

Description des régimes hydrologiques des hautes-eaux : nouvelle formulation pour l'analyse en débit-durée-fréquence et applications en ingénierie

Éric Sauquet ^a, Pierre Javelle ^b et Sandrine Le Clerc ^a

En matière d'information sur les inondations, l'analyse fréquentielle des crues observées n'est pas suffisante. En effet elle ne permet de caractériser l'aléa qu'à partir des pointes alors que l'analyse QdF permet d'intégrer les paramètres de débit (Q), durée (d) fréquence (F). Après un rappel des principes généraux de l'analyse QdF, les auteurs décrivent ici une nouvelle déclinaison de cette analyse, puis ils détaillent les derniers développements réalisés et expliquent les applications possibles

La prévention, en matière de lutte contre les inondations, requiert la connaissance précise de deux éléments : la vulnérabilité qui exprime la sensibilité de la parcelle en bordure du cours d'eau aux inondations et l'aléa hydrologique qui décrit en terme de probabilité l'occurrence moyenne du phénomène naturel de débordement du cours d'eau. Le croisement de ces deux composantes permet d'évaluer les risques d'inondation pour les riverains. L'aléa sera l'objet principal de cette communication qui se veut une synthèse des derniers acquis dans ce domaine exploré de longue date par le Cemagref.

Dans le milieu opérationnel, l'étude de l'aléa s'appuie classiquement sur une analyse fréquentielle des crues observées. On prend ainsi du recul par rapport aux événements passés pour dégager une synthèse statistique du fonctionnement de la rivière intelligible et exploitable directement par les acteurs de l'eau.

Cette étude est bien souvent réduite à l'ajustement d'une distribution statistique à un échantillon de débits de pointe. La connaissance apportée restait de fait partielle. Les crues se définissent en effet par la pointe mais également par leur volume.

Prenons pour exemples deux cours d'eau distincts, que nous suivrons tout au long de cet article :

- (a) le Volp, un sous-bassin de la Garonne, mesuré à Ste-Croix-Volvestre ($S = 91 \text{ km}^2$),
- (b) la Seille, un affluent de la Moselle, mesurée à Nomény ($S = 925 \text{ km}^2$).

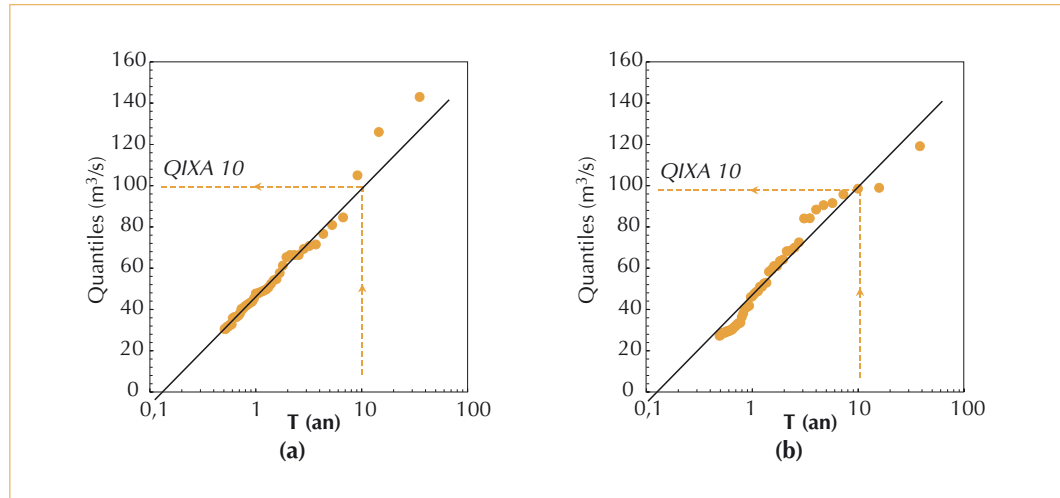
Les échantillons des débits de pointe ont été constitués et ajustés à une loi exponentielle (figure 1). Dans les deux cas, les distributions décrites par les droites sont identiques. Ainsi, le débit instantané de période de retour 10 ans atteint $99 \text{ m}^3/\text{s}$ pour ces deux bassins. Cependant, à l'échelle de l'épisode (figure 2), la dynamique des crues est très différente, y compris sur des événements équivalents en pointe. La Seille présente des écoulements soutenus pendant près de dix jours tandis que les crues du Volp s'évacuent rapidement.

L'étude restreinte aux seuls débits de pointe ne permet pas de différencier les deux rivières, alors que manifestement, la persistance des phénomènes et les volumes de crue à gérer pendant la crise ne sont pas du même ordre de grandeur. Il paraît indispensable de compléter l'analyse statistique en introduisant une dimension temporelle pour décrire plus précisément la dynamique des crues, le caractère plus ou moins soutenu des crues... C'est ce que réalise l'analyse en *débit Q-durée d-fréquence F*.

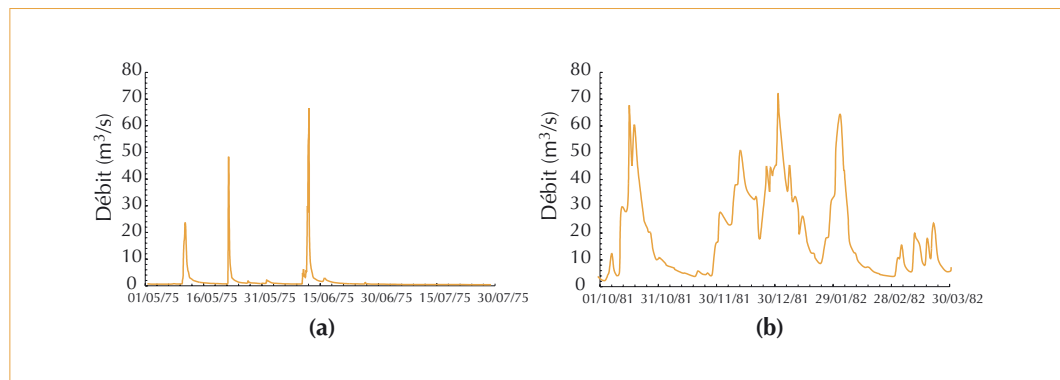
Contact

a. Cemagref, UR Hydrologie-hydraulique, 3 bis quai Chauveau, CP 220, 69336 Lyon Cedex 09
b. DIREN Ile-de-France, Service Risques naturels, hydrométrie et annonce des crues, 24, quai d'Austerlitz, 75013 Paris

► Figure 1 – Distributions théorique et empirique des débits de pointe pour le Volp à Ste-Croix-Volvestre (a) et pour la Seille à Nomény (b).



► Figure 2 – Hydrogrammes de crue observés sur le Volp à Ste-Croix-Volvestre (a) et sur la Seille à Nomény (b).



