

Modélisation de la dynamique des crues dans le bassin versant du fleuve Cavally (Côte d'Ivoire, Libéria, Guinée)

[Flood dynamics modeling in the Cavally River watershed (Côte d'Ivoire, Liberia, Guinea)]

Tivoli Lou Moin Sandrine¹, Kouakou Koffi Eugène¹, Kouakou Christopher¹, Yao Kouadio Assemien François², and Niamien Adjoa Melaine Roseline¹

¹Département de Formation et de Recherche en Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

²Unité de Formation et de Recherche en Sciences Géologiques et Minières, Université de Man, Côte d'Ivoire

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The disastrous consequences of hydrological risks are of paramount importance, hence the need to prevent them and minimize their impacts, if not eliminate them. In this perspective, the study of flood-related risks in the Cavally watershed was carried out. The objective was to analyze the risks related to floods using different approaches. The study was based on the frequency analysis of three series of extreme flows constituted from the daily flows measured at the different hydrometric stations. These series of flows are made up of annual maximum flows, overthreshold flows and maximum flows obtained on the annual series on which were applied the moving averages of daily duration d . After the frequency analysis of these variables, the construction of the QdF curves was carried out. The study showed that flood discharge times are higher at Toulepleu and Fété (4 - 40 days) than at Nékaounié and Tiéouléoula (1 - 10 days). The frequency analysis showed that the Weibull, Gamma, GEV and Gumbel laws are the best laws that fit the different flood flow series. The QdF curves obtained from the different variables show that those obtained with suprathreshold values give more satisfaction compared to the maxan values. These QdF curves describing the intensity of daily flows showed quantiles of flows with return periods from 2 to 100 years, all higher than the average flows observed in the watershed, thus demonstrating a high risk of flooding since even the most frequent floods are likely to generate floods. Compared to the results obtained by applying the reference basin models, the analysis of the QdF curves showed that the Vandenesse model is better in the observable frequency domain as well as in the rare frequency domain.

KEYWORDS: Hydrological risks; Frequency analysis; Cavally basin; Statistics; Flow-duration-frequency.

RESUME: Les conséquences désastreuses des risques hydrologiques sont d'une importance primordiale, d'où la nécessité de les prévenir et de minimiser leurs impacts voire les éliminer. C'est dans cette optique que l'étude des risques liés aux crues dans le bassin versant du Cavally a été effectuée. L'objectif était d'analyser des risques liés aux crues à partir de différentes approches. L'étude s'est appuyée sur l'analyse fréquentielle de trois séries de débits extrêmes constituées à partir des débits journaliers mesurés aux différentes stations hydrométriques. Ces séries de débits sont constituées de débits maxima annuels, de débit supseuil et de débits maxan obtenu sur les séries annuelles sur lesquelles ont été appliquée les moyennes mobiles de durée journalière d . Après l'analyse fréquentielle de ces variables, la construction des courbe QdF a été effectuée. L'étude a montré que les temps d'évacuation des crues sont plus élevés à Toulepleu et Fété (4 – 40 jours) qu'à Nékaounié et Tiéouléoula (1 – 10 jours). L'analyse fréquentielle a montré que les lois de Weibull, Gamma, GEV et Gumbel sont les meilleures lois qui ajustent les différentes séries de débits de crues. Les courbes QdF obtenues à partir des différentes variables montrent que celles obtenues avec valeurs supseuil donnent plus de satisfaction par rapport aux valeurs maxan. Ces courbes QdF décrivant

l'intensité des débits journaliers ont montré des quantiles de débits de période de retour de 2 à 100 ans, tous supérieurs aux débits moyens observés dans le bassin versant, démontrant ainsi un risque élevé d'inondation puisque, même les crues les plus fréquentes sont susceptibles de générer des inondations. Comparée aux résultats obtenus par application des modèles bassin de référence, l'analyse des courbes QdF a montré que le modèle Vandenesse est meilleur dans le domaine des fréquences observables ainsi que dans le domaine des fréquences rares.

MOTS-CLEFS: Risques hydrologiques ; Analyse fréquentielle ; Bassin du Cavally ; Statistique ; Débit-durée-Fréquence.

1 INTRODUCTION

De tous les temps, les plaines inondables des grands bassins versants ont été des lieux de développement socio-économiques en raison de leur potentiel de développement dans le monde entier. C'est le cas des pays comme le Bangladesh, le Japon, la Gambie et l'Égypte où de fortes densités des populations sont établies le long des fleuves et des rivières [1], [2], [3]. De même, la prospérité économique des pays développés a été favorisée par l'utilisation des plaines inondables à des fins commerciales et résidentielles. En effet, les populations installées aux abords de ces rivières et autres cours d'eau naturels peuvent profiter des avantages qu'offrent ces derniers notamment le transport de marchandises, la pêche, l'alimentation en eau potable et la production d'énergie hydraulique [4]. Cependant, malgré les nombreux profits que tirent les populations des cours d'eau, celles-ci peuvent subir les caprices de ces [5]. Les plus courants des caprices sont les inondations causées par des crues qui entraînent de lourdes pertes en vie humaine et en biens matériels auxquelles s'ajoutent les coupures de réseaux routiers et électriques entraînant ainsi l'arrêt momentané des activités socio-économiques. Ainsi, une meilleure connaissance du régime des crues sur un bassin versant permet une gestion durable des inondations encourageant ainsi les populations à s'installer à proximité des cours d'eau avec leurs biens car la diminution des risques à travers une réduction de l'occupation des plaines inondables pourrait limiter le potentiel de développement socio-économique de ces zones [6].

Les crues ont fait l'objet de plusieurs études dans le monde [4], [7], [8], [9], [10], [11]. Plusieurs approches sont connues et utilisées pour connaître la dynamique des crues. Ce sont entre autres l'analyse fréquentielle des crues observées et la modélisation Débit-Durée-Fréquence (QdF) qui permet d'intégrer les paramètres de débit (Q), durée (d) et de fréquence (F) pour caractériser l'aléa hydrologique. Cependant, les techniques d'échantillonnage peuvent parfois impacter la qualité des résultats. Les techniques les plus utilisées pour la constitution des séries de débits sont respectivement les techniques d'échantillonnage par valeurs maximales (Maxan) et celles utilisant les valeurs supérieures à un seuil (Supseuil). Dans cette étude, il s'agit de proposer un modèle d'échantillonnage qui simule au mieux le régime des crues afin de fournir aux planificateurs des données fiables pour la conception d'ouvrages hydrauliques durables. En effet, les débits sont les paramètres qui déterminent l'évolution hydrologique au fil des années. Pour les ouvrages hydrauliques, l'estimation des quantiles de débit avec une durée définie et une période de retour donnée demeure une préoccupation de première importance.

Compte tenu de l'abondance des précipitations, le bassin versant du Cavally est devenu la nouvelle zone d'attraction pour la production des cultures de rentre (café, cacao, palmier à huile, hévéa) tant du côté de la Côte d'Ivoire que du Libéria. De plus, cette région n'a fait l'objet que de très peu d'études hydrologiques. Ainsi, la présente étude y a été menée afin d'analyser la dynamique des crues et les risques associés dans cette région. [4].

2 POINTS À VÉRIFIER AVANT PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Situé en Afrique de l'Ouest entre les latitudes 4° et 8° Nord et longitudes 6° et 8° Ouest, le bassin versant du fleuve Cavally est partagé par trois pays à savoir la Côte d'Ivoire, le Libéria et la Guinée (Fig. 1). Son cours d'eau principal prend sa source au pied des monts Nimba en Guinée et traverse la Côte d'Ivoire. A partir de Toulepleu, ville ivoirienne, il constitue la frontière (naturelle) entre la Côte d'Ivoire et le Libéria pour déboucher enfin sur l'océan atlantique dans le Golfe de Guinée à 21 km à l'Est de la localité de Harper au Libéria. Il a une longueur de 515 Km et son bassin versant s'étend sur 30 600 km².

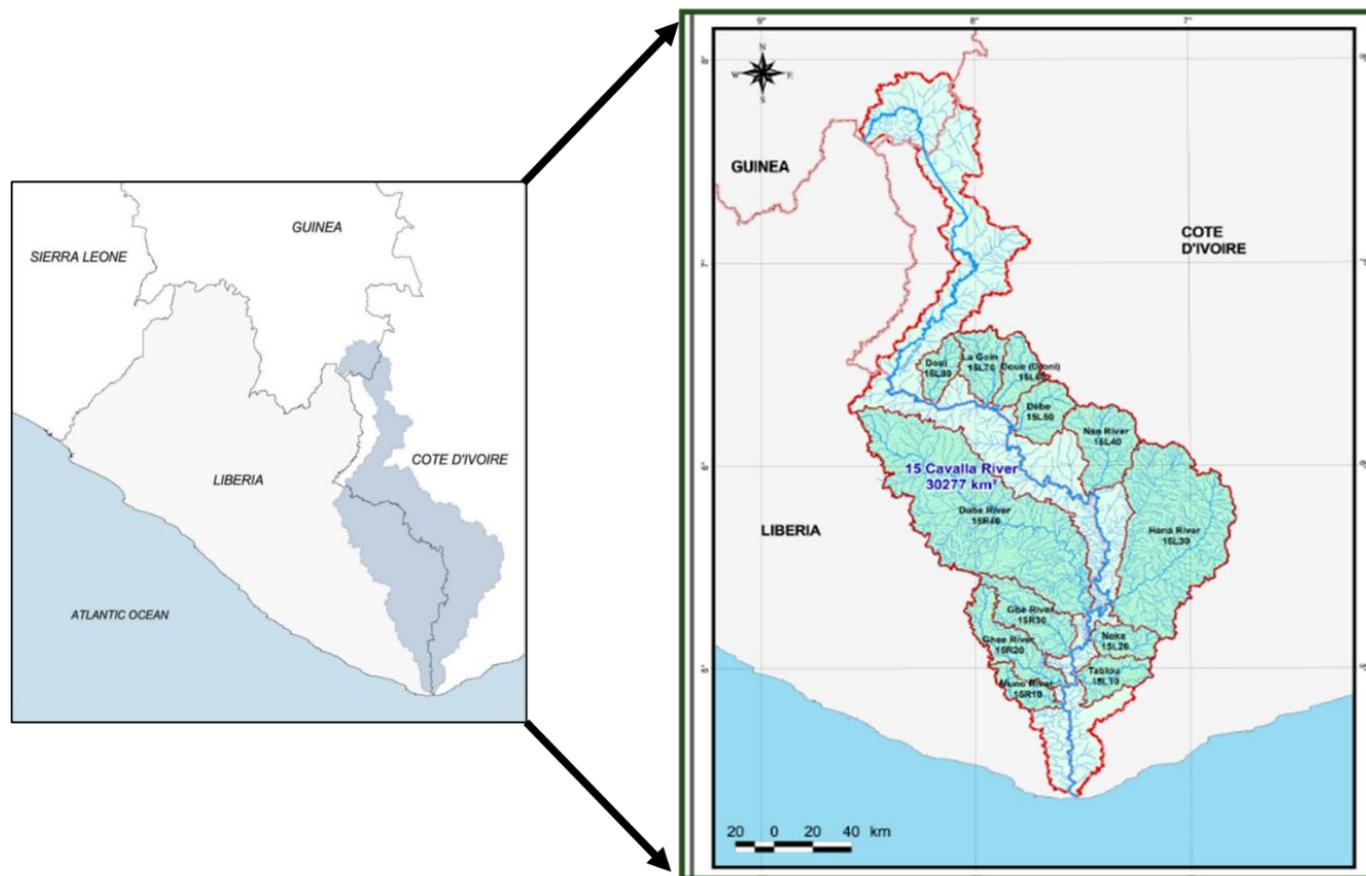


Fig. 1. Situation géographique du bassin versant du fleuve Cavally [12]

Le bassin versant est largement drainé par le Cavally et ses principaux affluents qui sont le Duobe, le Hana, le N'zo, le Douihi, le N'sé, le Niyon et le Goin (Fig. 1). Le réseau hydrographique apparaît comme un dense chevelu de cours d'eau, surtout en saison des pluies.

