire que ces variables sont des **Caractéristiques du régime d'écoulement**. Cette lettre **C** permet en outre de rappeler qu'il s'agit de durée (**d**) continue pour **V** et **Q** et de durées cumulées pour **D**.

Nous obtenons donc (fig. 1) :

VCd : débit moyen (**V**olume) **C**aractéristique sur une durée continue **d** ;

QCd : débit seuil (**Q**) **C**aractéristique continûment dépassé (ou non dépassé) sur la durée **d** ;

DCd : débit classé (**D**) **C**aractéristique dépassé (ou non dépassé) sur une durée **d** (durée cumulée, de fait non continue).

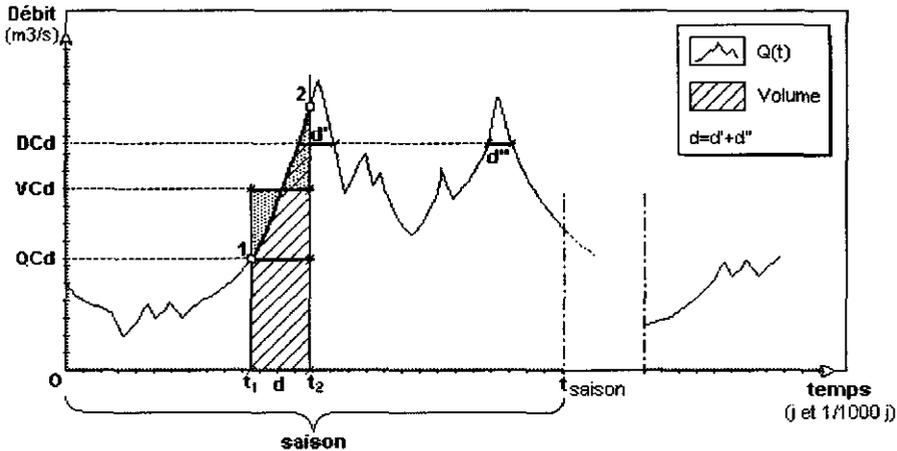


Figure 1 Présentation des trois caractéristiques de régime.

Presentation of the 3 characteristics variables of the hydrological regime.

L'hydrogramme continu $Q(t)$ de la figure 1 permet de donner une représentation de ces trois variables. La courbe de l'hydrogramme continu $Q(t)$, considérée entre les instants t_2 et t_1 , permet de définir, sur une durée continue d ($t_2 - t_1$), la variable VCd ainsi que la variable QCd correspondante dépassée (point n° 1) ou non dépassée (point n° 2). Pour ce qui concerne la variable DCd , une représentation peut en être donnée en considérant, sur la saison choisie, une durée cumulée d , telle que $d = d' + d''$. Dans ce cas, la valeur de la variable DCd est dépassée sur la durée cumulée d (non continue).

Il importe à présent, pour traduire de manière représentative le régime hydrologique d'un bassin versant, d'associer à chacune des trois caractéristiques d'écoulement précédentes un caractère de différenciation, selon que l'on s'intéresse (sur une saison donnée) aux hautes et moyennes eaux (crues) ou aux basses eaux (étiage). On utilise pour cela le symbolisme de l'OMM : **X** pour maXimum, et **N** pour miNimum. Les sigles précédents, différenciés selon le régime considéré (crue ou étiage) sont les suivants :

En crue (fig. 2) :

VCXd : débit moyen (**V**olume) **C**aractéristique sur une durée continue **d**, maXimal dans la saison ;

QCXd : débit seuil (**Q**) **C**aractéristique continûment dépassé sur la durée **d**, maXimal dans la saison ;

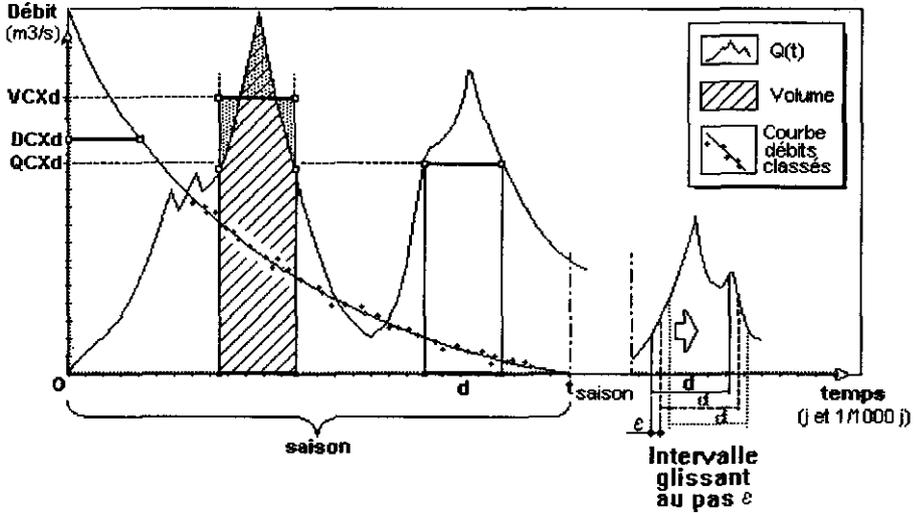


Figure 2 Définition des trois caractéristiques de régime en crue.
Definition of the 3 characteristics of the flood regime.

DCXd : débit classé (**D**) Caractéristique, dépassé sur une durée **d** non continue (*cumul*), maXimal dans la saison.

Il est en général vérifié que :

– pour des durées **d** suffisamment longues et un bassin versant de grande superficie :

$$QCXd < DCXd < VCXd$$

– pour des durées courtes *et/ou* un bassin versant de petite superficie :

$$QCXd < VCXd < DCXd$$

En étiage (*fig. 3*) :

VCNd : débit moyen (**V**olume) Caractéristique sur une durée continue **d**, miNi-mal dans la saison ;

QCNd : débit seuil (**Q**) Caractéristique continûment non dépassé sur la durée **d**, miNi-mal dans la saison ;

DCNd : débit classé (**D**) Caractéristique, non dépassé sur une durée **d** non continue (*cumul*), miNi-mal dans la saison.