L'objectif de cet article est de décrire une nouvelle déclinaison de l'analyse QdF et deux exploitations possibles. Il se compose de trois parties : la première rappelle les principes généraux de l'analyse QdF, la seconde détaille les derniers développements réalisés et la dernière est consacrée à deux applications possibles : construction d'hydrogrammes de projet homogènes en fréquence et caractérisation d'une modification temporelle des régimes de crue.

Rappels sur l'approche QdF

L'approche QdF fournit une représentation fréquentielle théorique multi-durée des quantiles de crue.

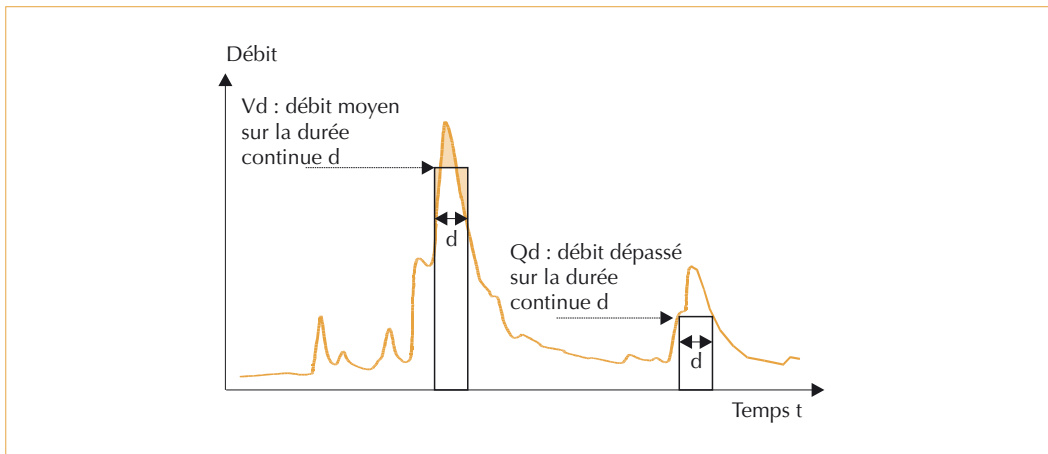
Deux variables calculées à partir de la donnée brute sont généralement examinées (figure 3) :

- les débits-seuils Qd continûment dépassés pendant la durée d :

$$Qd(t) = \min\{Q(t'), t' \in [t, t+d]\} \quad (1)$$

- les débits moyens Vd , moyennes mobiles calculées sur une durée continue d :

$$Vd(t) = \frac{1}{d} \int_{t-d/2}^{t+d/2} Q(t') dt' \quad (2)$$



◀ Figure 3 – Définition des variables examinées par une analyse QdF.

Les deux variables Vd et Qd , exprimées en m^3/s ou l/s , se rejoignent pour $d = 0$ (correspondant au débit instantané). L'analyse QdF décrit les variations des quantiles de Vd et Qd en fonction de la durée d et de la période de retour T . Cette approche est analogue à la synthèse en intensité-durée-fréquence réalisée pour les pluies. Les résultats se présentent sous la forme d'un faisceau de courbes, paramétrées par la durée d dans le plan (*débit*, T) ou transformé (*débit*, $\ln|T|$) (figure 4.a) ou dans le plan (*débit*, d) paramétrées cette fois par la période de retour T (figure 4.b).

L'analyse se décline en trois grandes étapes : (a) le choix de la variable et de la gamme de durées étudiées, (b) l'échantillonnage multi-durée, (c) la modélisation QdF :

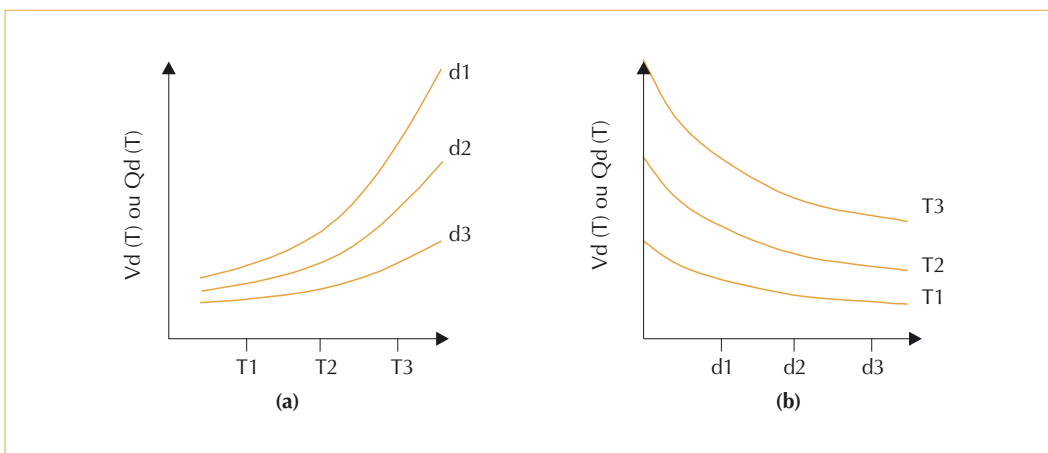
(a) le choix de la variable et de la gamme de durées étudiées : l'opérateur choisit d'analyser les débits-seuils ou moyens (on privilégiera les

débits moyens pour des questions relatives aux volumes, les débits-seuils sont plus adaptés aux problèmes de débordement) sur N durées d_i , $i = 1, \dots, N$ en veillant à ne pas intégrer des durées bien au-delà de la durée moyenne des épisodes de crue observés ;

(b) l'échantillonnage multi-durée : les valeurs sélectionnées v_{d_i} extraites de la chronique $Qd(t)$ ou $Vd(t)$ sont :

- soit les valeurs maximales supérieures à un seuil définissant des événements indépendants ;
- soit les maxima annuels.

Des tests statistiques viennent valider cette phase de sélection (Lang, 1995). Les valeurs v_{d_i} sont ensuite triées par ordre décroissant et identifiées par leur rang. Ces opérations sont renouvelées pour chaque durée d_i , $i = 1, \dots, N$.



◀ Figure 4 – Représentation des courbes QdF.