En Côte d'Ivoire, l'examen des normales pluviométriques a permis de distinguer quatre grandes zones climatiques (Nord, Centre, Ouest et Sud). Le bassin versant du Cavally, orienté du Nord vers le Sud, s'intègre dans trois zones climatiques que sont le climat des montagnes avec deux saisons (pluvieuse et sèche) dans la partie Nord du bassin, le climat équatorial de transition atténué ou climat Baouléen avec quatre saison (deux pluvieuses et deux sèches), au centre du bassin versant et le climat équatorial de transition ou climat attiéen avec quatre saison (deux pluvieuses et deux sèches), dans la partie Sud. Sur l'ensemble de la zone d'étude, les précipitations sont inégalement réparties. Sur la période 19950 – 2019, les moyennes pluviométriques annuelles sont estimées à 1866, 1100 et 1600 mm respectivement du Nord au Sud.

Le relief de la zone d'étude est caractérisé par deux ensembles géomorphologiques : un ensemble montagneux et une zone de plateaux. La zone montagneuse constitue le domaine des hauts sommets où les altitudes dépassent généralement les 1000 mètres. Il correspond au prolongement oriental de la chaîne du Fouta Djallon, en forme de croissant lunaire dont la convexité est tournée vers le S-SE. Le mont Nimba qui culmine à 1753 m d'altitude est le plus haut sommet de la zone et représente la frontière naturelle entre le Liberia, la Guinée et la Côte d'Ivoire. La zone des plateaux occupe le reste de la zone d'étude. L'altitude moyenne y est d'environ 300 m. De nombreuses localités sont concentrées dans ce secteur où les dénivellations sont les plus faibles. Les conditions du milieu naturel sont plus favorables au développement harmonieux des activités humaines.

Le bassin versant du Cavally est caractérisé par une végétation de forêt dense. Cette vaste forêt couvre à la fois le Liberia, la Côte d'Ivoire et la Guinée. Ce bassin possède l'un des plus importants couverts forestiers avec une biodiversité assez importante qui est de plus en plus anthropisée à cause des bonnes conditions culturelles. Cette situation facilite un fort ruissellement et une multiplication des risques d'inondation dans les vallées adjacentes.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 MATÉRIEL ET DONNÉES

Les données de cette étude sont constituées essentiellement de débits journaliers maxima extraits des séries de débits journaliers interannuels de différentes stations hydrométriques situées sur le cours d'eau principal et sur certains affluents du fleuve Cavally (Fig. 2). De ces débits journaliers, plusieurs variables hydrologiques ont été extraites. Ce sont les débits maximaux instantanés (Q_{ix}), les débits-seuils caractéristiques maxima continûment dépassés sur la durée d noté $QCXd$, les débits moyens caractéristiques sur une durée continue d notés $VCXd$, les modules mensuels et annuels. Ces données ont été fournies par la Direction de l'Hydrologie et couvrent la période 1950 - 2020. Elles ont été traitées à partir de Microsoft Excel et Hyfran-Plus 2.2.

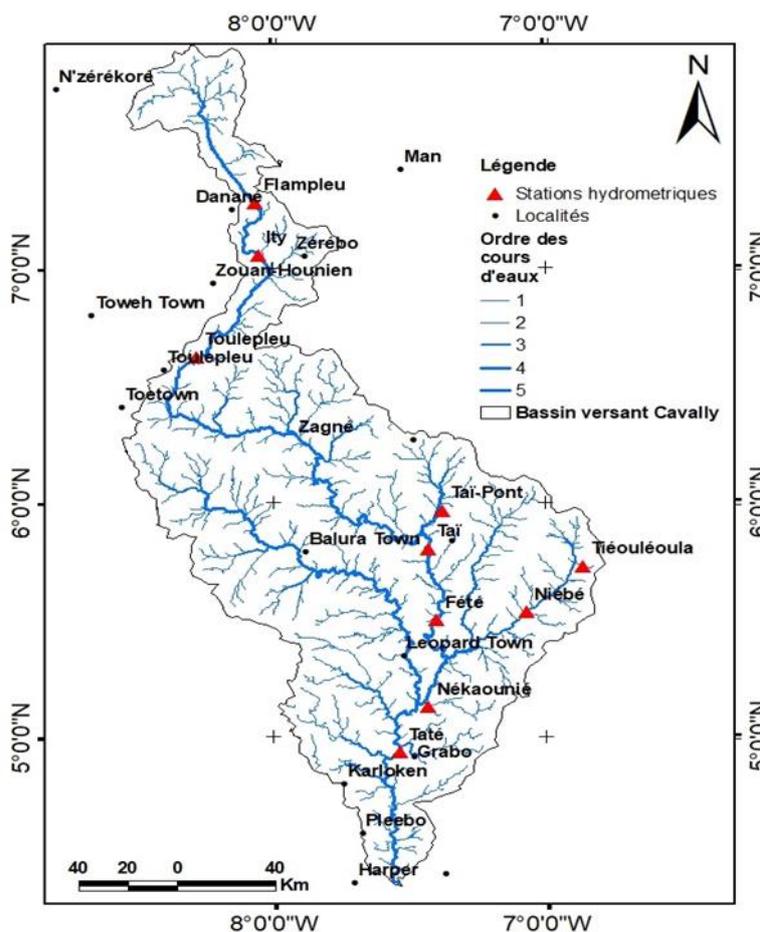


Fig. 2. Répartition spatiale des stations hydrométriques étudiées

3.2 MÉTHODES

3.2.1 DÉTERMINATION DE LA DURÉE CARACTÉRISTIQUE DES CRUES

La constitution de la série des débits maximaux instantanés (Q_{ix}) s'est faite en déterminant pour chaque série annuelle de débits journaliers le plus fort débit. La série des débits maximaux instantanés (Q_{ix}) ainsi obtenue a été soumise à plusieurs tests statistiques afin de déterminer la loi qui l'ajuste mieux. Ainsi, cet ajustement a permis d'obtenir, pour chaque station, le quantile de débit instantané maximal de période de retour de crue décennale Q_{ixA10} . Une fois les Q_{ixA10} obtenus, les durées caractéristiques d'écoulement D pour chaque sous bassin versant ont été estimées à l'aide de la méthode Socose du Cemagref. En effet, cette méthode permet de calculer pour chaque hydrogramme de crue donnée, la durée t_s correspondant à la durée pendant laquelle le débit est supérieur à la moitié du débit maximum instantané Q_s . Ainsi, on obtient pour chaque année, le couple de valeurs ($Q_s ; t_s$) correspondant aux débits maximums instantanés et aux durées t_s . Pour déterminer une durée

caractéristique D de crue, la méthode Socose propose que l'ensemble des couples (Q_s , t_s) obtenus pour les N plus fortes crues observées soient représentés sur un même graphe. Cette méthode consiste à définir plusieurs classes de Q_s , puis pour chaque classe, à calculer la durée d_s qui représente la médiane des valeurs de t_s dans la classe, et ensuite à tracer une courbe reliant ces différentes valeurs d_s . Enfin, la valeur de la durée caractéristique D, appelée durée de Socose, est lue sur cette courbe, pour un débit Q_s égal au débit instantané décennal, noté Q_{ixA10} [4].

Une fois la durée caractéristique estimée, il convient de déterminer l'intervalle de la durée de la crue. Plusieurs méthodes permettent de caractériser la durée de la crue. Si dans la méthode du Gradex, une seule durée voisine de 2D est utilisée, plusieurs autres travaux, notamment [13], [10] ont montré une certaine souplesse sur le choix de la durée d de l'intervalle $[D/2, 5 \text{ à } 6D]$. Cette dernière méthode a été utilisée pour caractériser la dynamique des crues en des durées choisies.

3.2.2 NOMS ET AFFILIATIONS DES AUTEURS CARACTERISATION DES CRUES

3.2.2.1 CONSTITUTION DES SÉRIES MAXAN ET SUPSEUIL ET DÉTERMINATION DES QUANTILES DE CRUE

Deux méthodes d'échantillonnage sont principalement utilisées par les hydrologues afin d'extraire d'une chronique des crues extrêmes. Il s'agit de l'échantillonnage par valeurs maximales annuelles (Maxan) et de l'échantillonnage par valeurs supérieures à un seuil (Supseuil).

L'échantillonnage par valeurs maximales annuelles [14] consiste à sélectionner pour chaque année de la série d'observation, le débit le plus fort. Une fois les N valeurs de durée d choisies dans l'intervalle $[D/2, 5 \text{ à } 6D]$, une nouvelle chronique de débits moyens VCd est obtenue en appliquant un filtre sur toute la série initiale de débits journaliers Q_t à l'aide de l'équation 1 :

$$VCd = \frac{1}{d} \int_{t_0}^{t_0+d} Q(t)dt \text{ (Equation 1)}$$

Dans la pratique, il s'agit de faire passer une moyenne mobile de fenêtre d ou de pas de temps glissant d choisi sur la série initiale de débit Q_t . Cette nouvelle chronique de débits moyens VCd représente en effet un volume qui transite sur une durée d dans un ouvrage hydraulique et qui est à maîtriser afin de prévenir les inondations. La constitution des séries Maxan se fait en sélectionnant pour chaque nouvelle chronique de débits moyens journaliers VCd, le débit journalier le plus élevé de chaque année hydrologique. Les valeurs sélectionnées en fonction de chaque durée d choisie forment une troisième série dite série des Maxan.

La mise en œuvre de la méthode Maxan est très simple. Le fait de ne sélectionner qu'un seul évènement par an, permet de s'assurer de l'indépendance entre les valeurs. Cependant, il est possible d'ignorer un certain nombre d'évènements pour des années où de nombreuses crues ont été enregistrées, et inversement de prendre en compte des évènements peu importants lors des années peu actives. L'homogénéité de l'échantillon n'est, donc, pas optimale [15].

L'échantillonnage par valeurs supérieures à un seuil (Supseuil) [16] consiste, quant à lui, à choisir un seuil, puis à sélectionner les pointes des évènements dépassant ce seuil (Figure 3).