– quelle que soit la durée ou la taille du bassin versant, la double inégalité suivante est toujours vérifiée :

$$VCNd < DCNd < QCNd$$

Les figures 2 et 3 donnent respectivement une représentation de ces trois caractéristiques d'écoulement en crue et en étiage. La détermination manuelle de ces caractéristiques d'écoulement autour des zones de hautes eaux (*crues*) et basses eaux (*étiage*) est fastidieuse et imprécise. En pratique, la détermination est automatique (LANG, 1995). Nous en donnons ci-après quelques éléments, concernant plus particulièrement les caractéristiques de débit de périodes continues d'écoulement, compte tenu de leur intérêt en aménagement intégré des cours d'eau et de leurs bassins versants.

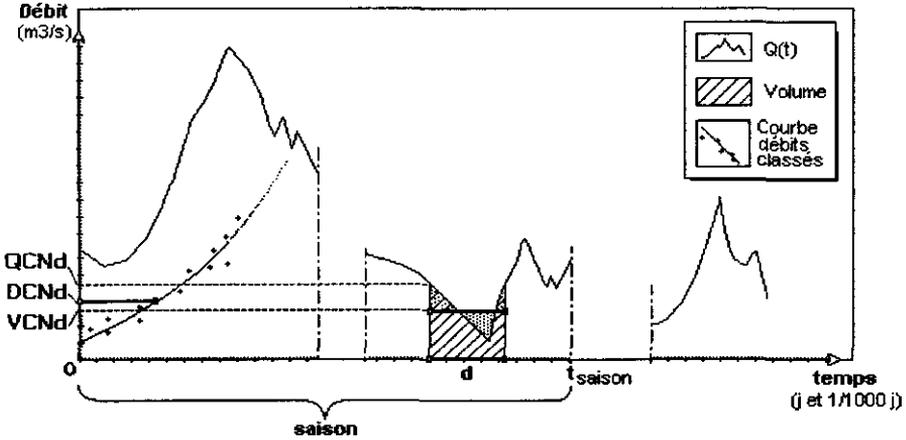


Figure 3 Définition des trois caractéristiques de régime en étiage
Definition of the 3 characteristics of the low flow regime.

3 - TECHNIQUE D'ÉCHANTILLONNAGE DES DÉBITS CARACTÉRISTIQUES DE PÉRIODES CONTINUES D'ÉCOULEMENT

Les débits caractéristiques de périodes continues d'écoulement peuvent être échantillonnés, soit à partir d'une chronique de débit $Q(t)$ continue (encore appelée chronique de débit à pas de temps variable), soit journalière (débit moyen (QJ) écoulé sur 24 heures). La base nationale de données hydrométriques HYDRO permet d'obtenir ces deux types de chronique.

Le plus souvent, en crue par exemple, les deux chroniques de débit sont exploitées pour extraire des débits caractéristiques depuis l'instantané jusqu'à 30 jours ($1s \leq d \leq 30$ jours). Cela dit, la valeur maximale de d peut être modulée selon la taille et la « nervosité » du bassin versant. C'est ainsi que, pour un petit bassin présentant des crues rapides, les valeurs prises par d pourront être comprises entre une seconde et au plus 1 jour ($1s \leq d \leq 1$ jour) ; dans ce cas la chronique de débit $Q(t)$ est indispensable. Inversement, pour un grand bassin versant, où l'inertie de l'écoulement est grande, la chronique de débits journaliers peut suffire. Autrement dit, **le pas de temps de la chronique de débit doit être compatible avec la dynamique de l'écoulement du bassin versant.**

La technique d'échantillonnage, à partir de la chronique $Q(t)$, des VCd et des QCd relatifs à une saison donnée (fig. 1), procède du balayage de tout l'hydrogramme $Q(t)$. Ce balayage, obtenu grâce au déplacement d'un intervalle mobile (de durée d) d'une fraction de temps ϵ (millième de jour dans le cas de la base HYDRO), permet de déterminer n périodes de durée d . La portion de courbe $Q(t)$, correspondant à chaque période (fig. 1), fournit un débit seuil (QCd) minimum (dépassé : 1) et un débit seuil maximum (non dépassé : 2) ainsi que le débit moyen (VCd) résultant de son intégration entre les instants t_1 et t_2 .

Le classement de l'échantillon en VCd permet d'obtenir (fig. 2) la plus forte valeur ($VCXd$) et (fig. 3) la plus faible ($VCNd$) sur la saison considérée. Pour ce

qui concerne le débit seuil (QCd), le classement des deux séries d'extrema permet de retenir en crue (fig. 2) le maximum des minima (QCXd) et en étiage (fig. 3) le minimum des maxima (QCNd).

Pour ce qui concerne l'échantillonnage des débits caractéristiques à partir de la chronique de débits journaliers, la démarche est similaire à la précédente. L'intervalle mobile de durée $d = N$ jours est déplacé jour après jour sur la saison étudiée. Pour chacune des n périodes de N jours obtenues, sont retenues la valeur minimale et la valeur maximale du débit journalier (*respectivement dépassée et non dépassée*), ainsi que celle du VCd (*moyenne arithmétique des QJ sur N jours*). Concernant la recherche des débits caractéristiques, une précaution est à prendre pour $N > 1$. Dans ce cas, elle doit se faire en débordant de $N/2$ jours de part et d'autre des extrémités de la saison étudiée.

A chaque débit caractéristique de crue (*pour d donnée*) peut être associée sa date d'occurrence (*début de la séquence*). Pour VCXd et QCXd, celles-ci peuvent être proches, voire identiques, mais aussi éloignées : elles sont théoriquement indépendantes.

4 – QUANTILES DE DÉBITS CARACTÉRISTIQUES DE PÉRIODES CONTINUES D'ÉCOULEMENT

Le terme de quantile permet d'associer, à une valeur particulière de la variable hydrologique étudiée, une période de retour T exprimée en année(s). Diverses définitions de cette période de retour existent au sein de la communauté scientifique internationale (LANG, 1995). On peut en donner une définition courante à partir d'un exemple bien connu : le quantile de débit (Q) Instantané maXimal Annuel décennal (QIXA10). Ce quantile traduit simplement qu'une certaine valeur du QIXA est susceptible d'être atteinte ou dépassée, en un site donné, avec une probabilité d'occurrence qui est en moyenne d'une fois tous les dix ans. L'expression des sigles antérieurs en termes de quantiles devient :

En crue :

VCX(T,d) : quantile de débit moyen (*Volume*) Caractéristique sur une durée continue d , maXimal dans la saison, de période moyenne de retour T ;

QCX(T,d) : quantile de débit seuil (Q) Caractéristique continûment dépassé sur la durée d , maXimal dans la saison, de période moyenne de retour T ;

DCX(T,d) : quantile de débit classé (D) Caractéristique, dépassé sur une durée d non continue (*cumul*), maXimal dans la saison, de période moyenne de retour T .