(c) la modélisation QdF : les courbes débit-durée-fréquence sont obtenues :

- par ajustement d'une loi de probabilité sur chaque échantillon : les paramètres de la distribution statistique $Vd_j(T)$ ou $Qd_j(T)$ sont calculés par examen de la seule durée d_j . Cette approche ne fournit des quantiles que pour les durées retenues dans la phase de sélection. D'autre part, les courbes ajustées peuvent se croiser, donnant lieu à des incohérences, du type quantile de débit instantané inférieur au quantile de débit moyen journalier pour une même période de retour ;

- à l'aide d'un modèle QdF « bibliothèque » supposé représentatif du régime des crues du bassin examiné. Le choix du modèle parmi trois référencés en France repose sur la pluviométrie locale et le débit instantané de période de retour 10 ans $QIXA10$ (Galéa et Prudhomme, 1997). Une expression analytique permet de reconstituer les quantiles connaissant $QIXA10$ et la durée de $SOCOSE$ (D_{SOCOSE}), valeur médiane des durées de dépassement de la moitié du débit de pointe, pour les événements proches de $QIXA10$. Cette méthode présente des difficultés d'usage liées à l'hypothèse d'universalité des trois modèles et au choix du modèle de référence ;

- à l'aide du modèle convergent (Javelle, 2001). Cette nouvelle approche examine en

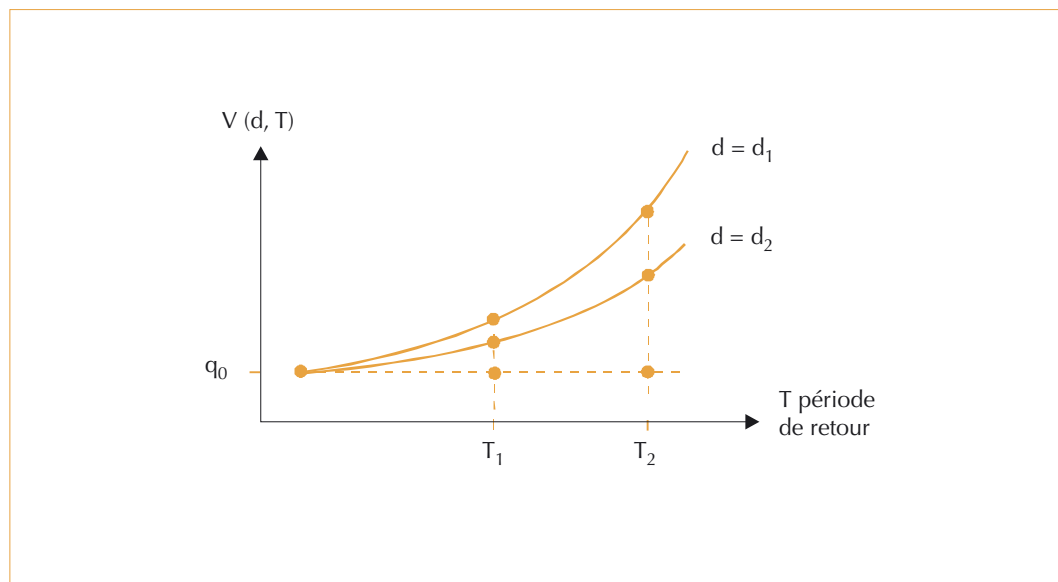
simultané l'ensemble des données toutes durées confondues et réalise une consolidation mutuelle de tous les ajustements : les N durées $d_j, j = 1, \dots, N$ participent toutes à l'estimation des paramètres de la distribution théorique pour chaque durée d_j . Javelle (2001) aboutit à des formulations mathématiques explicites $V(d, T)$ et $Q(d, T)$ en fonction des deux variables d et T . Le modèle convergent offre une description continue en durée et fréquence des quantiles au-delà des durées retenues dans la phase de sélection. Une présentation succincte en est donnée au paragraphe suivant.

Le modèle QdF convergent

Hypothèses et formalisation

Le modèle QdF convergent est né d'une propriété observée sur un grand nombre de chroniques hydrologiques traitées : les ajustements $Vd(T)$ tendent tous à se croiser en un même point vers les très faibles périodes de retour. Cette première hypothèse énoncée, une seconde, plus forte, est envisagée, appuyée également par les observations : les lois de probabilité théoriques relatives aux différentes durées se déduisent les unes des autres par affinité orthogonale et la droite définissant cette affinité est parallèle à l'axe des T , et passe par le point de convergence des distributions théoriques (figure 5).

► Figure 5 – Principe d'affinité du modèle convergent.



Ces propriétés se traduisent mathématiquement par :

$$\frac{V(d_1, T_1) - q_0}{V(d_1, T_2) - q_0} = \frac{V(d_2, T_1) - q_0}{V(d_2, T_2) - q_0}$$

ou encore $\frac{V(d, T) - q_0}{V(0, T) - q_0} = f(d)$ (3)

où q_0 est l'ordonnée du point de convergence et f une fonction de la seule durée d .

L'examen de nombreux bassins en France métropolitaine (Javelle, 2001), Martinique (Meunier, 2001), Canada (Javelle et al., 2002) a montré que la fonction f pouvait raisonnablement être hyperbolique et que q_0 pouvait être fixé à zéro sans compromettre l'efficacité du modèle. D'où la formulation finale :

$$\frac{V(d, T)}{V(0, T)} = \frac{1}{1 + d/\Delta} \quad (4)$$

avec Δ homogène à une durée, à définir.

Les quantiles théoriques $V(d, T)$ se déduisent de la distribution des débits instantanés :

$$V(d, T) = \frac{V(0, T)}{1 + d/\Delta} \quad (5)$$

En supposant que :

$$V(d, T) = \frac{1}{d} \int_0^d Q(t, T) dt \quad (6)$$

on déduit une relation analogue à (5) pour les quantiles de débits seuils $Q(d, T)$:

$$Q(d, T) = \frac{V(0, T)}{(1 + d/\Delta)^2} \quad (7)$$

Estimation du paramètre Δ

Plusieurs approches peuvent être envisagées (Koutsoyiannis et al., 1998 ; Javelle, 2001 ; Meunier, 2001). La procédure privilégiée fait intervenir un processus de calage de Δ par optimisation. Elle présente l'avantage d'être simple d'application et économe en hypothèses. Elle s'appuie sur le fait qu'en réécrivant l'équation (4) et connaissant Δ ,

on se ramène à la distribution $V(0, T)$ à partir des ajustements théoriques $V(dT)[1 + d/\Delta]$. La même propriété est attendue pour les N échantillons de valeurs $v_{d_i}(j), j=1, \dots, NV_i$ relatives à la durée d_i . Les distributions des N séries transformées $x_{d_i}, i=1, \dots, N$:

$$x_{d_i}(j) = v_{d_i}(j) \cdot [1 + d_i/\delta] \quad (8)$$

doivent se confondre avec celle des valeurs instantanées dans le cas où $\delta = \Delta$.