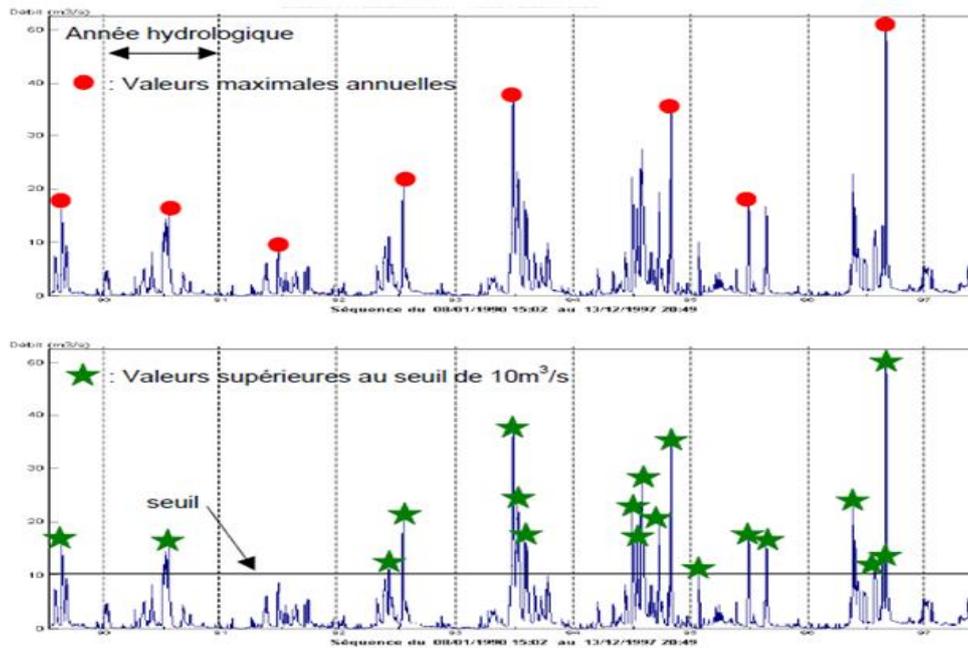


Fig. 3. Exemple d'un échantillonnage par maximum annuel et d'un échantillonnage par valeurs supérieures à un seuil effectué sur une chronique de débit instantané [4]

Les seuils dans cette étude ont été choisis de sorte à ce qu'on puisse sélectionner au maximum deux (2) pointes des évènements dépassant ce seuil. Après la constitution des séries par valeurs supérieures à un seuil, le filtre de l'équation 1 s'applique aux différents échantillons à divers pas de temps d . Cela permet de constituer de nouvelles séries dites séries des Supseuil.

Pour le cas particulier où $d = 0$ correspondant à l'échantillon de la chronique initiale de débit instantané, aucune transformation n'est effectuée.

3.2.3 ESTIMATION DES QUANTILES DE PÉRIODE DE RETOUR ET LEUR INTERVALLE DE CONFIANCE

L'estimation des quantiles de débits correspondant à des périodes de retour (T) donnée passe par les étapes suivantes ; les tests de vérification d'hypothèse, le choix de la loi d'ajustement, le choix de la méthode d'estimation des paramètres de la loi choisie, la vérification de l'adéquation de la loi aux données et enfin l'estimation des quantiles et leur intervalle de confiance.

- **Tests de vérification d'hypothèse statistiques de base**

Après la constitution des diverses séries de débits, chaque échantillon a été soumis à la vérification des hypothèses statistiques de base tels les tests d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité. Le test non paramétrique de Wald-Wolfowitz [18] qui permet de tester l'existence d'une autocorrélation dans les séries de données a été appliqué, de même que le test de Wilcoxon pour vérifier l'homogénéité des données. Enfin, le test de Mann-Kendall [11], [19] a été utilisé en vue de détecter de potentielles tendances dans les séries hydrologiques et par conséquent d'apprécier la stationnarité de celles-ci.

- **Choix de la loi statistique d'adéquation**

Une fois la vérification des hypothèses statistiques de base effectuée, les différents échantillons ont été soumis à l'ajustement par diverses lois statistiques que sont :

- ✓ Lois de distribution à variations régulières : Fréchet (EV2), Halphen B Inverse (HIB), Log-Pearson type 3 (LP3), Gamma Inverse (GI) ;
- ✓ Lois de distributions sub-exponentielles : Halphen type A (HA), Halphen type B (HB), Gumbel (EV1), Pearson type 3 (P3), Gamma (G) ;
- ✓ Loi exponentielle.

De nombreuses études portant sur sur l'estimation des valeurs extrêmes ont montré que les lois de Gumbel, GEV (General Extreme Value) et de Weibull sont couramment utilisées en hydrologie. Elles ont été, a priori, retenues pour cette étude. Les fonctions de répartition, de densité ainsi que les domaines de validités de ces modèles statistiques sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Fonctions de densité de probabilité et de répartition des modèles statistiques retenus

Loi	Domaine (D)	Fonction de densité de probabilité	Fonction de répartition (Fx)
General extreme value (VEG)	$x > u + \alpha/k$, si $k < 0$ $x > u + \alpha/k$, si $k > 0$	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x - \mu) \right]^{\frac{1}{k}-1} \exp\left\{ - \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x - \mu) \right]^{1/k} \right\}$	$f(x) = \exp\left\{ - \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x - \mu) \right]^{1/k} \right\}$
Gumbel	$-\infty < x < +\infty$	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-\mu}{\alpha} - \exp\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right) \right]$	$f(x) = \exp\left\{ \left[-\exp\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right) \right] \right\}$
Weibull	$x > 0$	$f(x) = \frac{k}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^k \right]$	$f(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^k \right]$

• **Choix de la méthode d'estimation des paramètres de la loi choisie**

Lorsque la classe de loi est trouvée, les paramètres des lois retenues doivent être estimés et cela est possible grâce à plusieurs méthodes qui sont le maximum de vraisemblable, la méthode des moments, la méthode des moments de probabilités pondérés (PWM) et la méthode des L-moments (LM). La méthode des moments est une approche « naturelle » et simple. Elle produit généralement des estimateurs de bonne qualité que la méthode du maximum de vraisemblance [20]. Elle donne beaucoup de poids aux valeurs extrêmes. Cette dernière a donc été retenue pour cette étude.

• **Contrôle de l'ajustement et validation du modèle statistique**

De nombreuses techniques existent pour comparer différentes méthodes d'analyse des lois de probabilité afin d'en choisir la meilleure. C'est le test d'adéquation du χ^2 qui a été utilisé dans cette étude. Cependant, dans la plupart des cas, il est possible de trouver plusieurs lois de probabilité s'ajustant plus ou moins correctement à la série des données. Dans ce contexte, pour comparer les ajustements des lois de probabilité et de sélectionner celle qui s'ajuste mieux aux données, le recours à la comparaison graphique et surtout aux critères de comparaisons numériques est courant. Ainsi, en plus de la comparaison graphique, une comparaison numérique à partir des critères d'informations d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC) ont été utilisés comme dans de nombreuses études [21], [22], [23]. Ces critères pénalisent les modèles comportant trop de variables et évitent le sur-apprentissage. Les équations 2 et 3 en résumant les calculs.

$$AIC = (f, x_1, x_2, \dots, x_n) = -2 \ln L(\hat{\theta}, x_1, x_2, \dots, x_n) + 2K \text{ (Equation 2)}$$

$$BIC = (f, x_1, x_2, \dots, x_n) = -2 \ln L(\hat{\theta}, x_1, x_2, \dots, x_n) + 2K \ln n \text{ (Equation 3)}$$

K : le nombre de paramètres de la loi de probabilité

L : la vraisemblance de l'échantillon ;

$K \ln n$: le terme de pénalité

La meilleure loi d'ajustement de l'échantillon est la loi qui a les plus petits AIC et BIC [24].

• **Estimation des quantiles et intervalles de confiance**

Le terme quantile permet d'associer à une valeur particulière de la variable hydrologique étudiée, une période de retour T exprimée en année(s). Le sigle VCXdT représente donc le quantile de débit moyen (volume) caractéristique sur une durée

continue d, maximal dans la saison, de période de retour T. Le logiciel HYFRAN-PLUS permet de déterminer les quantiles ainsi que leurs différentes périodes de retour.

3.2.4 MODELISATION DES INTENSITÉS DES DÉBITS DE CRUES

Les différents quantiles de débits moyens VCXdT estimées vont servir à la modélisation des intensités de débits maximaux par la construction des courbes débits-durée-fréquence QdF aux différentes stations hydrométriques du bassin versant du Cavally. Ces courbes sont des représentations graphiques semi-logarithmiques sur lesquelles les quantiles de débits moyens VCXdT sont portés en ordonnée (échelle linéaire) et les périodes de retour T en abscisses (échelle logarithmique). Une fois les courbes QdF construites, il convient de déterminer leurs domaines de validité.

Le domaine de validité des courbes QdF locales obtenues se détermine à l'aide du modèle QdF de type bassin de référence qui permet de traduire sous forme synthétique et opérationnelle la grande variabilité spatio-temporelle des débits VCXdT d'un bassin versant observé ou non [25]. Il permet de prédéterminer les quantiles de crues en VCXdT d'un bassin versant de superficie très variable, connaissant les paramètres locaux D et QIXA10.

Les trois (3) modèles régionaux de type bassin de référence qui ont été développés par le CEMAGREF [26] sont le modèle « Vandenesse » représentatif du climat océanique ; le modèle « Florac » représentatif du climat méditerranéen et enfin le modèle « Soyans » qui lui représente une région sous l'influence continentale (Tableau 1).

Pour la suite de ce travail seuls les modèles de Vandenesse et de Soyans ont été appliqués car représentatifs du climat de la Côte d'Ivoire.

Ces modèles permettent d'estimer les quantiles VCXdT d'un site quelconque, observé ou non et calculés à l'aide des équations suivantes :

- Pour $0,5 \leq T(an) \leq 20$: généralisation d'une loi exponentielle à deux (2) paramètres adaptés aux valeurs extrêmes :

$$VCXdT = Aq \left(\frac{d}{D} \right) \cdot \ln T + B \left(\frac{d}{D} \right) \quad (Equation 4)$$

- Pour $20 < T(an) \leq 1000$: généralisation de la forme d'extrapolation par le des pluies maximales :

$$VCXdT = VCX10T + Aq \left(\frac{d}{D} \right) \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{Aq \left(\frac{d}{D} \right)}{Ap \left(\frac{d}{D} \right)} \right) \cdot \left(\frac{T - 10}{10} \right) \right] \quad (Equation 5)$$

Avec VCX10T : quantile décennal du débit moyen obtenu par l'équation 4 ;

Aq : gradex des débits obtenus à partir de :

$$\frac{Aq}{QIXA10} = \frac{1}{x1 \left(\frac{d}{D} \right) + x2} + x3 \quad (Equation 6)$$

Ap : gradex des pluies obtenues à partir de :

$$\frac{Ap}{QIXA10} = \frac{1}{x7 \left(\frac{d}{D} \right) + x8} + x9 \quad (Equation 7)$$

B : paramètre de position de la loi exponentielle :

$$\frac{B}{QIXA10} = \frac{1}{x4 \left(\frac{d}{D} \right) + x5} + x6 \quad (Equation 8)$$

Les valeurs de x1 à x2 selon qu'il s'agisse de Vandenesse, Florac et Soyans sont résumées dans le tableau 2 :

Tableau 2. Paramètres des différents modèles Vandenesse, Florac et Soyans

Paramètres	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
Vandenesse	2,635	6,19	0,016	1,045	2,385	0,172	1,083	1,75	0,00
Florac	1,120	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

Du fait des paramètres Aq, Ap et B les courbes résultats peuvent être utilisées sur d'autres bassins versants hydrologiquement semblables. La courbe QdF des modèles bassins de référence est une représentation graphique des débits moyens générés par les modèles régionaux en fonction d'une période de retour (T) donnée et d'une durée d.