En étiage :

VCN(T,d) : quantile de débit moyen (*Volume*) Caractéristique sur une durée continue d , miNimal dans la saison, de période moyenne de retour T ;

QCN(T,d) : quantile de débit seuil (Q) Caractéristique continûment non dépassé sur la durée d , miNimal dans la saison, de période moyenne de retour T ;

DCN(T,d) : quantile de débit classé (D) Caractéristique, non dépassé sur une durée d non continue (*cumul*), miNimal dans la saison, de période moyenne de retour T .

Le quantile d'une variable hydrologique est par ailleurs implicitement lié à différents choix qui concernent en particulier la chronique d'observations (*durée, pas de temps, homogénéité, stationnarité, etc.*), le mode d'échantillonnage de la variable, la distribution de fréquence et l'adéquation de la loi de probabilité, etc.

Mis à part les tests (*homogénéité, etc.*) qui devraient être systématiquement réalisés sur les séries, nous rappelons qu'une chronique d'observations ne peut fournir des informations pertinentes sur le régime hydrologique d'un bassin versant que si elle est longue et à un pas de temps compatible avec la dynamique des processus d'écoulement.

Le mode d'échantillonnage résulte de la technique d'échantillonnage proprement dite et du choix d'extraction des débits caractéristiques de la chronique d'observations. Ce choix d'extraction, pour ce qui est par exemple des débits caractéristiques de crue (VCXd ou QCXd), peut concerner une recherche par saison (*ex : année*) de la plus forte ou des deux ou trois plus fortes valeurs ou bien, une recherche sur la chronique prise dans son ensemble de toutes les valeurs maximales (n_s) indépendantes (LANG, 1995) supérieures à un seuil donné. Il est conseillé de procéder à l'échantillonnage de valeurs maximales indépendantes au dessus d'un seuil donné plutôt qu'à l'extraction du (des) maximum(s) annuel (*de la saison*). Cela permet de privilégier les années humides et d'étoffer l'échantillon dans le cas de séries d'observations relativement courtes. Les n_s valeurs de l'échantillon ainsi constituées (*selon l'extraction conseillée*) sont rangées par ordre décroissant et on associe à chaque débit caractéristique de rang i ($i = 1$ pour le plus fort débit et $i = n_s$ pour le plus faible) sa fréquence empirique

$F_i = \frac{i - 0,3}{n_s + 0,4}$ (MICHEL, 1989). Cette expression, dite de Chegodayev (LUBES *et al.*, 1994), approxime la médiane de la distribution d'échantillonnage des probabilités des valeurs de rang i d'un échantillon. Le report de ces couples (*débit-Fréquence empirique*) sur un graphe adapté à la loi de probabilité ¹ permet de visualiser la distribution de fréquence et l'adéquation de la loi de probabilité.

A titre d'exemple est présenté à la figure 4, un graphe d'adéquation de la loi exponentielle adaptée aux valeurs supérieures à un seuil (*fixé*) et qui peut s'écrire si l'on désigne indifféremment par Q le débit caractéristique VCXd ou QCXd :

$$Q(T,d) = A_q(d) \cdot \ln T + B(d) \quad (1)$$

où $A_q(d)$: gradex des débits pour une durée (d) donnée.

$B(d)$: paramètre de position de la loi pour d donnée.

avec

$$A_q(d) = m - Q_{n_s}$$

$$B(d) = Q_{n_s} + A_q(d) \ln \left(\frac{ns}{na} \right)$$

où m : moyenne des débits caractéristiques de crue ($Q_1, Q_2 \dots Q_{n_s}$) de durée d donnée, Q_{n_s} étant le plus petit.

na : le nombre d'années d'observations.

1. En général, on choisit une loi de Gumbel ou une loi exponentielle pour ce qui concerne les crues.

Les deux paramètres, $A_q(d)$ (pente) et $B(d)$ une fois définis, permettent (fig. 4) de tracer la courbe théorique $Q(T,d)$ dans le graphe approprié : $Q(T,d)$, $\ln(T)$.

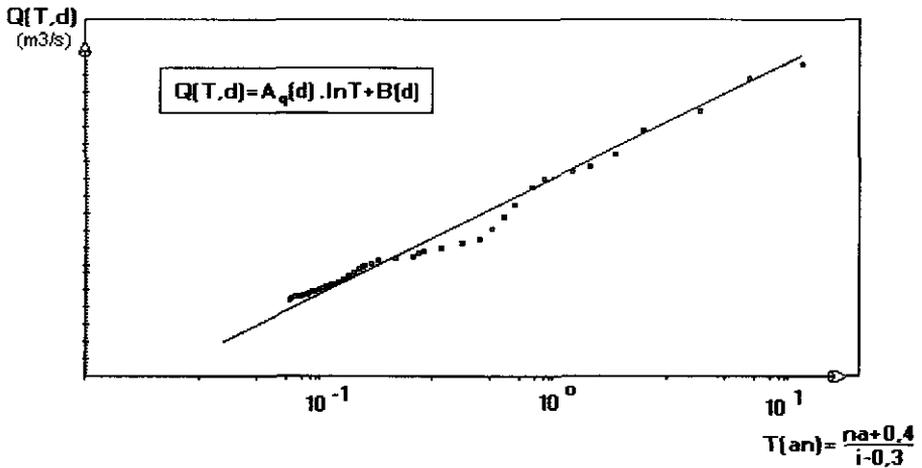


Figure 4 Graphe d'adéquation de la loi exponentielle.
Exponential law.