La procédure consiste à faire varier δ et conserver la valeur pour laquelle la dispersion des N distributions pseudo-instantanées x_{d_i} autour de l'échantillon constitué des valeurs :

$$\bar{x}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{d_i}(j) \quad (9)$$

est minimale. Cette dispersion est mesurée de manière globale par la somme des écarts relatifs entre les x_{d_i} et \bar{x} :

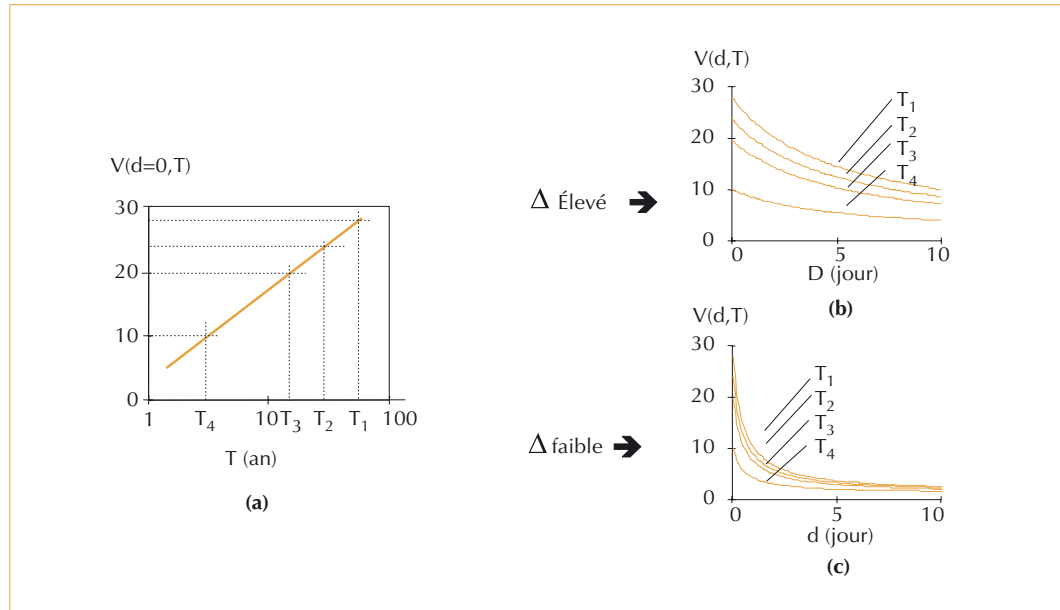
$$\varepsilon = \sum_{j=1}^{NV} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_{d_i}(j) - \bar{x}(j)}{\bar{x}(j)} \right)^2 \quad (10)$$

où NV correspond au nombre de valeurs sélectionnées par durée. Le critère d'optimisation ne préjuge pas de la loi théorique ajustée et manipule des écarts relatifs, afin de donner autant de poids aux faibles et aux fortes valeurs de x_{d_i} .

La dernière étape consiste à calculer les paramètres de la distribution $V(0, T)$. Ces derniers sont ajustés sur l'échantillon \bar{x} . Toutes les distributions statistiques et méthodes d'ajustement peuvent être utilisées à cette fin.

Une déclinaison régionale a été développée pour reconstituer les courbes en site non jaugé. Elle s'inspire de la méthode de l'indice de crue. Un modèle convergent adimensionnel est établi par analyse multi-site au sein d'un secteur réputé homogène, et les courbes QdF sont restituées connaissant les normes en débit et durée, estimées par ailleurs. Ceci sort du cadre de cette présentation axée sur l'analyse locale. Le lecteur se référera aux travaux menés sur la Moselle (Galéa et al., 2001).

► Figure 6 – Sensibilité des courbes QdF convergent au paramètre Δ .



Interprétation physique de Δ

La valeur attribuée conditionne la forme des hyperboles dans le plan (Q, d) , selon l'équation :

$$V(d, T) = \frac{V(0, T)}{1 + d/\Delta} \quad (11)$$

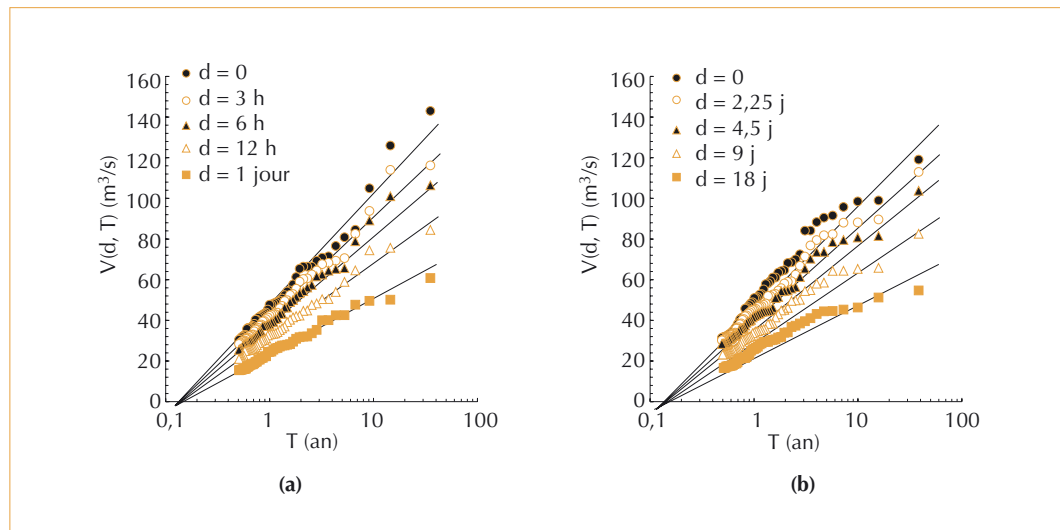
La figure 6 permet d'apprécier l'influence de Δ sur un couple de bassins ayant même distribution des débits instantanés $V(0, T)$ [figure 6.a], mais deux valeurs distinctes pour Δ . Les quantiles $V(d, T)$ s'effondrent rapidement avec la durée pour Δ faible :

les courbes de faible Δ (figure 6.c) sont plus infléchies que leurs homologues avec Δ élevé (figure 6.b).

On attend donc que les valeurs élevées de Δ soient plutôt représentatives de bassins à dynamique lente, pour lesquels les débits moyens écoulés sur plusieurs jours sont comparables. En revanche, les bassins qui voient leurs écoulements se tarir rapidement présenteront *a priori* des valeurs faibles de Δ . Cette durée renseignerait la dynamique du bassin versant en hautes-eaux.

Reprenons les exemples du Volp et la Seille qui rappellent la configuration de la figure 6.

► Figure 7 – Application du modèle convergent aux débits moyens $V(d, T)$ du Volp (a) et de la Seille (b).



Cinq durées sont examinées, donnant lieu à cinq séries de débits moyens Vd avec d compris entre 0 et 1 jour pour le Volp et entre 0 et 18,5 jours pour la Seille. Le modèle convergent $V(d, T)$ est appliqué aux séries de valeurs maximales de débits moyens Vd (figure 7).