Afin de comparer les deux méthodes d'échantillonnage, chaque valeur de VCXdT des modèles de référence a été prise comme valeur pour le calage et celle des méthodes maxan et supseuil a été utilisée pour la validation.

Une fois la meilleure méthode d'échantillonnage déterminée, ses valeurs sont toujours conservées pour la validation et celle des méthodes bassins de référence pour le calage. La comparaison des courbes QdF locales et celles des bassins de référence se fait en se basant sur des critères graphique et numérique.

• Critère graphique

Le choix du modèle est déterminé par la position des courbes QdF locales de la méthode d'échantillonnage retenue par rapport à celles des bassins versant de référence. Entre les quantiles VCXdT estimés localement par la distribution d'une loi de probabiliste et les VCXdT issus du modèle QdF de type bassin de référence, l'illustration graphique pour comparer ces quantiles permet dans un premier temps de localiser le bassin versant étudié pour telle ou telle période de retour par rapport aux bassins de référence [10]. Chaque modèle QdF de référence se présente sous la forme d'une famille de courbes adimensionnelles.

• Critère numérique : critère de Nash

Les performances des différentes méthodes d'échantillonnage et des différents modèles de référence appliqués sont comparées en utilisant le critère de Nash [27]. Ce dernier est calculé pour chaque méthode d'échantillonnage et pour chaque modèle appliqué. Il peut varier de - ∞ à 1. La valeur optimale est 1 (calage parfait). Une valeur supérieure à 0,7 est habituellement considérée comme satisfaisante. Ce critère est exprimé comme suit :

$$Nash(T) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{dmax} (VCXiT - VCXiT^{modèle})^2}{\sum_{i=dmin}^{dmax} (VCXiT - VCXiT_{moyen})^2} \text{ (Equation 9)}$$

$$VCXiT_{moyen} = \frac{\sum_{i=dmin}^{dmax} VCXiT}{1 + dmax - dmin} \text{ (Equation 10)}$$

VCXiT : quantiles estimés à partir de données réelles ;

VCXiTmodèle : quantiles issus de modèles QdF de type bassin de référence.

4 RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 RÉSULTATS DES TESTS STATISTIQUES APPLIQUES AUX SÉRIES DE L'ÉTUDE

4.1.1 ANALYSE DES DURÉES CARACTÉRISTIQUES

Les durées caractéristiques des crues correspondant aux différentes stations varient de deux (02) à huit (08) jours avec des intervalles d'évacuation des crues allant généralement de 01 à 40 jours. Les intervalles les plus courts (entre 1 et 10 jours) ont été observés à Nékaouni sur l'affluent Neka et Tiéouléoula tandis que les plus élevés (4 à 40 jours) ont été enregistrés sur le Cavally à Fété et à Toulepleu (Tableau 3). Ainsi, les crues durent plus dans les sous-bassins ayant pour exutoire à Fété, Ity,

Toulepleu et Taï. Cependant, à Nékaounié et Tiéouléoula, les crues sont rapidement évacuées au bout de 2 jours ; sans doute à cause du fait que ces stations sont situées sur de petits affluents.

Tableau 3. Tableau récapitulatif des durées caractéristiques D et des pas de temps choisis

Stations	D (jour)	Intervalle d (jour)
Fété	8	[4 - 40]
Flampléu	5	[2 - 25]
Ity	6	[3 - 30]
Taï-pont	4	[2 - 20]
Taté	4	[2 - 20]
Toulepleu	8	[4 - 40]
Niébé	6	[3 - 30]
Nékaounié	2	[1 - 10]
Tiéouléoula	2	[1 - 10]
Taï	6	[3 - 30]

4.1.2 RÉSULTATS DES TESTS STATISTIQUES APPLIQUÉS AUX SÉRIES MAXAN ET SUPSEUIL

Les débits moyens VCX ont été échantillonnés pour chacune des méthodes de maximums annuels (maxan) et de valeurs supérieures à un seuil (supseuil) sur des séries lissées pour chaque durée d. Le lissage est dû au passage des moyennes mobiles au pas de temps d sur les valeurs de débits instantanés. Les durées d choisies sont consignées dans le tableau 4.

ANALYSE DES TENDANCES SUR LES SÉRIES DE DÉBITS MAXAN ET SUPSEUIL

Les trois tests non paramétriques appliqués sur les débits moyens VCX échantillonnés par les méthodes maxan et supseuil pour chaque durée d montrent que ces débits respectent les conditions d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité avec un niveau de significativité de 5%. Ces résultats témoignent de l'absence de tendance, de rupture d'homogénéité ou de corrélation dans les différentes séries de débits. Cependant, pour la station de Tiéouléoula, la stationnarité a été rejetée avec un seuil de significativité de 1% aussi bien pour les débits maxan que les supseuil.

ANALYSE FRÉQUENTIELLE DE LA PÉRIODE DE RETOUR DES CRUES

Pour les séries maxan, les débits moyens VCX pour chaque durée d des stations de Fété, Flampléu, Taté, Niébé et Nekaounié ont été ajustées à la loi de Weibull alors que la station d'Ity a été ajustée à la loi GEV. L'ajustement des paramètres a été réalisé par la méthode des moments. En outre les séries des stations de Taï-pont, Toulepleu, Tiéouléoula et Taï ont été ajustées respectivement par un mélange de lois Gumbel et Gamma ; Weibull et GEV ; Gumbel et Gamma et Weibull (Tableau 4). S'agissant des séries supseuil, les débits moyens VCX pour chaque durée d des stations de Toulepleu, Taté, Niébé, Nékaounié, Tiéouléoula et Taï ont été ajustées respectivement par les lois Weibull, Gumbel, Gamma, Gumbel, Pearson Type 3 et Gumbel. Cependant, les résultats montrent qu'un mélange des lois Weibull et Gamma ajustent les séries des stations de Fété, Flampléu et Ity. Celles de Taï-pont sont ajustées par les lois Pearson Type 3 et Gumbel (Tableau 4). Les différents seuils sont consignés dans le tableau 5.

Tableau 4. Meilleures lois d'ajustement des séries maxan et supseuil

Stations	Lois d'ajustement	
	Séries des <i>maxan</i>	Série des <i>supseuil</i>
Fété	Weibull	Weibull; Gamma
Flampleu	Weibull	Weibull; Gamma
Ity	GEV	Weibull; Gamma
Taï-pont	Gumbel; Gamma	Gumbel; Pearson Type 3
Taté	Weibull	Gumbel
Toulepleu	Weibull; GEV	Weibull
Niébé	Weibull	Gamma
Nékaoulié	Weibull	Gumbel
Tiéouléoula	Gumbel; Gamma	Pearson Type 3
Taï	Weibull; Gamma	Gumbel

Tableau 5. Seuils d'échantillonnage des VCX de chaque station du bassin versant de Cavally

Nom de station	Seuil min (m ³ /s)	Seuil max (m ³ /s)
Fété	300	600
Flampleu	40	70
Ity	70	100
Taï-pont	30	50
Taté	400	800
Toulepleu	50	90
Niébé	50	100
Nékaoulié	10	20
Tiéouléoula	5	7
Taï	200	300

4.2 ESTIMATION DES QUANTILES ET LEURS INTERVALLES DE CONFIANCE

Les quantiles de crues ont été élaborés sur la base des séries maxan et supseuil correspondant aux dix (10) stations hydrométriques.

o Pour la série Maxan

Les quantiles de débits moyens pour les différentes durées d et de période de retour T traduisent le débit, la durée et la fréquence (QdF) issus de l'analyse fréquentielle des différents échantillons de la série maxan. Cette analyse fréquentielle permet d'estimer pour une durée d donnée, les débits de crue ayant une probabilité de survenir dans le bassin versant. Les résultats sont indiqués dans les tableaux 6 et 7. L'analyse de ces tableaux montrent que :

- À l'exutoire de Flampleu, sous un climat montagneux, les débits instantanés allant de 200 à 231 m³/s ont une probabilité sur deux de se produire. Ceux d'une durée de 5 jours, 10 jours et 25 jours et variant respectivement de 178 à 213 ; 155 à 188 et 130 à 158 m³/s ont aussi une chance sur deux de se produire. De même, ceux qui ont une chance sur dix de se produire, varient de 263 à 315 ; 248 à 291 ; 222 à 262 et 186 à 219 m³/s avec respectivement des durées d de 0 ; 5 ; 10 et 25 jours. Enfin, les débits de crue qui ont une chance sur cinquante de se produire avec des durées respectives de 0 ; 5 ; 10 et 25 jours oscillent entre 301 et 378 ; 279 et 343 ; 252 et 310 ; 212 et 259 m³/s.
- À l'exutoire de Fété, les débits de crue ayant une probabilité sur deux de survenir ont une valeur comprise entre 1580 et 1980 m³/s pour une durée inférieure à 1 jour (débits instantanés), entre 1470 et 1760 m³/s pour $d = 5$ jours, entre 1380 et 1650 m³/s pour $d = 10$ jours et entre 1170 et 1420 m³/s pour $d = 30$ jours. Les débits de crues décennales varient entre 2200 et 2680 m³/s pour une durée inférieure à 1 jour, entre 1990 et 2370 m³/s pour $d = 5$ jours, entre 1870 et 2200 m³/s pour $d = 10$ jours et entre 1650 et 1920 m³/s pour $d = 30$ jours. En outre, les débits de crues de période de retour ≥ 50 ans sont situés entre 2600 et 3270 m³/s pour une durée inférieure à 1 jour, entre 2320 et 2870 m³/s pour $d = 5$ jours, entre 2170 et 2650 m³/s pour $d = 10$ jours et entre 1960 et 2340 m³/s.

- À l'exutoire de Taté, sous le climat subéquatorial de transition, les débits instantanés compris entre 1650 et 1950 ont une chance sur deux de se produire. Les crues d'une durée d égale à 5 ; 10 et 20 jours et ayant des valeurs respectives comprises entre 1410 et 1790 ; 1290 et 1660 et 1160 et 1510 m³/s ont également une chance sur deux de se produire. Les débits de crue décennale pouvant durer 5 ; 10 et 20 jours sont compris respectivement entre 2220 et 2720 ; 2150 et 2600 ; 2000 et 2470 et 1840 et 2300 m³/s. Quant aux débits de crue ayant une chance de survenir une fois sur cinquante, ils varient de 2570 à 3320 ; 2480 à 3170 ; 2330 à 3030 et 2180 à 2840 m³/s. Ces crues peuvent durer respectivement moins d'un jour, 5 ; 10 et 20 jours.

Les quantiles de crue les plus faibles ont été estimés à Nékaounié et Tiéouléoula respectivement sur les affluents Néka et Odrenisrou avec parfois des valeurs inférieures à 100 m³/s. Dans le même temps, les plus forts quantiles ont été estimés sur le Cavally à Fété au centre et Taté au sud de la zone d'étude.