La courbe théorique (1) ainsi définie permet d'obtenir, pour différentes valeurs de T , les quantiles de débits caractéristiques de durée d donnée. Ces quantiles concernent essentiellement le domaine des fréquences observables ($0,5 \leq T(\text{an}) \leq 20$). En règle générale, la plus faible valeur de T peut être prise égale à na/ns et la plus forte à environ deux fois la durée de la chronique d'observations. Au delà, pour des fréquences moyennement rares à rares ($20 < T(\text{an}) \leq 1\,000$), la forme théorique (1) peut être extrapolée par la forme (2) dite esthétique du gradex des pluies maximales (MICHEL, 1982).

$$Q(T, d) = Q(T_g, d) + A_p(d) \cdot \ln\left(1 + \frac{A_q(d)}{A_p(d)} \cdot \frac{T - T_g}{T_g}\right) \quad (2)$$

où $A_p(d)$: gradex des pluies maximales de durée d .
 T_g : période de retour correspondant au seuil d'extrapolation (en général $T_g = 10$ ans).

$Q(T_g, d)$: quantile déduit de la forme (1) pour $T = T_g$.

Cette forme (2) a une tendance asymptotique vers le gradex des pluies maximales qui est d'autant moins rapide que l'indice de saturation du sol ($A_q(d)/A_p(d)$) est différent de 1 ; ce qui relativise l'incidence du seuil d'extrapolation ($T_g = 10$ ans) sur les quantiles de crue.

Les conditions d'utilisation de cette forme (2) d'extrapolation sont strictes vis à vis de la durée d , et par ailleurs les modalités de prise en compte du gradex des pluies maximales sont différentes, selon qu'il s'agit de VCXd ou de QCXd. Pour cela on se reportera aux articles plus spécialisés concernant les VCXd (GALEA et PRUDHOMME, 1993) et les QCXd (GALEA et PRUDHOMME, 1994a,b).

5 – COURBES QDF (DÉBIT-DURÉE-FRÉQUENCE) D'UN BASSIN VERSANT OBSERVÉ

Nous venons de voir qu'à partir de chroniques d'observations pluie-débit, de procédures d'extraction et de choix de débits caractéristiques de périodes continues d'écoulement (VCXd, QCXd), d'ajustements théoriques (1), d'extrapolation (2) de ces ajustements, etc., peuvent être obtenus des quantiles de débit de crue caractéristique relatifs à différentes durées continues (d) et périodes de retour (T).

La représentation ordonnée (fig. 5) des quantiles de crue $Q(T,d)$ de même période de retour (T), en fonction de la durée (d), permet d'obtenir un faisceau cohérent de courbes monofréquence QdF (équivalent aux IdF : Intensité-durée-Fréquence) qui donne une vision à la fois synthétique et représentative du régime hydrologique en crue d'un bassin versant. Cette représentation QdF de la diversité des écoulements en crue d'un bassin versant, constitue une source d'information de base, commode d'utilisation, pour les besoins en général de l'hydrologie opérationnelle. Une illustration originale en est donnée dans la conception rationnelle des projets d'aménagement, de lutte contre les inondations (CEMAGREF-Lyon, 1992) qui nécessite d'intégrer à l'échelle du cours d'eau et du bassin versant l'ensemble des facteurs d'ordre socio-économique, hydrologique et hydraulique.

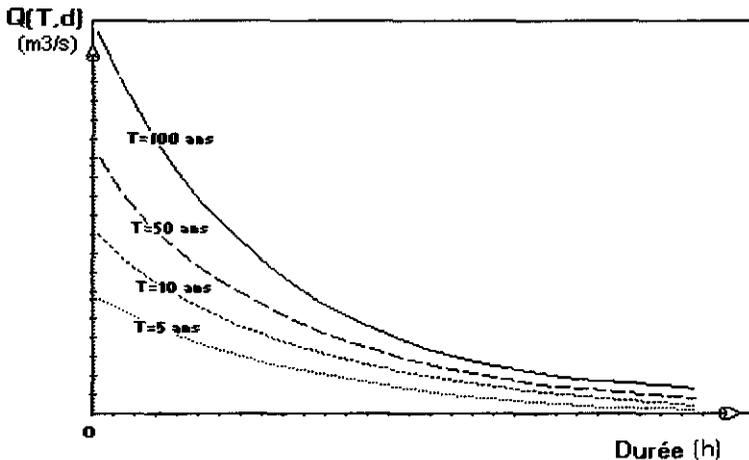


Figure 5 Courbes QdF.
QdF curves.

6 – COHÉRENCE SPATIALE DES COURBES QDF – NORMALISATION – COURBES QDF D'UN BASSIN VERSANT NON OBSERVÉ

Les développements antérieurs ont permis de préciser la notion de courbes QdF et d'esquisser leur domaine d'application ; pour de plus amples informations on se reportera aux références bibliographiques citées dans le texte. Pour résu-

mer, nous dirons que : pour un bassin versant donné, où l'on dispose de chroniques pluie-débit observées ou simulées¹ suffisamment longues, il est possible d'établir des courbes QdF qui donnent une représentation synthétique mais néanmoins riche, de son comportement hydrologique en crue, permettant de satisfaire la diversité des besoins de l'hydrologie opérationnelle.

Malheureusement, dans bien des cas, cette information pluie-débit n'existe pas (*absence de station*), ou est de trop courte durée (*suivi récent*) pour permettre une identification correcte du régime hydrologique en crue du bassin versant. Cela pose donc le problème de la détermination des courbes QdF de bassins versants peu ou pas observés.