L'examen de la chronique des données brutes de la Seille (figure 2.b) montre que les débits moyens écoulés sur les durées inférieures à deux jours sont sensiblement équivalents aux valeurs de pointe. Ceci se traduit par des distributions des quantiles $V(0, T)$ et $V(2,32 \text{ jours}, T)$ relativement proches.

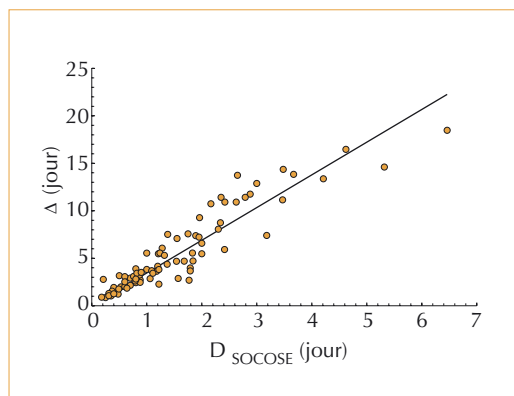
En revanche, les ajustements obtenus pour le Volp pour une gamme de durées inférieures à 2 jours sont bien distincts et révèlent un effondrement rapide des débits moyens écoulés avec la durée (figure 7.a). Le quantile $V(0, T)$ est le double de $V(1 \text{ jour}, T)$ pour cette station.

La durée Δ obtenue pour le Volp, à dynamique rapide, est égale à 24 heures et est effectivement inférieure aux 18,5 jours, ajustés pour la Seille à dynamique plus lente. La hiérarchie naturelle dans les valeurs de Δ est ainsi respectée.

Pour confirmer ce lien avec la dynamique, Δ est comparé à une durée caractéristique de crue, la durée de *SOCOSE* (D_{SOCOSE}). L'application a concerné 103 bassins versants français, de surface comprise entre 7 et 9 400 km² et de durée d'enregistrement entre 9 et 33 ans. Dans ce contexte, il existe une solide relation entre les deux durées (figure 8), qui renforce l'interprétation de Δ en terme de dynamique :

$$\Delta = 3,44 D_{SOCOSE} \text{ avec } R^2 = 0,85 \quad (12)$$

▼ Figure 8 – Relation entre la durée Δ et la durée de *SOCOSE*.



Quelles applications pour l'analyse QdF ?

La description en débit-durée-fréquence, quelle qu'en soit la formulation, a de multiples usages : estimation des quantiles de crue en débits moyens ou débits seuils pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, insertion dans une typologie de régimes de crue, définition de scénarios hydrologiques de référence pour l'estimation du risque d'inondation, validation des sorties de modèles hydrologiques, caractérisation d'une évolution du régime des hautes-eaux... Nous avons privilégié deux applications possibles.

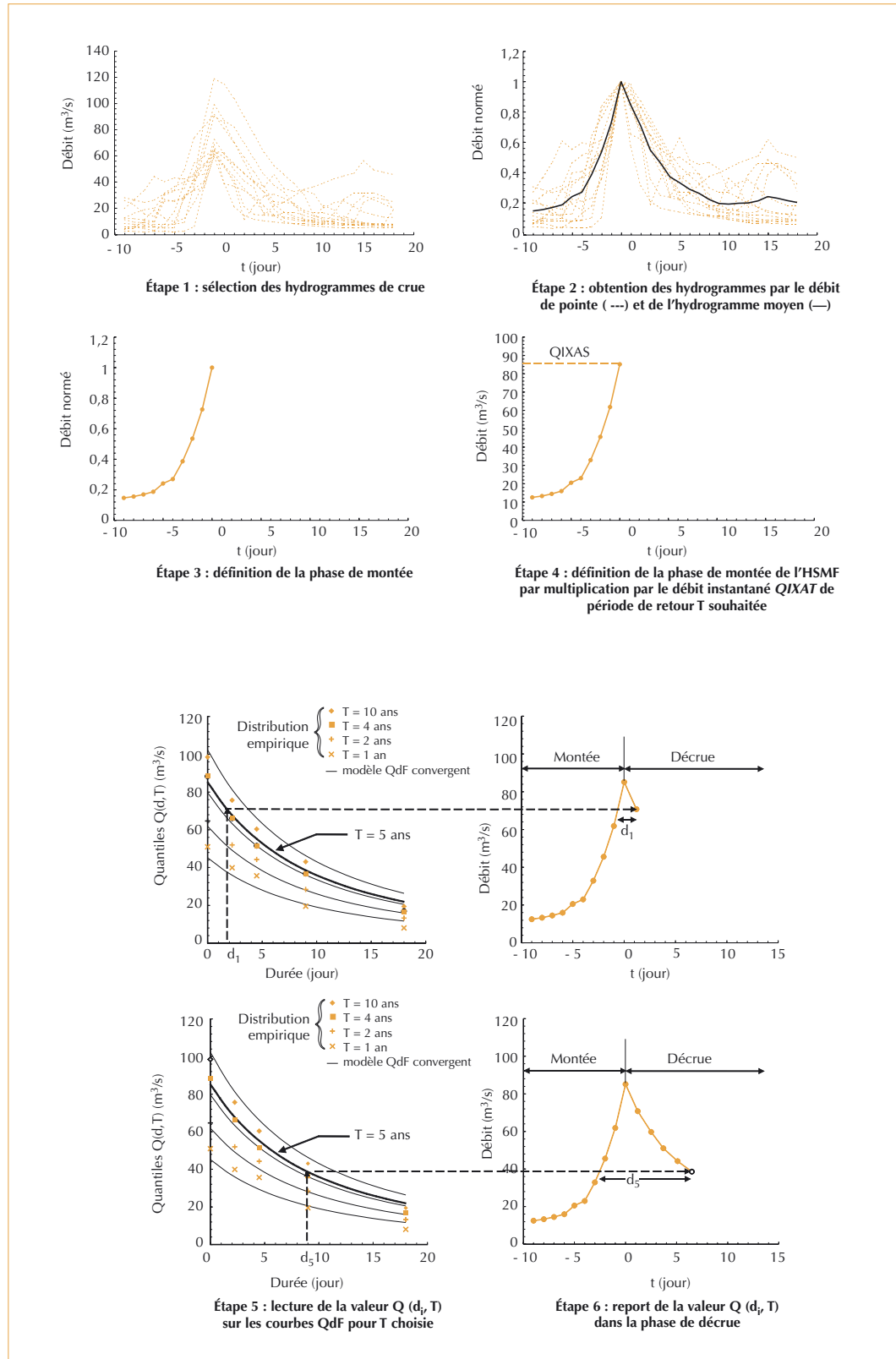
L'analyse QdF pour la construction d'hydrogrammes de projet