○ ***Pour la série Supseuil***

L'analyse fréquentielle réalisée sur la série des débits supseuil a permis d'estimer les quantiles de crues pour différentes périodes de retour (2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 50 ; 100 ; 200 et 1000 ans). Les quantiles ainsi estimés et les intervalles de confiance qui permettent d'évaluer l'incertitude associée sont consignés dans les tableaux 8 et 9.

L'analyse de ces tableaux révèle que :

- À l'exutoire de Flampleu que les débits de crue ayant une chance sur deux de se produire sont compris entre 173 et 203 ; 151 et 181 ; 132 et 155 m³/s. Les durées de ces crues sont respectivement de 5 ; 10 et 25 jours. Les débits de crues pouvant se produire une fois sur 10 varient entre 237 et 279 ; 216 et 254 ; 181 et 220 m³/s avec des durées respectives de 5 ; 10 et 25 jours. Ceux pouvant se produire une fois sur 50 avec des durées d de 5 ; 10 et 25 jours sont compris respectivement entre 276 et 331 ; 248 et 300 ; 212 et 270 m³/s.
- À l'exutoire de Fété, les débits de crue allant de 1260 à 1500 ; 1190 à 1420 ; 1090 à 1320 m³/s ont une probabilité sur deux de se produire avec des durées d de 5 ; 10, et 30 jours. De même, ceux qui ont une chance sur dix de se produire varient entre 1860 et 2300 m³/s (pour $d = 5$), 1740 et 2140 m³/s (pour $d = 10$), 1590 et 1870 m³/s (pour $d = 30$). Enfin, les débits de crue qui ont une chance sur cinquante de se produire oscillent entre 2260 et 2930 ; 2100 et 2710 ; 1860 et 2200 m³/s respectivement pour d égale à 5 ; 10 et 30 jours.
- À l'exutoire de Taté, les débits de crue compris entre 1330 et 1540 ; 1210 et 1430 ; 1140 et 1380 m³/s et pouvant durer respectivement 5 ; 10 et 20 jours ont une chance sur deux de se produire tandis que les débits de crue décennale varient entre 1900 et 2390 (pour $d = 5$) ; 1780 et 2280 (pour $d = 10$), 1670 et 2220 m³/s (pour $d = 20$). Quant aux débits cinquantennaires, ils varient entre 2380 et 3160 ; 2250 et 3060 et 2110 et 2990 m³/s pour des crues durant 5 ; 10 et 20 jours.

Tableau 6. Quantiles de crues des débits moyens (VCXdT) pour la série maxan des stations de Feté, Flampeu et Ity

Durée d (jours)	Quantiles V(d,t) en m³/s								
	Période de retour T (ans)								
	2	3	5	10	20	50	100	200	1000
Cavally à Fete									
d = 0 jour	1780	2010	2220	2440	2620	2810	2940	3050	3270
	1580 - 1980	1800 - 2210	2010 - 2440	2200 - 2680	2350 - 2890	2500 - 3120	2600 - 3270	2690 - 3410	2850 - 3690
d = 5 jours	1610	1810	1990	2180	2330	2490	2590	2690	2870
	1470 - 1760	1660 - 1960	1830 - 2160	1990 - 2370	2110 - 2550	2240 - 2740	2320 - 2870	2390 - 2980	2530 - 3220
d =10 jours	1510	1690	1860	2030	2170	2310	2410	2490	2660
	1380 - 1650	1560 - 1830	1720 - 2010	1870 - 2200	1980 - 2360	2100 - 2530	2170 - 2650	2230 - 2750	2360 - 2970
d =15 jours	1440	1620	1780	1950	2080	2230	2320	2400	2570
	1320 - 1570	1490 - 1750	1650 - 1920	1790 - 2110	1910 - 2260	2020 - 2430	2090 - 2550	2150 - 2650	2270 - 2860
d =20 jours	1390	1560	1720	1890	2020	2170	2260	2350	2510
	1260 - 1520	1440 - 1690	1590 - 1860	1740 - 2040	1860 - 2190	1970 - 2360	2050 - 2480	2110 - 2580	2230 - 2790
d =25 jours	1330	1500	1660	1830	1960	2100	2190	2280	2440
	1210 - 1460	1380 - 1630	1540 - 1790	1690 - 1970	1800 - 2110	1920 - 2280	1990 - 2390	2060 - 2490	2180 - 2700
d =30 jours	1290	1460	1620	1790	1920	2060	2150	2240	2400
	1170 - 1420	1340 - 1590	1500 - 1750	1650 - 1920	1770 - 2070	1890 - 2230	1960 - 2340	2030 - 2450	2150 - 2650
Cavally à Flampeu									
d = 0 jour	216	239	262	289	312	340	359	377	417
	200 - 231	221 - 257	241 - 283	263 - 315	281 - 344	301 - 378	316 - 403	329 - 426	357 - 477
d = 5 jours	195	221	245	269	289	311	324	337	362
	178 - 213	204 - 238	227 - 263	248 - 291	263 - 315	279 - 343	288 - 361	296 - 377	313 - 411
d =10 jours	172	196	218	242	261	281	294	306	331
	155 - 188	180 - 212	201 - 235	222 - 262	237 - 284	252 - 310	262 - 327	271 - 342	287 - 374
d =15 jours	159	182	204	227	245	265	278	290	314
	143 - 175	167 - 197	188 - 220	208 - 245	223 - 266	239 - 291	249 - 307	258 - 322	274 - 353
d =20 jours	151	172	192	213	229	248	259	270	291
	136 - 166	158 - 186	178 - 207	196 - 230	210 - 249	224 - 272	233 - 286	240 - 300	255 - 328
d =25 jours	144	164	183	203	218	236	247	257	277
	130 - 158	151 - 178	169 - 197	186 - 219	199 - 238	212 - 259	220 - 273	228 - 286	241 - 312
Cavally à Ity									
d = 0 jour	240	271	295	316	329	339	344	347	351
	203 - 278	239 - 302	268 - 322	288 - 343	294 - 364	N/D	N/D	N/D	N/D
d = 5 jours	242	272	295	315	327	336	341	343	347
	205 - 279	241 - 302	270 - 320	289 - 341	293 - 361	N/D	N/D	N/D	N/D
d =10 jours	237	267	290	309	321	330	334	336	339
	201 - 273	237 - 297	265 - 314	283 - 335	287 - 354	N/D	N/D	N/D	N/D
d =15 jours	232	261	284	303	315	324	328	331	334
	196 - 267	231 - 290	259 - 308	277 - 328	281 - 348	N/D	N/D	N/D	N/D
d =20 jours	226	254	277	296	308	317	322	325	328
	191 - 260	225 - 284	253 - 301	271 - 322	275 - 341	N/D	N/D	N/D	N/D
d =25 jours	220	248	270	289	300	309	313	316	319
	186 - 254	219 - 276	246 - 293	264 - 313	268 - 332	N/D	N/D	N/D	N/D
d =30 jours	215	242	263	281	293	301	305	308	311
	182 - 248	214 - 269	240 - 286	258 - 305	262 - 323	N/D	N/D	N/D	N/D

Tableau 7. Quantiles (VCXdt) pour la série maxan des stations de Taï-pond, Taté, Toulepleu, Niébé, Nekaounié, Tiéouloula et Taï

Durée d (jours)	Quantiles V(d,t) en m³/s								
	Période de retour T (ans)								
	2	3	5	10	20	50	100	200	1000
N'Se à Taï									
d = 0 jour	120	144	170	202	233	274	304	335	405
d = 5 jours	105-135	125-163	144-195	168-236	190-276	219-329	240-368	262-408	310-409
d = 10 jours	84,2-107	100-129	117-155	137-188	155-220	180-262	198-294	215-325	257-398
d = 15 jours	89,6	109	130	154	177	205	225	245	288
d = 20 jours	73,3-95,0	90,3-116	106-139	125-169	141-197	161-232	174-257	187-282	215-338
Cavally à Tate									
d = 0 jour	1800	2010	2220	2470	2690	2950	3130	3300	3670
d = 5 jours	1600	1860	2110	2370	2590	2820	2980	3120	3400
d = 10 jours	1480	1730	1970	2230	2440	2680	2830	2970	3260
d = 15 jours	1390	1640	1880	2130	2340	2580	2730	2870	3150
d = 20 jours	1160-1510	1410-1760	1630-2010	1840-2300	2010-2550	2180-2840	2290-3040	2380-3220	2560-3610
Cavally à Toulepleu									
d = 0 jour	238	272	303	336	362	391	410	426	460
d = 5 jours	207-269	242-301	270-336	294-377	311-413	327-455	337-483	345-508	360-560
d = 10 jours	199-258	236-292	268-327	297-369	318-405	340-446	353-475	364-500	386-554
d = 15 jours	227	261	292	322	344	365	376	385	399
d = 20 jours	192-251	226-284	256-313	285-344	302-370	314-401	317-421	318-438	N/D
d = 25 jours	187-244	220-276	249-304	277-334	294-359	305-389	308-408	309-424	N/D
d = 30 jours	182-237	214-267	242-294	268-322	284-345	294-373	296-390	297-405	N/D

Durée d (jours)	Quantiles V(d,t) en m³/s								
	Période de retour T (ans)								
	2	3	5	10	20	50	100	200	1000
Hama à Niébé									
d = 0 jour	320	363	404	447	481	518	542	563	606
d = 5 jours	283-356	325-401	361-448	394-500	418-543	442-593	457-626	470-656	496-717
d = 10 jours	214-273	255-309	291-346	325-388	350-425	375-468	391-498	404-525	430-580
d = 15 jours	191-245	228-276	261-308	291-345	313-379	335-417	349-443	361-467	383-517
d = 20 jours	177-226	211-254	241-283	269-317	289-347	309-382	321-406	332-428	352-474
d = 25 jours	173-221	203-247	229-269	251-292	263-311	270-332	271-344	N/D	N/D
d = 30 jours	158-202	188-228	215-254	241-285	259-312	278-344	289-365	299-385	318-425
Neka à Nekaounie									
d = 0 jour	55,7	62,5	70,1	79,6	88,7	101	109	118	139
d = 5 jours	49,5-62,0	54,6-70,4	59,6-80,6	65,4-93,8	70,8-107	77,6-123	82,7-136	87,7-149	99,3-178
d = 10 jours	31,3	35,7	39,9	44,2	47,7	51,6	54	56,3	60,7
d = 15 jours	27,7-34,9	32,5-39,0	36,6-43,2	40,6-47,9	43,5-52,0	46,4-56,7	48,2-59,9	49,7-62,8	52,7-68,8
Otremisrou à Tiéouloula									
d = 0 jour	17,4	18,9	20,4	21,8	22,9	24,1	24,8	25,5	26,8
d = 5 jours	15,8-18,9	17,4-20,4	18,8-21,9	20,1-23,5	21,0-24,8	21,9-26,3	22,5-27,2	22,9-28,1	23,8-29,8
d = 10 jours	12,1	14,5	17,2	20,6	23,9	28,1	31,2	34,4	41,6
d = 15 jours	9,57	12,1	14,8	18,2	21,3	25,2	28	30,8	37
d = 20 jours	7,81-11,3	10,0-14,3	12,1-17,6	14,4-22,0	16,5-26,2	18,9-31,6	20,6-35,5	22,2-39,4	25,7-48,2
Cavally à Taï									
d = 0 jour	754	865	968	1080	1160	1260	1320	1380	1490
d = 5 jours	680-828	786-943	877-1060	964-1190	1030-1300	1100-1420	1140-1510	1180-1580	1250-1740
d = 10 jours	559-680	652-794	735-910	817-1040	880-1150	948-1270	990-1350	1030-1430	1100-1580
d = 15 jours	509-624	600-735	686-851	783-998	866-1130	965-1300	1030-1420	1100-1540	1240-1800
d = 20 jours	487-599	575-706	658-819	752-962	834-1090	930-1260	997-1370	1060-1490	1200-1740
d = 25 jours	471-578	555-681	635-789	725-926	803-1050	895-1210	959-1320	1020-1430	1150-1670
d = 30 jours	458-561	540-660	616-765	704-897	779-1020	867-1170	929-1280	988-1380	1110-1610