Diverses études de régionalisation des crues (GALEA et SCHUITEMA, 1989 ; JIN et GALEA, 1990 ; GALEA et PRUDHOMME, 1993) ont permis de caractériser, au sens des courbes QdF, le régime hydrologique en crue de plus d'une centaine de sites observés. Cela a permis de vérifier qu'il existait une cohérence spatiale des différents faisceaux QdF obtenus d'après (1) et (2), autrement dit que l'on pouvait obtenir, pour chaque site, une représentation ordonnée (*fig. 5*) des quantiles de crue ($Q(T,d)$) avec la période de retour (T) et la durée (d). Il a été aussi constaté que le contexte climatique (*en particulier pluviométrique*) jouait un rôle sur la concavité de ces courbes, plus marquée pour les bassins versants sous influence continentale ou méditerranéenne que pour les bassins sous influence océanique. Compte tenu de ces constatations et résultats, on a pu considérer que typologiquement les régimes de crue observés de plus d'une centaine de bassins versants pouvaient se répartir selon trois familles de bassins versants. Pour chacune d'elle a été choisi un bassin de référence², chacun d'eux étant soumis à des conditions pluviométriques bien différenciées : de type océanique, continental ou méditerranéen. Il s'agit respectivement des bassins versants de la Dragne à VANDENESSE ($S = 115 \text{ km}^2$) en région Bourgogne (*département de la Nièvre*), du Roubion à SOYANS ($S = 186 \text{ km}^2$) dans la région Rhône-Alpes (*département de la Drôme*) et de la Mimente à FLORAC ($S = 125 \text{ km}^2$) dans la région Languedoc-Roussillon (*Département de la Lozère, Cévennes*).

L'objectif a été ensuite de rechercher et de valider un mode de transfert, de cette connaissance hydrologique synthétique (*fig. 5*) de référence, sur les bassins versants de chaque famille. Autrement dit, il s'agissait d'obtenir pour chacun d'eux un faisceau de courbes QdF transféré analogue à celui pouvant être déduit des observations. Pour cela, une normalisation des courbes QdF des bassins versants de référence s'est révélée nécessaire. Après quelques tentatives plus ou moins fructueuses, la normalisation des courbes QdF (*fig. 6*), en ordonnée par le débit instantané maximal annuel décennal ($Q(T,d)/QIXA10$) et en abscisse par la durée caractéristique de crue (d/D) du bassin versant de référence, est apparue comme la plus pertinente (PRUDHOMME, 1995). D et $QIXA10$ sont des marqueurs du comportement en crue du bassin versant. D , en quelque sorte, renseigne sur la plus ou moins grande rapidité du transfert de l'écoulement vers l'exutoire du bassin. $QIXA10$, d'une période de retour ni trop rare, ni trop fréquente, est un bon indicateur de la capacité de production du bassin, que ce soit pour les crues fréquentes ou les crues plus rares liées au gradex des pluies maximales. Le $QIXA10$ peut être déduit de l'expression (1) si des observations de

1. Des modèles conceptuels pluie-débit réalisent cette simulation.

2. Les critères principaux qui déterminent le choix d'un bassin versant de référence sont la longueur de la chronique de données, une courbe de tarage de hautes eaux peu extrapolée, etc.

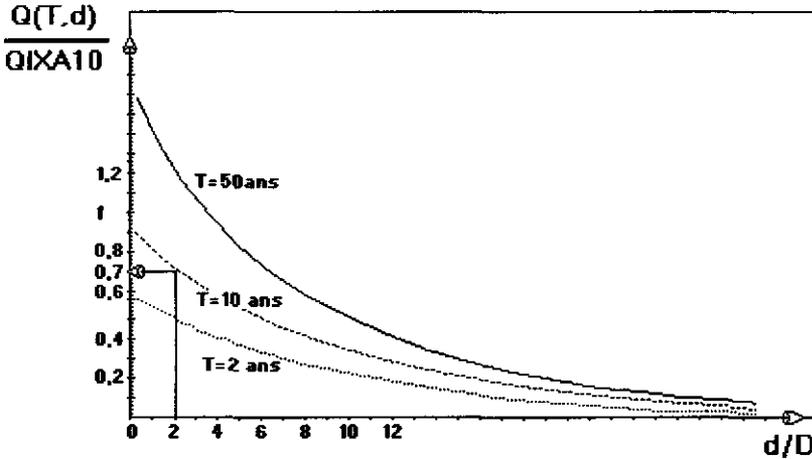


Figure 6 Exemple de graphe normé de référence.
 Example of reference standardized curves.

débit existant, sinon diverses synthèses, nationale (CTGREF *et al.*, 1980-1982) ou régionale (Cemagref-Lyon, 1989), permettent de l'estimer avec une certaine précision.

De même pour D, si une chronique d'observations de débit existe, on peut considérer les plus fortes crues et relever pour chacune d'elles son débit de pointe (Qs) ainsi que la durée (ds) de dépassement de Qs/2. A partir de ces couples (ds, Qs), portés sur le graphe correspondant (*fig. 7*), on détermine pour chaque classe de débit Qs une valeur médiane de ds. D est la valeur de la courbe médiane conditionnelle des ds pour le QIXA10 précédemment déterminé. En général, la valeur de D est peu variable avec la période de retour du débit de pointe (*fig. 7*), pour T ≥ 10 ans.

A défaut d'observation, comme pour QIXA10, on se référera aux synthèses précitées. Une démarche complémentaire aux différentes synthèses précitées, basée sur la typologie des régimes d'écoulement en crue, comme cela a été commencé pour les petits bassins rapides (GALEA et RAMEZ, 1995), devrait aboutir, en l'absence d'observation, à une amélioration sensible de la précision des caractéristiques locales D et QIXA10 des bassins versants.

Mises sous cette forme normée adimensionnelle, les courbes QdF des bassins de référence présentent, pour les bassins versants des familles respectives, un caractère de représentativité des régimes hydrologiques de crue. En quelque sorte, la diversité des régimes observés, qui caractérise chaque famille, dépend essentiellement des caractéristiques locales D et QIXA10 des bassins versants. Cette représentativité peut s'écrire :

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

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

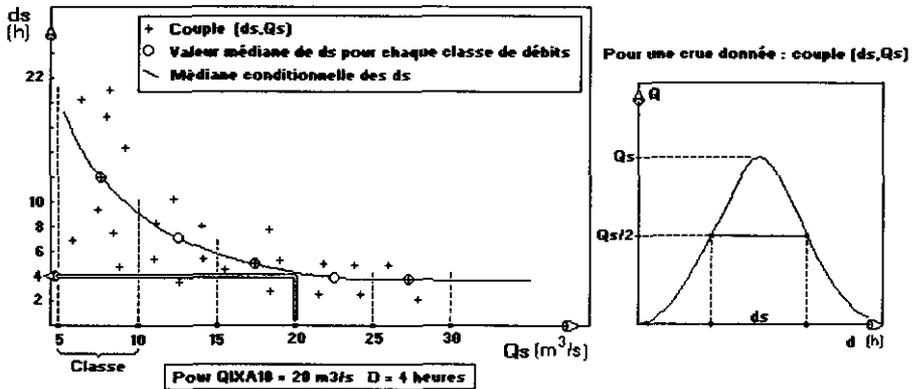


Figure 7 Détermination de D .
D détermination.