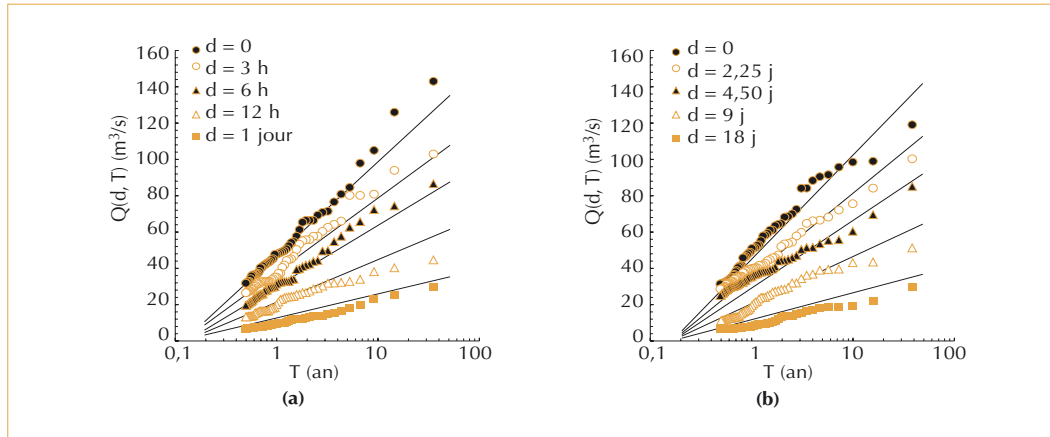
Dans une démarche d'aménagement pour lutter contre les inondations, les bureaux d'étude sont amenés à reproduire par simulation numérique des scénarios passés pour mesurer l'impact de ces événements (extension et persistance du champ d'inondation). Ils doivent procéder de même avec des scénarios de référence respectant certaines propriétés fréquentielles (« la crue centennale » par exemple). Ces scénarios se déclinent en hydrogrammes de projet, données d'entrée des modélisations hydrauliques. Les méthodes de construction de ces hydrogrammes sont multiples.

La première approche consiste à appliquer des expressions analytiques trouvées dans la littérature technique. Elle est simple ; cependant, il faut prendre du recul par rapport à ce type de formulations mathématiques : elles n'ont pas de vocation universelle et leur choix relève de l'arbitraire.

La seconde approche, plus naturelle, cherche à exploiter les chroniques de débits. De ces séries, on souhaite dégager un événement synthétique qui rende compte de la variabilité des situations réelles rencontrées (notamment des plus grandes crues) sans être trop particulier. Gilard (1998) propose un Hydrogramme Synthétique MonoFréquence HSMF déduit des courbes QdF. L'avantage de l'HSMF est de garantir que toutes les caractéristiques de l'hydrogramme (en volume et en débit seuil) sont rattachées à une même fréquence d'occurrence. La phase de montée de l'HSMF est supposée linéaire avec le temps. Le maximum est atteint à l'instant $t = D_{SOCOSE}$. La pointe de crue est définie par $QIXAT$ débit instantané maximal de période de retour T choisie et la décroissance est conditionnée par les valeurs de débit-seuil $Q(d, T)$ des courbes QdF.

► Figure 9 –
Détails de
construction de
l'Hydrogramme
Synthétique
Mono-Fréquence.





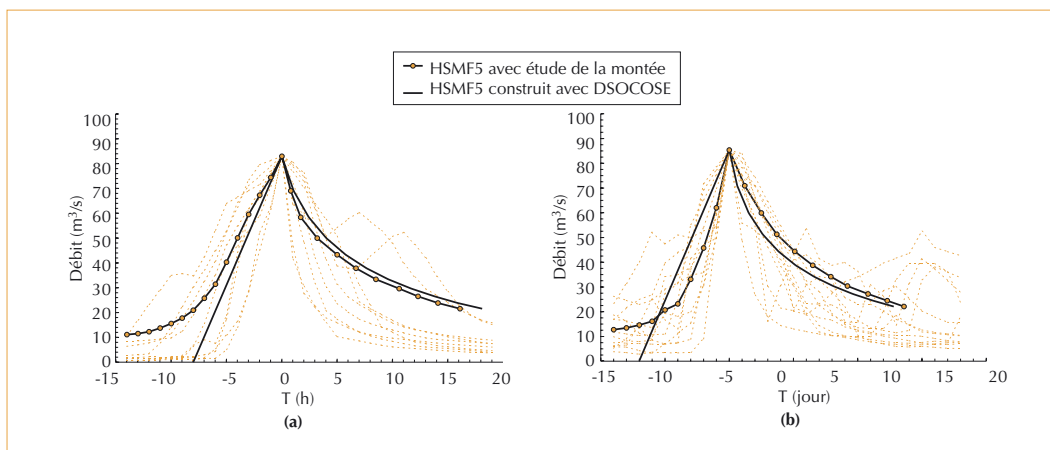
◀ Figure 10 – Application du modèle convergent aux débits seuils $Q(d, T)$ du Volp (a) et de la Seille (b) à partir des paramètres établis sur les débits moyens $V(d, T)$.

Dans cette dernière approche, la priorité était la cohérence des volumes. Nous avons décidé de faire évoluer l'HSMF pour répondre à des contraintes spécifiques liées au gradient de montée (Garçon *et al.*, 2002). On propose de constituer un échantillon d'hydrogrammes de crue observés (figure 9, étape 1), rendus adimensionnels en divisant par le débit de pointe. On calcule un hydrogramme moyen sans dimension (figure 9, étape 2) et on en retient l'allure en phase de montée (figure 9, étape 3). Multipliée par Q_{IXAT} , elle décrit la première partie de la crue de projet (figure 9, étape 4). La phase de descente est construite de telle sorte que, sur l'épisode, le débit dépasse en continu la valeur du quantile de débit-seuil $Q(T, d)$ pendant la durée d (figure 9, étapes 5 et 6).

L'application concerne l'HSMF de période de retour 5 ans pour la Seille et le Volp. L'expression analytique (7) avec Δ ajusté sur les débits moyens $V(d, T)$ fournit les quantiles $Q(d, T)$ en débits-seuils. Les écarts aux distributions empiriques sont

acceptables (figure 10). Dans les deux applications, la phase de montée est calculée à partir de douze crues parmi les plus fortes en pointe. La courbe de récession de l'HSMF est discrétisée en dix points, dix valeurs de débit-seuil $Q(d, T)$ calculés selon (7) pour les durées, $d_i = i\Delta/10$, $i = 1, \dots, 10$. Les débits $Q(d_i, T)$ en décade se situent à une distance d_i du point d'ordonnée $Q(d_i, T)$ de la phase de montée.