Tableau 8. Quantiles de crues des débits moyens (VCXdT) pour la série supseuil de la station de Feté, Flampleu et Ity

Durée d (jours)	Quantiles V(d,t) en m ³ /s								
	Période de retour T (ans)								
	2	3	5	10	20	50	100	200	1000
Cavally à Fete									
d = 0 jour	1510	1740	1970	2240	2480	2780	2980	3180	3620
	1380 - 1630	1590 - 1880	1790 - 2140	2020 - 2470	2210 - 2760	2430 - 3120	2590 - 3380	2740 - 3630	3060 - 4170
d = 5 jours	1380	1600	1820	2080	2310	2600	2800	2990	3410
	1260 - 1500	1460 - 1740	1650 - 1990	1860 - 2300	2050 - 2580	2260 - 2930	2420 - 3180	2560 - 3420	2860 - 3950
d =10 jours	1310	1510	1700	1940	2150	2410	2590	2760	3130
	1190 - 1420	1380 - 1630	1550 - 1860	1740 - 2140	1910 - 2400	2100 - 2710	2240 - 2940	2360 - 3150	2640 - 3630
d =15 jours	1270	1460	1650	1870	2070	2310	2480	2640	3000
	1160 - 1380	1340 - 1590	1500 - 1800	1680 - 2070	1840 - 2310	2020 - 2610	2140 - 2820	2260 - 3020	2520 - 3470
d =20 jours	1240	1420	1610	1820	2020	2250	2420	2570	2920
	1130 - 1350	1300 - 1550	1450 - 1760	1630 - 2020	1780 - 2260	1960 - 2550	2080 - 2750	2190 - 2950	2440 - 3400
d =25 jours	1230	1410	1580	1760	1900	2060	2160	2260	2440
	1120 - 1350	1290 - 1530	1460 - 1710	1620 - 1900	1750 - 2060	1880 - 2240	1970 - 2360	2040 - 2470	2190 - 2690
d =30 jours	1210	1390	1560	1730	1870	2030	2130	2220	2410
	1090 - 1320	1270 - 1510	1430 - 1680	1590 - 1870	1720 - 2030	1860 - 2200	1940 - 2320	2020 - 2430	2170 - 2650
Cavally à Flampleu									
d = 0 jour	188	217	245	279	309	345	371	395	449
	173 - 203	199 - 234	224 - 266	252 - 305	276 - 342	304 - 386	324 - 417	343 - 448	383 - 515
d = 5 jours	179	206	231	258	280	303	319	333	361
	163 - 195	189 - 222	213 - 249	237 - 279	256 - 303	276 - 331	288 - 350	299 - 366	321 - 400
d =10 jours	166	190	212	235	254	274	287	299	323
	151 - 181	174 - 205	195 - 229	216 - 254	231 - 276	248 - 300	259 - 316	268 - 330	287 - 359
d =15 jours	154	176	198	224	247	274	294	312	352
	141 - 167	161 - 191	179 - 216	200 - 247	218 - 275	238 - 310	253 - 334	266 - 358	295 - 410
d =20 jours	150	169	188	210	230	253	270	285	319
	138 - 162	156 - 183	172 - 205	190 - 231	205 - 255	223 - 284	235 - 305	246 - 325	271 - 368
d =25 jours	143	161	179	200	219	241	257	272	304
	132 - 155	148 - 174	164 - 195	181 - 220	195 - 243	212 - 270	224 - 290	234 - 309	258 - 350
Cavally à Ity									
d = 0 jour	207	240	272	311	346	388	418	446	508
	182 - 233	210 - 270	236 - 309	265 - 358	289 - 403	317 - 459	336 - 500	354 - 538	392 - 625
d = 5 jours	202	234	267	306	340	382	412	440	503
	176 - 227	205 - 264	231 - 303	259 - 352	283 - 397	311 - 453	330 - 494	348 - 533	386 - 619
d =10 jours	214	245	274	304	329	355	373	388	419
	186 - 242	218 - 273	246 - 302	275 - 334	297 - 360	320 - 391	334 - 411	347 - 430	371 - 468
d =15 jours	218	246	272	300	321	345	360	374	401
	191 - 244	220 - 272	246 - 299	271 - 328	290 - 352	311 - 379	323 - 397	334 - 413	356 - 446
d =20 jours	215	241	266	296	322	353	375	395	440
	192 - 239	215 - 268	235 - 298	256 - 336	274 - 370	294 - 412	307 - 442	320 - 470	346 - 533
d =25 jours	209	235	259	288	314	344	366	386	430
	186 - 232	208 - 261	228 - 291	249 - 328	267 - 361	286 - 403	300 - 432	312 - 460	338 - 522
d =30 jours	205	229	253	281	306	335	355	374	416
	183 - 227	204 - 254	223 - 283	243 - 319	260 - 351	279 - 390	292 - 418	304 - 445	329 - 504

Tableau 9. Quantiles (VCXdT) pour la série supseuil des stations de Taï-pont, Taté, Toulepleu, Niébé, Nekaounié, Tiéouléoula et Tai

Durée d (jours)	Quantiles V(d,t) en m³/s									
	Période de retour T (ans)									
	2	3	5	10	20	50	100	200	1000	
Hana à Niébé										
d = 0 jour	261	304	347	398	444	499	539	576	659	
d = 5 jours	239	277	315	361	401	450	484	518	590	
d = 10 jours	211	247	282	325	363	409	442	473	543	
d = 15 jours	191	231	268	310	348	393	420	447	517	
d = 20 jours	180	216	253	295	332	366	393	420	490	
d = 25 jours	170	203	239	281	318	352	379	406	476	
d = 30 jours	163	194	229	271	308	342	369	396	466	
Neka à Nekaounié										
d = 0 jour	53.1	60.4	67.5	76	83.4	92.4	98.7	105	118	
d = 5 jours	35	39.5	44.5	50.8	56.9	64.7	70.5	76.4	89.9	
d = 10 jours	29.5	32.8	36.5	41.1	45.6	51.4	55.7	60	69.9	
d = 15 jours	27.5	31.5	35.1	39.9	44.5	50.3	54.4	58.7	68.5	
Ouhémoussa à Tiéouléoula										
d = 0 jour	15.6	17.9	20.1	22.8	25.2	28.1	30.1	32	36.2	
d = 5 jours	11.5	13.7	16.2	19.7	23	27.3	30.5	33.8	41.1	
d = 10 jours	10.8	13	15.5	18.9	22.2	26.5	29.7	33	40.3	
d = 15 jours	8.48	10.3	12.5	15.8	19.5	23.8	27.6	31.4	38.5	
Cavally à Tai										
d = 0 jour	624	724	835	975	1110	1280	1410	1540	1840	
d = 5 jours	591	685	790	922	1050	1210	1330	1460	1740	
d = 10 jours	553	645	748	877	1000	1160	1280	1400	1680	
d = 15 jours	532	624	723	846	965	1120	1230	1350	1610	
d = 20 jours	517	598	689	802	912	1050	1160	1260	1510	
d = 25 jours	504	583	671	781	886	1020	1130	1230	1460	
d = 30 jours	489	550	630	730	830	960	1060	1160	1400	
N'Se à Taïl										
d = 0 jour	100	123	147	179	210	250	280	309	375	
d = 5 jours	85.6	106	128	154	182	221	245	269	322	
d = 10 jours	82.7	103	125	151	180	219	243	267	311	
d = 15 jours	80.3	101	123	149	178	217	241	265	309	
d = 20 jours	78.0	99.7	121	147	176	215	239	263	307	
d = 25 jours	75.7	97.4	119	145	174	213	237	261	305	
d = 30 jours	73.4	95.1	117	143	172	211	235	259	303	
Cavally à Tâte										
d = 0 jour	1600	1820	2030	2280	2500	2770	2930	3130	3520	
d = 5 jours	1430	1640	1860	2140	2420	2770	3030	3300	3900	
d = 10 jours	1320	1520	1750	2030	2300	2660	2920	3180	3790	
d = 15 jours	1210	1430	1660	1930	2220	2600	2850	3110	3710	
d = 20 jours	1140	1380	1600	1870	2170	2550	2810	3060	3650	
d = 25 jours	1070	1320	1530	1810	2110	2490	2750	3000	3590	
d = 30 jours	1010	1260	1470	1760	2060	2440	2700	2950	3540	
Cavally à Toulepleu										
d = 0 jour	241	280	317	356	388	423	446	467	509	
d = 5 jours	232	270	306	345	376	410	433	453	494	
d = 10 jours	224	261	297	336	367	401	424	444	485	
d = 15 jours	216	252	288	327	358	392	415	435	476	
d = 20 jours	209	245	281	320	351	385	408	428	469	
d = 25 jours	202	238	274	313	344	378	401	421	462	
d = 30 jours	195	231	267	306	337	371	394	414	455	

4.3 MODÉLISATION DES INTENSITÉS DES DÉBITS DE CRUES

Les courbes QdF obtenues pour chaque station montrent que les valeurs des quantiles de débits les plus fréquents (c'est-à-dire pour la période de retour $T = 2$ ans) sont plus basses pour les courbes associées aux supseuil et plus élevées pour les maxan. Cependant, celles des quantiles de débits de fréquence rare (c'est-à-dire en allant vers la période de retour $T = 1000$ ans) sont plus élevées pour les supseuil que pour les maxan (Fig. 3). Aussi on remarque que pour toutes les stations les faisceaux de courbes supseuil sont resserrés et ceux des courbes maxan sont espacés. La comparaison de ces techniques d'échantillonnage en fonction du critère numérique de Nash montre que la méthode supseuil donne de meilleurs quantiles par rapport à la méthode maxan puisqu'elle a un Nash $> 0,7$ pour les périodes rares allant jusqu'à $T=100$ ans.

Les quantiles de crues de période de retour de deux ans, au niveau des supseuil, sont supérieurs au débit (instantané) moyen annuel enregistré sur toutes les stations étudiées. Il en est de même pour les quantiles de débits de période de retour de 10 ; 50 ; 100 ; 200 et 1000 ans (Fig.4). On peut donc conclure que les débits de crues fréquentes ($T = 2$ ans) sont à l'origine des inondations de plus en plus observées dans le bassin.