Ainsi, si l'on considère par exemple deux bassins observés de la famille hydrologique de VANDENESSE et dont les descripteurs locaux du régime sont $QIXA10 = 47,3 \text{ m}^3/\text{s}$ et $D = 48 \text{ h}$ pour l'un (①) et $QIXA10 = 12,1 \text{ m}^3/\text{s}$ et $D = 94 \text{ h}$ pour l'autre (②), on peut tracer (fig. 8) pour chacun d'eux la courbe QdF théorique décennale (déduite des observations) de la variable hydrologique de son choix ($VCXd$ ou $QCXd$).

Si l'on norme les quantiles théoriques décennaux $Q(T,d)$ relatifs aux courbes ① et ② par les descripteurs locaux des bassins versants (D , $QIXA10$) respectifs, ils vérifient l'équation de la courbe QdF normée décennale (③) du modèle de VANDENESSE.

Inversement, à partir des courbes QdF normées du bassin de référence ou des équations (3), (4), peuvent être déduites les courbes QdF théoriques d'un bassin versant de caractéristiques locales D et $QIXA10$. Par exemple, le quantile $Q(T = 10 \text{ ans}, d = 8 \text{ h})$ d'un bassin versant de caractéristiques locales $D = 4 \text{ h}$ et $QIXA10 = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ peut être estimé à partir du graphe de référence de la figure 6, où pour $d/D = 2$ le quantile normé de référence est 0,7 et le quantile théorique recherché : $Q(10,8) = 14 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,7 \cdot 20 \text{ m}^3/\text{s}$).

7 – FORMULATION MATHÉMATIQUE DES COURBES QdF NORMÉES

L'option envisagée, d'une formulation mathématique des faisceaux de courbes QdF normés (fig. 6) des bassins versants de référence, présente un double intérêt : d'une part, automatiser les calculs fastidieux du type précédent et d'autre part, permettre une interpolation automatique et continue des quantiles de crue avec la durée d ($1 \text{ s} \leq d \leq 30 \text{ jours}$) et la période de retour T ($0,5 \leq T(\text{an}) \leq 1\,000$).

Dans un premier temps cette formulation a été envisagée en deux parties, conformément aux expressions (1) et (2) à l'origine des courbes QdF (fig. 5) des bassins de référence. Ceci dit, il suffit de généraliser les deux expressions avec la

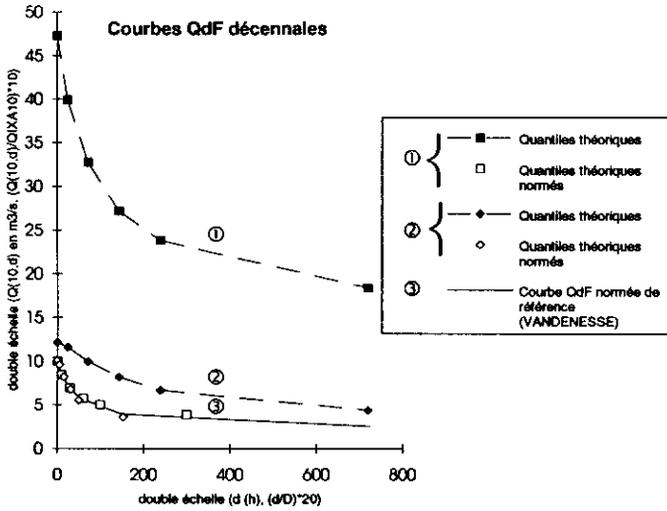


Figure 8 Illustration de la représentativité des modèles QdF.
Illustration of QdF models representativity.

durée d. Il s'est avéré que pour une loi exponentielle (1), adaptée aux valeurs supérieures à un seuil, les paramètres sont des fonctions strictement décroissantes de la durée (GALEA et SCHUITEMA, 1989 ; JIN et GALEA, 1990) et peuvent être exprimés mathématiquement par la forme homographique suivante, semblable à celle établie pour les pluies (I.d.F.) par GRISSOLET *et al.* (1962).

$$A_q(d), A_p(d), B(d) = \frac{1}{a \cdot d + b} + c$$

où a, b, c sont des paramètres à déterminer

Le fait de normer les expressions (1) et (2) en remplaçant d par d/D et Q(T,d) par Q(T,d)/QIAX10, ne change en rien le choix de la forme homographique. Toutes ces considérations ont ensuite permis de développer les modèles QdF, et pour plus d'amples informations on se reportera aux articles plus techniques de GALEA et PRUDHOMME (1993, 1994a et b), qui traitent en particulier de leurs propriétés et de leurs aspects opérationnels. On soulignera, en particulier, la possibilité de générer à partir des modèles QdF en QCX des hydrogrammes synthétiques monofréquences (*pour les calculs d'hydraulique transitoire*), de volumes cohérents avec ceux déduits des observations.

On obtient alors trois modèles régionaux dont les formules générales sont (avec un seuil d'extrapolation à $T_g = 10$ ans) :

$$0,5 \leq T(\text{an}) \leq 20 \quad \frac{Q(T, d)}{QIAX10} = \frac{A_q(d/D) \cdot \ln(T) + B(d/D)}{QIAX10} \quad (3)$$

$20 < T(\text{an}) \leq 1\ 000$

$$\frac{Q(T, d)}{QIAX10} = \frac{Q(10, d)}{QIAX10} + \frac{A_p(d/D)}{QIAX10} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{A_q(d/D)}{A_p(d/D)} \right) \cdot \left(\frac{T - 10}{T} \right) \right] \quad (4)$$

$$\text{où : } \frac{A_q(d/D)}{QIAX10} = \left(\frac{1}{x_1 \cdot \frac{d}{D} + x_2} \right) + x_3 ; \quad \frac{B(d/D)}{QIAX10} = \left(\frac{1}{x_4 \cdot \frac{d}{D} + x_5} \right) + x_6$$

$$\frac{A_p(d/D)}{QIAX10} = \left(\frac{1}{x_7 \cdot \frac{d}{D} + x_8} \right) + x_9$$

Les paramètres x_i ont été définis pour chaque modèle en VCXd et QCXd et figurent dans les tableaux 1 et 2 ci-après :

Tableau 1 Paramètres de calage des modèles QdF en débit-volume (VCXd).