À titre de comparaison, l'HSMF5 (avec montée linéaire et montée déduit de l'analyse de crues) et les douze hydrogrammes normés puis ramenés au même débit de pointe Q_{IXA5} sont tracés sur le même graphique (figure 11). Les deux HSMFs de la Seille proposent des scénarios sensiblement différents. La portion linéaire conduirait à un scénario qui sous-estime la vitesse de montée des eaux. L'examen de la phase de montée assure que l'HSMF se place effectivement dans la gamme des formes d'hydrogrammes et gradients probables



◀ Figure 11 – Hydrogrammes Synthétiques Mono-Fréquence pour $T = 5$ ans, pour le Volp (a) et la Seille (b).

déjà rencontrés (on rappelle toute la difficulté d'appréciation de la durée de *SOCOSE*). Nous avons introduit ici une allure moyenne pour la phase de montée. Ce n'est pas la seule option possible. On pourra au besoin intégrer des formes extrêmes pour la montée et envisager ainsi des situations plus pénalisantes vis-à-vis du gradient de montée, tout en respectant la cohérence des volumes, ce qui ouvre de nouveaux champs d'application.

L'analyse QdF, outil de diagnostic pour détecter une modification du régime des hautes-eaux

L'analyse QdF réalise une synthèse du fonctionnement du bassin versant et est sensible à toute modification des conditions hydrauliques, hydrologiques ou d'occupation du sol qui affectent la transformation pluie-débit. C'est sur cette base que la modélisation QdF a servi d'outil de validation de modélisations (le régime des hautes-eaux est bien restitué sous réserve de superposition des faisceaux de courbes reconstituées et observées. Elle permet d'apprécier les changements vis-à-vis d'une dérive climatique, d'une urbanisation croissante...

Nous allons illustrer notre propos sur un traitement QdF effectué dans le cadre du projet GICC-Rhône d'étude d'impact du changement climatique sur l'hydrologie du Rhône et des ses affluents français (Leblois, 2002). Des projections du fonctionnement futur ont été réalisées à l'aide de modèles hydrologiques contraints par des données climatiques d'entrée perturbées.

Le scénario climatique de base envisage un doublement du taux de CO_2 , en cohérence avec les prédictions actuelles et se traduit par une

augmentation des précipitations en hiver sans évolution du nombre d'épisodes. Les séries temporelles de pluies mesurées entre 1981 et 1995 ont vu leur volume modifier selon la méthode dite « des perturbations », sans toucher à l'enchaînement des épisodes, réputé toujours valide sous changement climatique. Elles deviennent ainsi les pluies futures qui alimentent deux modèles distribués ayant déjà montré leur efficacité à reproduire le climat passé (Sauquet et Leblois, 2001).

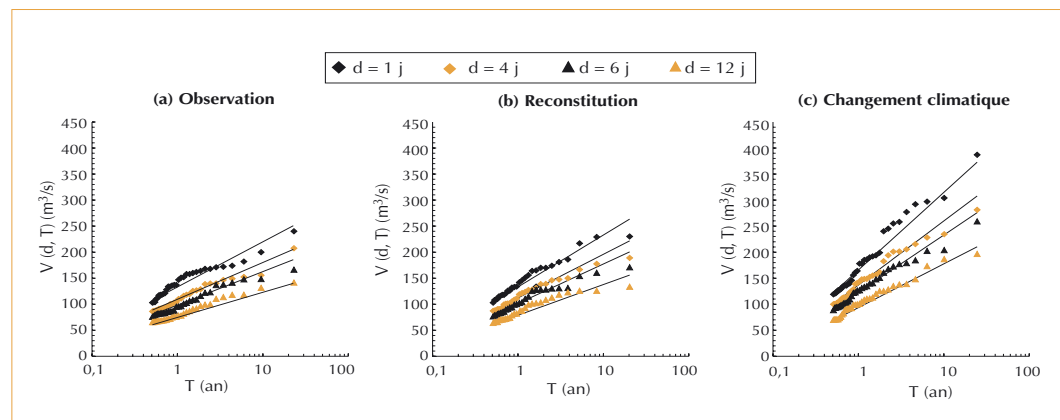
Les modèles calculent les débits obtenus en plus de 100 points du réseau hydrographique. Pour chaque bassin, trois chroniques de débit doivent être comparées :

- celles observées sur la période 1981-1995 (figure 12.a) ;
- celles reconstituées par le modèle MODCOU à partir des pluies observées sur la période 1981-1995, pour en mesurer son efficacité dans les conditions passées (figure 12.b) ;
- celles simulées par le modèle MODCOU sous changement climatique (figure 12.c).

Chaque chronique a fait l'objet d'un traitement selon l'approche convergente (estimation de Δ et $V(0, T)$). Nous nous arrêterons sur un bassin extrait de la zone d'étude Rhône : la Lanterne, affluent de la Saône, à Fleurey-lès-Faverney.

Le faisceau de courbes obtenu à partir des reconstitutions (b) est proche de celui issu des chroniques observées (a). Ceci confirme que le modèle hydrologique MODCOU est capable de reproduire correctement le fonctionnement du bassin en hautes-eaux, condition nécessaire pour espérer en modéliser les évolutions. En revanche, les courbes QdF de la chronique obtenue sous

► Figure 12 – Comparaison des courbes QdF pour la Lanterne à Fleurey-lès-Faverney, (a) déduites des observations, (b) reconstituées par le modèle hydrologique MODCOU et (c) attendues sous changement climatique.



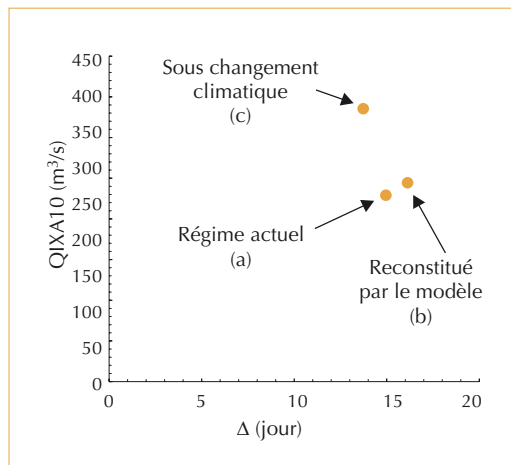
changement climatique et issue de MODCOU (c) s'écartent de celles observées (a). Les quantiles de crue sont ainsi augmentés pour toutes les durées inférieures à 12 jours. Une modification sensible du régime des hautes-eaux est perceptible.

Pour confirmer cette appréciation, nous nous appuyons sur Δ , qui décrit la dynamique de crue. En l'associant à une caractéristique de l'intensité des crues, nous obtenons une description complète du fonctionnement du bassin en termes de dynamique et d'intensité. Le choix du second indicateur s'oriente naturellement vers un quantile de crue. Nous avons opté pour $QIXA10$, représentatif des crues rares et adapté aux objectifs classiques de lutte contre les inondations.