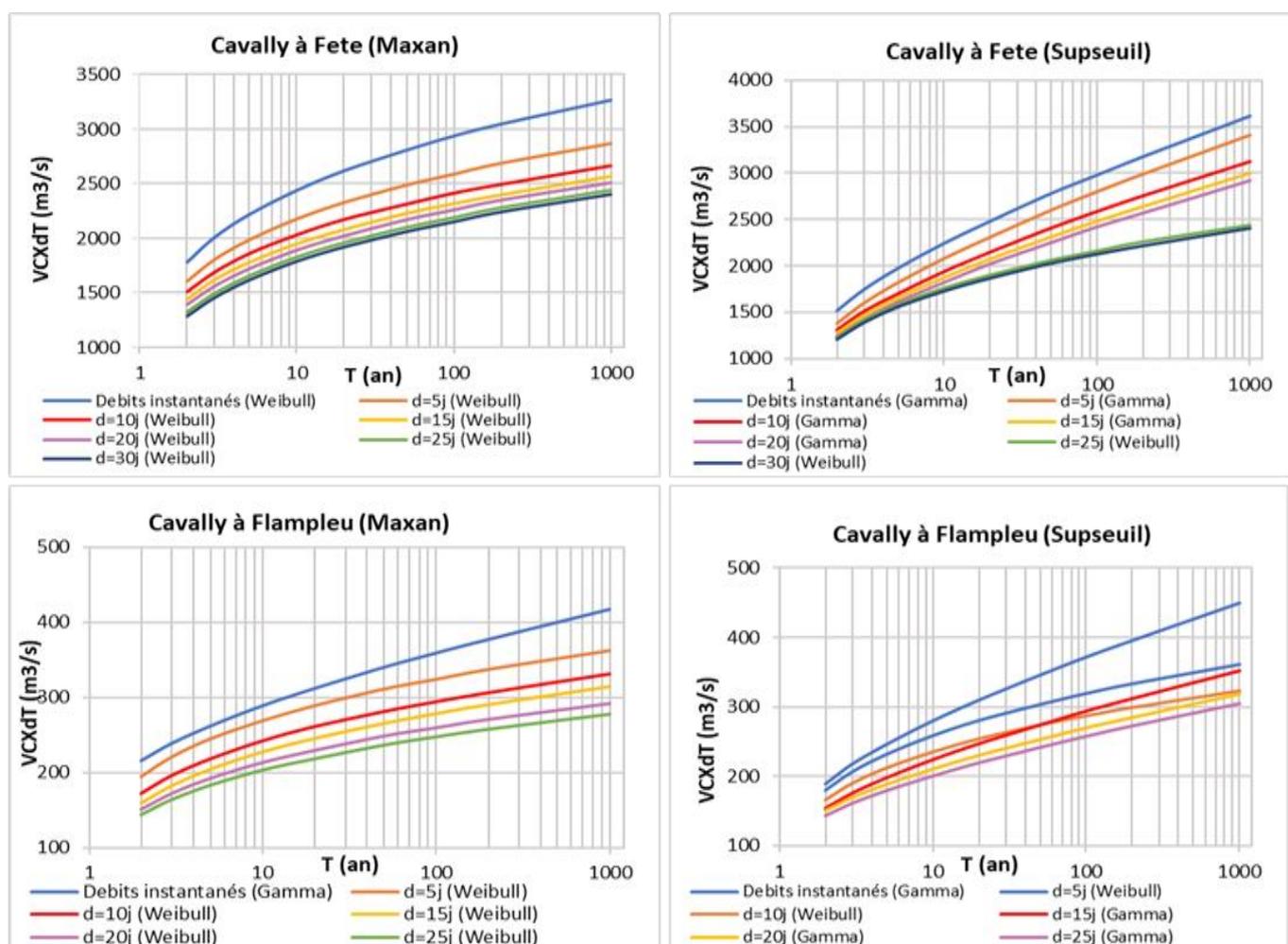


Fig. 4. Courbes QdF locales des stations de Fété, et Flampleu

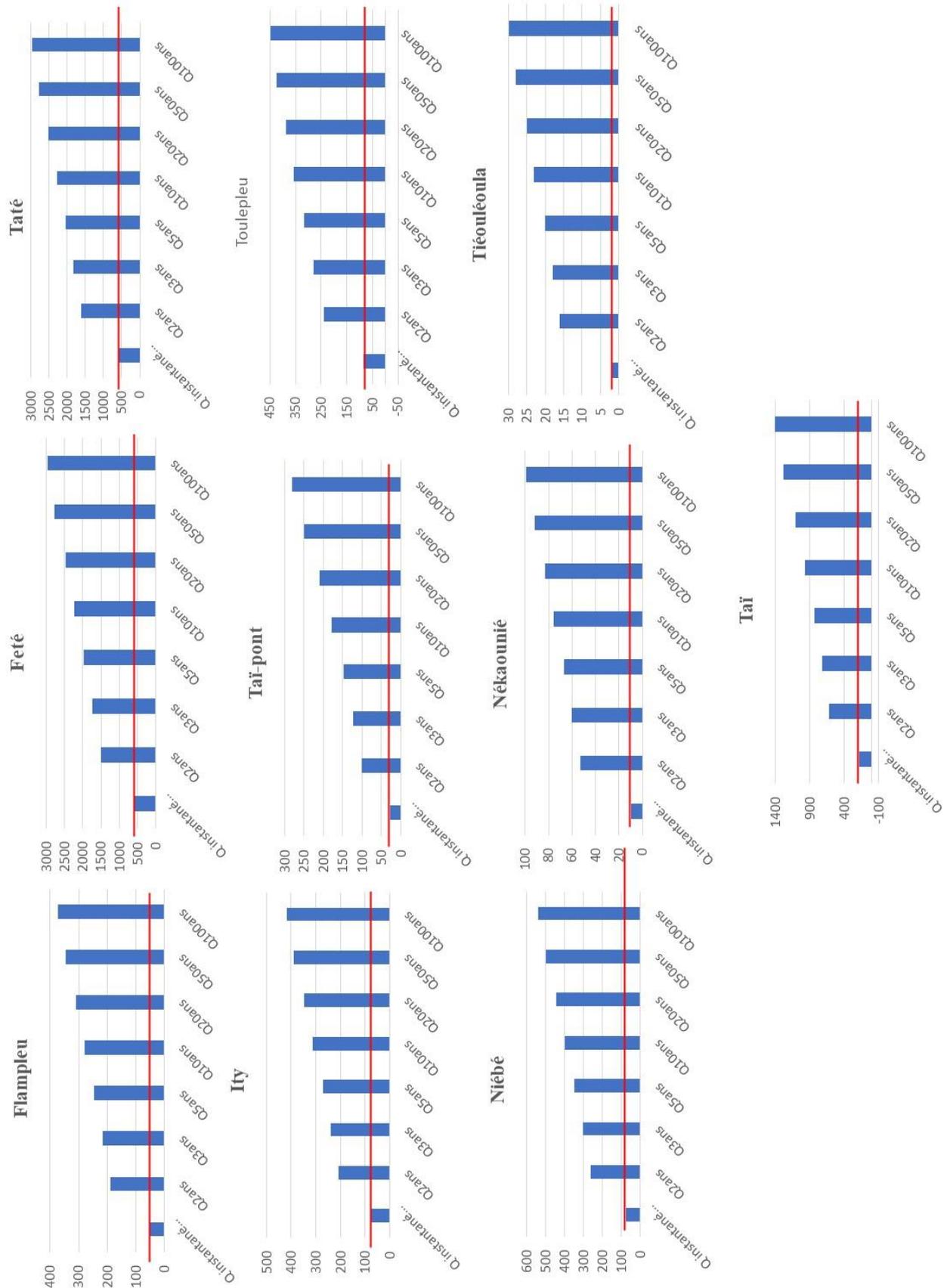


Fig. 5. Comparaison des quantiles de débits et des débits moyens annuels

VALIDATION DES COURBES QdF LOCALES PAR LA MÉTHODE BASSINS DE RÉFÉRENCE

- **Critère graphique**

Les critères de validation des courbes QdF sont présentés à partir des graphes des figures 5 et 6. Les courbes QdF locales représentées en traits continus sont en-dessous des courbes QdF de référence. Dans l'ensemble, les courbes QdF des stations se superposent plus ou moins bien avec celles des modèles de Vandenesse et Soyans dans le domaine des fréquences allant de T=2 à T=30 ans. L'analyse des résultats obtenus par application des modèles bassin de référence montre que le modèle Vandenesse est meilleur dans le domaine des fréquences observables ainsi que dans le domaine des fréquences rares.

- **Critère numérique : critère de Nash**

Dans l'ensemble des stations observées, les courbes de Vandenesse et de Soyans donnent de meilleurs NASH dans les domaines de fréquence allant de 2 à 20 ans (Fig. 6). Au-delà de ce domaine les NASH obtenus sont mauvais. Aussi le modèle de Vandenesse donne des NASH tous supérieurs à 0 pour des périodes allant de 2 à 1000 ans sauf pour les stations de Toulepleu, Nekaounié et Niébé où la valeur de cette dernière est négative à partir de 200 ans. Quant au modèle de Soyans il est acceptable que pour le domaine de fréquence compris entre 2 et 100 ans. Le modèle de Vandenesse est donc meilleur dans l'ensemble pour représenter le bassin du Cavally. La figure 6 montre les graphes des coefficients de NASH entre les quantiles locaux (supseuil) et les quantiles de type bassin sur le Cavally.