Table 1 Set of QdF model parameters in maximal average flow (VCXd).

Modèles en VCX	Paramètres								
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
Vandenesse	2,635	6,19	0,016	1,045	2,385	0,172	1,083	1,75	0,00
Florac	1,12	3,56	0,00	0,95	3,18	0,039	1,56	1,91	0,085
Soyans	0,87	4,60	0,00	1,07	2,50	0,099	0,569	0,69	0,046

Tableau 2 Paramètres de calage des modèles QdF en débit seuil (QCXd).

Table 2 Set of QdF model parameters in maximal threshold discharge (QCXd).

Modèles en QCX	Paramètres								
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
Vandenesse	3,97	6,48	0,01	1,91	1,91	0,097	3,674	1,774	0,013
Florac	3,05	3,53	0,00	2,13	2,96	0,010	2,78	1,77	0,04
Soyans	2,57	4,86	0,00	2,10	2,10	0,05	1,49	0,66	0,017

Dans un deuxième temps, suite aux bons résultats de la méthode d'extrapolation AGREGEE (MARGOUM, 1992), la formulation des modèles QdF en VCXd (*établie sur les bases précédentes*) a été adaptée à ce nouveau modèle AGREGEE. La formulation (5) unifiée (PRUDHOMME et LANG, 1994), valable quelle que soit la période de retour (T), intègre plus particulièrement un aspect novateur d'AGREGEE sur la méthode du GRADEX, en ce sens qu'elle ne se limite pas (*comme précédemment*) à des lois (*débit, pluie*) strictement exponentielles. Elle permet un raccordement progressif des deux branches de distribution liées aux débits (3) et à la pluie (4) grâce à un mélange de deux lois exponentielles.

$$\theta \cdot \text{Exp} \left(- \frac{Q(T, d) \cdot \frac{X_0(d/D)}{QIAX10} - \frac{X_0(d/D)}{QIAX10}}{\frac{G_2(d/D)}{QIAX10}} \right) + (1 - \theta) \cdot \text{Exp} \left(- \frac{Q(T, d) \cdot \frac{X_0(d/D)}{QIAX10} - \frac{X_0(d/D)}{QIAX10}}{\frac{G_1(d/D)}{QIAX10}} \right) = \frac{1}{T} \quad (5)$$

$$\text{avec } \frac{G_1(d/D)}{QIAX10} = \left(\frac{1}{x_1 \cdot \frac{d}{D} + y_1} \right) + z_1 \quad \frac{G_2(d/D)}{QIAX10} = \left(\frac{1}{x_3 \cdot \frac{d}{D} + y_3} \right)$$

$$\text{et } \frac{X_0(d/D)}{QIXA10} = \left(\frac{1}{x_2 \cdot \frac{d}{D} + y_2} \right)$$

où G_1 et G_2 sont les pseudo-gradex ($dQ(T)/d\ln(T)$ et $dP(T)/d\ln(T)$) respectivement liés

aux lois de distribution des débits et des pluies observés (m^3/s)

θ est le paramètre de pondération des deux branches de la formule (5)

X_0 est le paramètre de position de la loi des débits (m^3/s)

Les paramètres calés pour les trois modèles de référence sont les suivants :

Tableau 3 Paramètres de calage des modèles QdF en débit-volume (VCXd), selon AGREGEE.

Set of QdF model parameters in maximal average flow (VCXd), as AGREGEE.

Modèles en VCX	θ	G1(d/D)/QIXA10			X0(d/D)/QIXA10		G2(d/D)/QIXA10	
		x_1	y_1	z_1	x_2	y_2	x_3	y_3
Vandenesse	0,093	2,40	2,315	0,20	0,80	2,18	1,71	7,46
Florac	0,093	0,95	2,80	0,05	0,65	1,73	0,80	4,40
Soyans	0,043	3,85	3,00	0,12	0,27	0,86	1,35	4,70

CONCLUSION

Les modèles QdF permettent de synthétiser et « consolider » les connaissances issues tant des observations hydrométriques que des simulations par les modèles conceptuels (GALEA, 1993). Les différentes courbes de débits, de durées et de fréquences variables, constituent un ensemble cohérent, ce qui permet de soutenir par une information fiable l'estimation des débits de courtes durées ou de fréquences rares qui sont souvent-mal connus (*peu de mesures, mauvaises courbes de tarage ou difficulté d'extrapolation, etc.*).

Les modèles de synthèse dits QdF, sous la forme mathématique adimensionnelle définie au début des années 1990 ou plus récemment en 1994, se montrent particulièrement robustes aux effets de changement d'échelle (lié à S, d et T) et climatiques sur les processus d'écoulement. Ainsi, ils sont opérationnels, c'est à dire validables et fort utiles pour caractériser le régime de crue d'un cours d'eau, préciser une réglementation, donner des indicateurs pouvant avoir une importance écologique, ou encore pour traduire certaines demandes sociales en matière de gestion intégrée (CEMAGREF-Lyon, 1992) des cours d'eau et de leurs bassins versants.

Les modèles QdF se sont montrés particulièrement bien adaptés à une recherche sur la régionalisation (PRUDHOMME, 1995) des régimes hydrologiques

péri-méditerranéens, ou à l'estimation des crues rares de nombreux bassins versants, en particulier situés en Roumanie (OANCEA *et al.*, 1994). Les résultats obtenus lors des diverses régionalisations, notamment en matière de critères de choix des modèles, ont permis d'étendre leur usage à des bassins non observés hydrométriquement.