La figure 13 est la projection du régime des crues, observé, reconstitué et modifié dans le plan défini par les deux descripteurs : Δ et $QIXA10$ (ou encore $V(0, 10)$). Le graphique confirme les restitutions fidèles de MODCOU en crue. Les points représentatifs des courbes QdF observées (a) et reconstituées (b) sont voisins mais s'écartent du point associé au changement climatique (c). La magnitude des événements est augmentée tandis que la dynamique exprimée par Δ évolue peu. Deux principales raisons sont avancées :

- le processus de genèse des crues n'est pas modifié : il n'y a pas eu basculement brutal d'un

▼ Figure 13 – Impact du changement climatique sur les paramètres du modèle QdF convergent pour la Lanterne à Fleurey-lès-Faverney.



régime gouverné par la fonte du manteau neigeux à un régime exclusivement pluvial. Il s'agit toujours d'épisodes liés aux précipitations d'hiver augmentées en intensité mais pas en durée ;

- l'occupation du sol et l'aménagement hydraulique de la rivière n'a pas évolué. Le temps de transfert reste identique.

La Lanterne n'est qu'une illustration et les résultats doivent être généralisés à d'autres bassins avant de tirer des conclusions définitives sur l'hydrologie future du bassin du Rhône. Cette analyse globale est une tâche programmée dans le projet GICC-Rhône.

Conclusion

Le présent article s'intéresse à la description du régime des crues à l'aide des courbes QdF en débit-durée-fréquence. Une nouvelle formulation de ces courbes est présentée. Simple d'application, elle s'appuie sur un paramètre Δ en lien avec la dynamique de crue et permet de restituer les quantiles de débits moyens sur toute durée d'intérêt, mais également les quantiles de débits seuils, dépassés en continu pour toute durée d'intérêt. De nombreux cas d'étude sous différents climats ont montré leur aptitude à restituer les quantiles de crue. Nous en avons décrit les bases théoriques et les applications dans une perspective opérationnelle. Deux applications ont été privilégiées. Les courbes QdF combinées à une analyse des crues observées ont permis de définir des hydrogrammes de projet dont les caractéristiques sont relatives à une même période de retour et qui permettent de quantifier *in fine* le risque d'inondation. La deuxième application concerne l'évolution des régimes de crue sous changement climatique. Les régimes actuels et futurs ont été confrontés sur la base de la durée Δ et d'un quantile de crue, deux caractéristiques issues de la modélisation QdF.

La recherche se poursuit et se concentre sur plusieurs points théoriques qui doivent être approfondis. Le Cemagref s'interroge sur les propriétés intrinsèques de la chronique, nécessaires ou/et suffisantes pour légitimer une application du modèle convergent, les incertitudes sur les quantiles résultant, la régionalisation des paramètres requis pour l'application d'un modèle QdF à pertinence régionale. □

Remerciements

Les auteurs remercient leurs collègues de l'unité de recherche Hydrologie-hydraulique du Cemagref de Lyon qui ont bien voulu relire attentivement les différentes versions du manuscrit et Étienne Leblois pour la mise à disposition des chroniques obtenues dans le cadre du projet GICC-Rhône.

Résumé

Cet article décrit une approche statistique dont le but est de caractériser le régime hydrologique des cours d'eau en crue prenant en compte la notion de durée : l'analyse débit-durée-fréquence (QdF). Cette approche présente de fortes analogies avec la démarche intensité-durée-fréquence appliquée aux pluies. La première partie de l'article rappelle le cadre général de la démarche QdF. La seconde est consacrée à la nouvelle formalisation proposée : le modèle convergent. La dernière partie propose deux applications possibles des courbes QdF. La première concerne la construction d'Hydrogrammes Synthétiques Mono-Fréquences, homogènes en fréquence, utilisables dans les simulations hydrauliques pour estimer le risque d'inondation. Dans une deuxième application, nous avons cherché à quantifier les modifications des régimes hydrologiques en crue induites par un changement climatique à l'aide de deux paramètres extraits des courbes QdF, l'un caractérisant la dynamique et l'autre la magnitude des crues.

Abstract

This paper presents a Flood Frequency Analysis (FFA), which takes into account the notion of duration: the flood-duration-frequency (QdF) method. QdF analysis is similar to the intensity-duration-frequency analysis commonly used for rainfall. This article describes the general framework of the QdF approach and the theoretical aspects with detailed steps of calculation. Two applications are then presented. The first application concerns the derivation of Synthetic Mono-Frequency Hydrographs (SMFH) from the QdF fitted curves. The main advantage of this approach is that all the characteristics of the SMFHs are related to the same return period. The second application illustrates the potential for describing the impact of a presumed climate change, by analyzing simulated discharges under climatic scenarios. Results are compared to the present regime using two descriptors derived from the QdF analysis: an indicator of the flood dynamic behaviour and the 10-year-return period instantaneous peak flood.

Bibliographie

- 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*, 1, p. 83-101.
- GALÉA, G., et al., 2001, *Régimes des crues des sous-bassins de la Moselle française : modèles régionaux et SIG associé*, Projet PACTES, Cemagref, Lyon, 69 p.
- GARÇON, R., BOSSARD, E., LANG, M., LE CLERC, S., 2002, *Revisiter la notion de scénario hydrologique de référence pour la caractérisation du risque d'inondation*, Rapport commun EDF/DTG-Cemagref pour le compte du ministère de l'Écologie et du Développement durable, Programme Risque Inondation RIO 1, 76 p.
- GILARD, O., 1998, *Les bases techniques de la méthode Inondabilité*, Cemagref Éditions, Antony, 207 p.
- JAVELLE, P., 2001, *Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent Approche locale et régionale*, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, mars 2001, 268 p.
- JAVELLE, P., et al., 2002, Development of regional flood-duration-frequency curves based on the index-flood method, *Journal of Hydrology*, n° 258(1-4), p. 249-259.
- KOUTSOYIANNIS, D., KOZONIS, D., MANETAS, A., 1998, A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships, *Journal of Hydrology*, n° 206 (1-2), p. 118-135.
- LANG, M., 1995, *Les chroniques en hydrologie : modélisation comparée par un système de gestion de bases de données relationnel et orienté-objet, traitement de base et intervalles de confiance des quantiles de crues, techniques d'échantillonnage par la méthode du renouvellement*, thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier Grenoble I, 1995, 296 p.
- LEBLOIS, E., 2002, *Évaluation des possibles impacts du changement climatique par modélisation distribuée (projets Gewex-Rhône et Gicc-Rhône)*, actes du Colloque SHF « Variations climatiques et hydrologie », Paris, décembre 2001, in press.
- MEUNIER, M., 2001, Regional flow-duration-frequency model for the tropical island of Martinique, *Journal of Hydrology*, n° 247 (1-2), p. 31-53.
- SAUQUET, E., LEBLOIS, E., 2001, Runoff mapping and discharge analysis applied to the evaluation of model performance, *Physics and Chemistry of the Earth*, (5-6), p. 473-478.