En ce qui concerne l'estimation des paramètres d'entrée de ces modèles (D, QIXA10), en l'absence d'information, l'effort est à poursuivre. En effet, les formules sommaires d'estimation, établies lors de ces régionalisations, bien que fort utiles, n'en demeurent pas moins encore trop imprécises. PRUDHOMME (1995) a étudié la sensibilité des quantiles de crue modélisés aux erreurs liées à l'estimation de QIXA10 et de D. S'il est vrai que la représentativité des résultats est essentiellement liée aux paramètres d'entrée locaux (*et au choix du modèle effectué*), cela peut être cependant nuancé. En effet, les erreurs sur les descripteurs ne vont pas toujours dans le même sens, il peut donc y avoir une certaine compensation des erreurs qui globalement permet au modèle de restituer des quantiles acceptables. Par ailleurs, les critères de choix (GALEA et PRUDHOMME, 1994b) qui intègrent ces descripteurs et donc l'erreur qui leur est associée, indiquent généralement le modèle donnant les résultats les plus proches du régime réel du bassin versant. Cela dit, un gain de précision ou plutôt de diversification des caractéristiques locales (D, QIXA10) des bassins versants est grandement souhaité, il pourrait être obtenu à partir d'une approche basée sur la typologie des régimes d'écoulement, comme cela a été commencé sur les petits bassins rapides (GALEA et RAMEZ, 1995).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BALOCKI, J.B., BURGESS, S.J. (1994). Relationships between n-day flood volumes for infrequent large floods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120 (6), 794-818.
- CTGREF, SRAE, DIAME, S.H. (1980-1982). Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants. Fascicule 2 : la méthode SOCOSE, 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 Etat-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). Inondabilité, modélisation des connaissances hydrologiques et hydrauliques en vue d'une confrontation « Risques/Besoins de Protection » directe, Synthèse cartographique. X^e Plan : contrat Etat-Région Rhône-Alpes, risques naturels en montagne, crues en rivières et inondations en vallées. Rapport final 1989-1992, Octobre 1992.
- GALEA, G., SCHUITEMA, N. (1989). Aménagement hydraulique rationnel, courbes débit-durée-Fréquence, validation d'une formulation sur la région Bourgogne et extrapolations. Conseil Régional et SRAE de Bourgogne, Cemagref-Lyon, Division Hydrologie-Hydraulique, Landbouw Universiteit Wageningen.
- GALEA, G., PRUDHOMME, C. (1993). Characterization of large scale variations in

- river flow behaviour with reference to hydrological macro-regionalization. Technische Universität Braunschweig (Allemagne), FRIEND Conference, 11-15 October 1993, AISH n° 221.
- GALEA, G. (1993). Gestion des grands plans d'eaux naturels, efficacité des estimations hydrologiques à validations complémentaires ; cas des bilans journaliers du lac de Grand-Lieu (Loire-Atlantique). *La houille blanche n° 4-1993*.
- GALEA, G., PRUDHOMME, C. (1994a). The mono frequency synthetic hydrogramm (MFSH) concept, definition, interest and construction from regional QdF models built with threshold discharges, for little mountainous basins with rapid runoff. *International Conference 12-16 September 1994 Stara Lesna (Slovakia)*.
- GALEA, G., PRUDHOMME, C. (1994b). Modèles débit-durée-fréquence et conceptualisation d'un hydrogramme de crue synthétique : validation sur le BVRE de DRAIX. *Hydrologie Continentale*, 1994, vol 9 n°2.
- GALEA, G., RAMEZ, P. (1995) Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en vignoble de coteau. Guide à l'usage des aménageurs. Cemagref-Lyon Div. Hydrologie-Hydraulique.
- GRISOLET, H., GUILMET, B., ARLERY, R. (1962). Climatologie, Méthodes et pratiques. Gauthiers-Villars & Cie Editeur, Paris.
- LUBES, H., MASSON, J.M., RAOUS, P., TAPIAU M. (1994). Safarhy, logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielle adapté à l'évaluation du risque en hydrologie-Manuel de référence, version 2.111. *ORSTOM, Université Montpellier II*.
- JIN, L., GALEA, G. (1990). Modèles descriptifs synthétiques des connaissances régionales en crues, représentativité spatiale et domaine de validité. DEA ULPS/ENITRTS Strasbourg, Cemagref-Lyon Div. Hydrologie-Hydraulique.
- LANG, M. (1995). Les chroniques en hydrologie : modélisation comparée par un système de gestion de bases de données relationnel et orienté-objet. Traitements de base et intervalles de confiance des quantiles de crues. Techniques d'échantillonnage par la méthode du renouvellement. Thèse de doctorat, Ministère de l'Équipement, Cemagref, groupement de Lyon Division Hydrologie-Hydraulique, juin 1995.
- MARGOUM, M. (1992). Estimation des crues rares et extrêmes : le modèle AGREGEE, conception et premières validations. Thèse de doctorat ; GIS Hydrologie AMHY-FRANCE, Cemagref Lyon, Division Hydrologie-Hydraulique, Ecole des Mines de Paris, Soutenue le 30 juin 1992.
- MICHEL, C. (1982). Extrapolation par la méthode du GRADEX. Note interne KG 03.05.82, Cemagref-Antony, Div. Hydrologie.
- MICHEL, C. (1989). Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux. Cemagref Antony, 528p.
- OANCEA, V., STANESCU, A.V., MIC, R. (1994). Application of QdF models in regional analysis of rare floods. *International Conference 12-16 September 1994 Stara Lesna (Slovakia)*.
- OBERLIN, G., Ben MANSOUR, H., ORTIZ, R. (1989). Generalization and standardization for 3 types of flow-duration-frequency curves in flood regime description and transfer. FRIEND, Bolkesjö, AISH n° 187.
- OBERLIN, G. (1992) Normalisation des variables dans les modèles hydrologiques descriptifs. *Informations Techniques du Cemagref*, mars 1992, n° 85, note 4.
- PRUDHOMME, C., LANG, M. (1994). Adaptation du modèle régional QdF au modèle d'extrapolation AGREGEE. *International Conference 12-16 September 1994 Stara Lesna (Slovakia)*.
- PRUDHOMME, C. (1995). Analyse et régionalisation des régimes hydrologiques méditerranéens. Thèse de Doctorat en Hydrologie soutenue le 8 décembre 1995. Cemagref-Lyon, Division Hydrologie-Hydraulique, LHM Montpellier II.
- VEN TE CHOW (1964). *Handbook of applied Hydrology*, McGraw Hill, New-York.