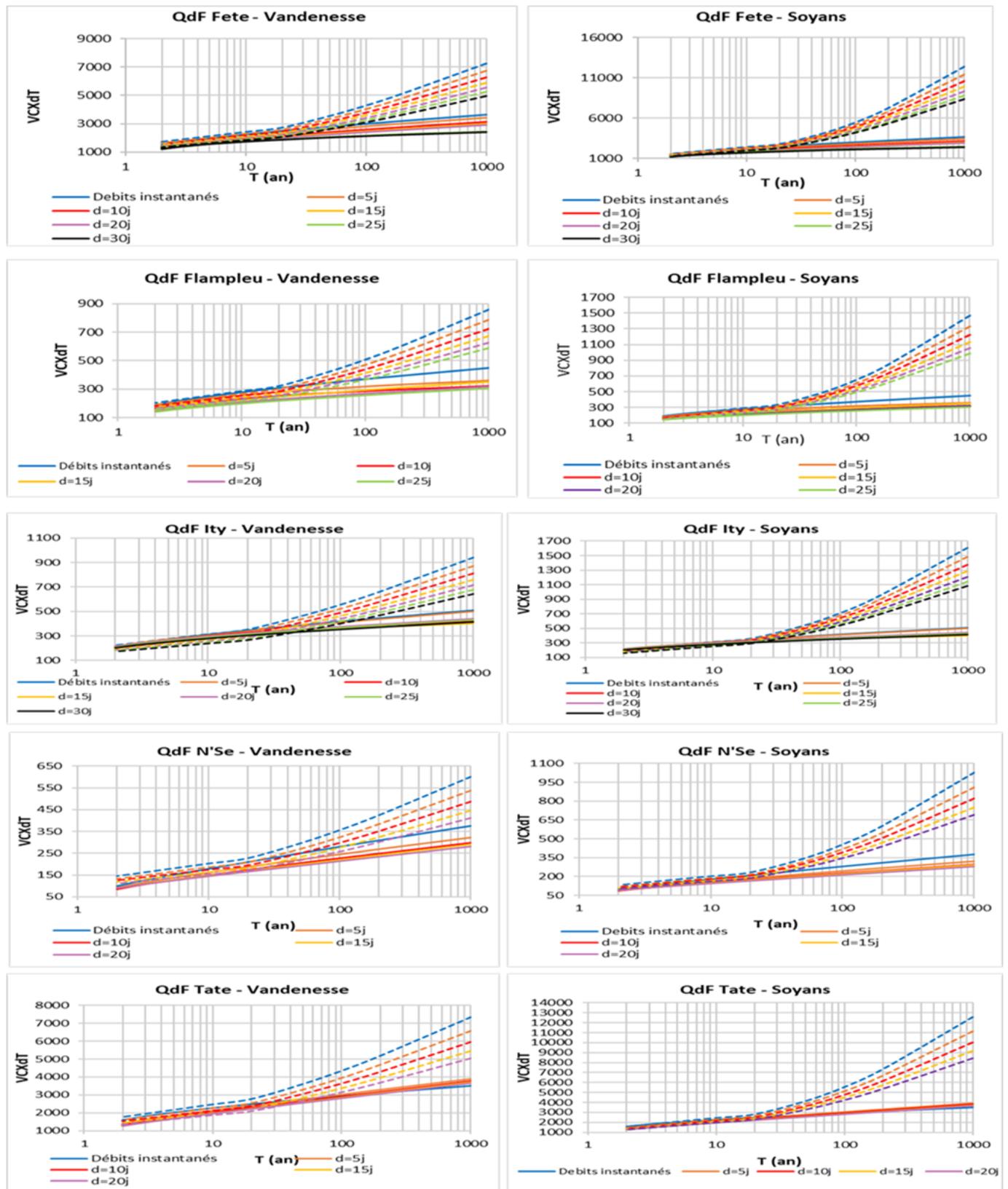


Fig. 6. Comparaison des courbes QdF de Feté, Flampeu, Ity, Tai-pond, et Taté et celles obtenues par les modèles de référence

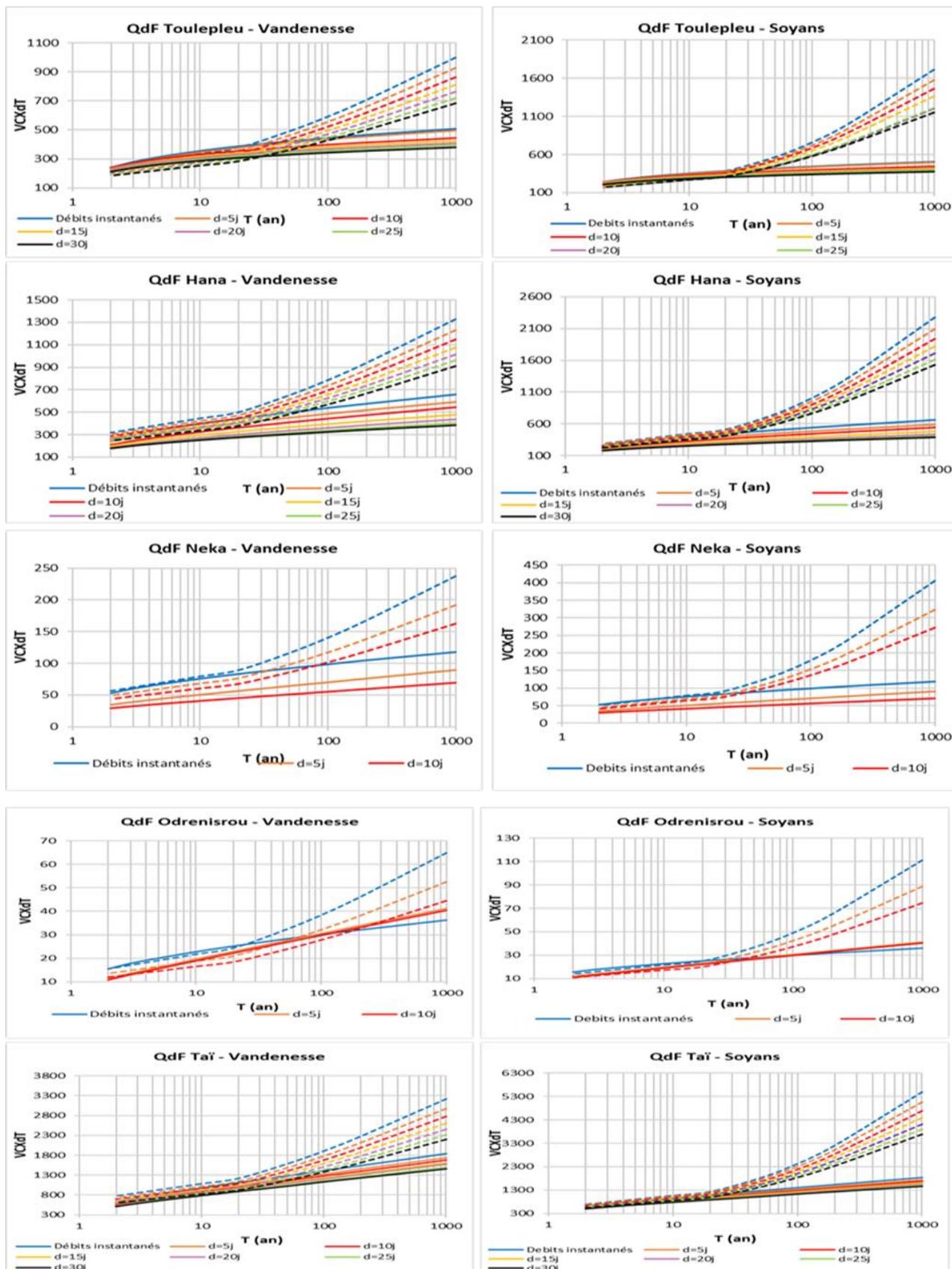


Fig. 7. Comparaison des courbes QdF de Toulepleu, Niébé, Nekaounié, Tiéouléoula, et Taï et celles obtenues par les modèles de référence

• Critère numérique : critère de Nash

Dans l'ensemble des stations observées les courbes de Vandenesse et de Soyans donnent de meilleurs NASH dans les domaines de fréquence allant de 2 à 20 ans (Fig. 7). Au-delà de ce domaine les NASH obtenus sont mauvais. Aussi le modèle de Vandenesse donne des NASH tous supérieurs à 0 pour des périodes allant de 2 à 1000 ans sauf pour les stations de Toulepleu, Nekaounié et Niébé où la valeur de cette dernière est négative à partir de 200 ans. Quant au modèle de Soyans il est acceptable que pour le domaine de fréquence compris entre 2 et 100 ans. Le modèle de Vandenesse est donc meilleur dans l'ensemble pour représenter le bassin du Cavally. La figure 7 montre les graphes des coefficients de NASH entre les quantiles locaux (supseuil) et les quantiles de type bassin sur le Cavally.

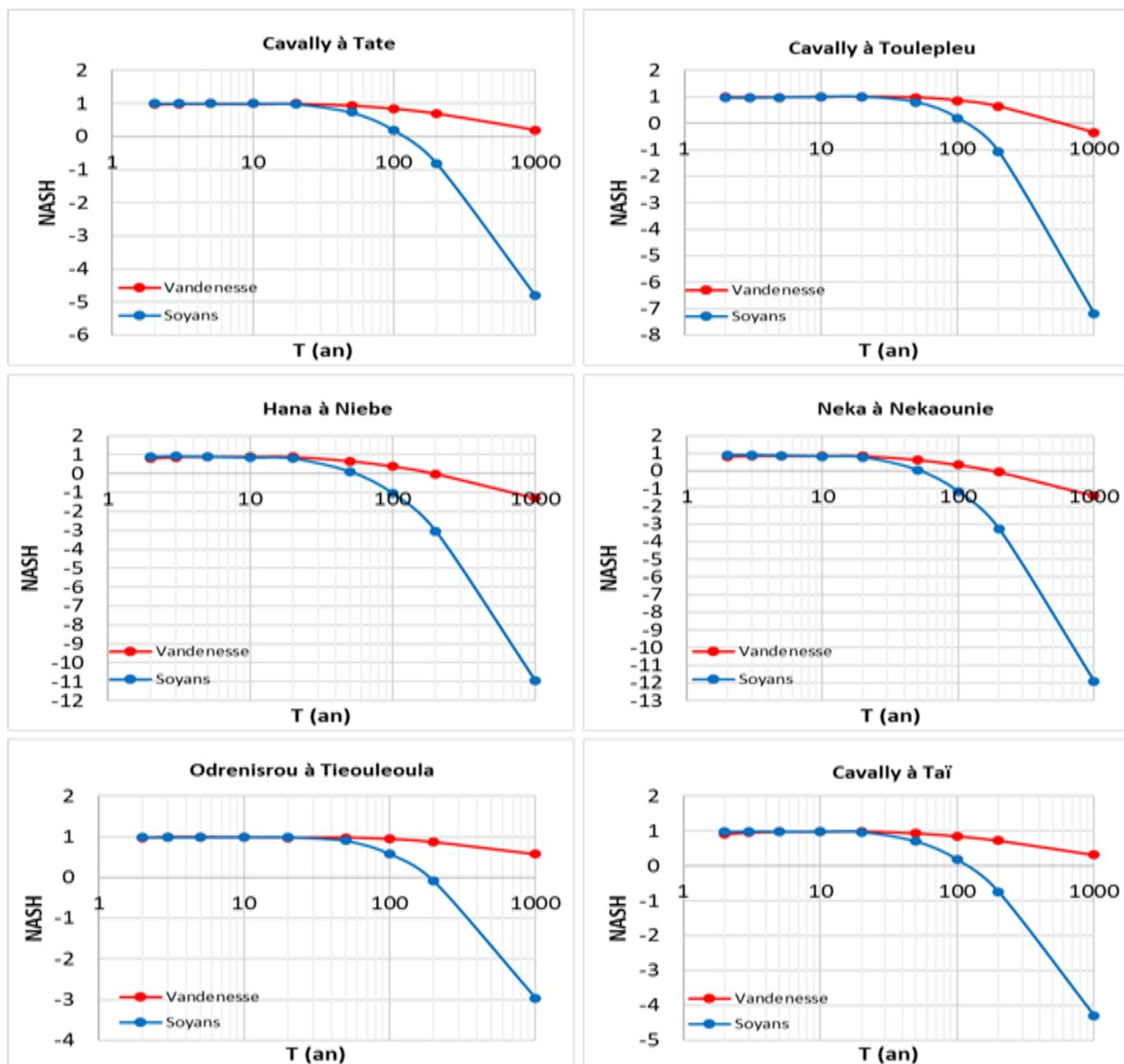


Fig. 8. Coefficient de NASH entre les quantiles locaux (supseuil) et les quantiles de type bassin de référence sur le Cavally

4.4 DISCUSSION

Veillez ne pas numéroter le résumé. Les résultats de l'analyse fréquentielle ont permis à l'aide des distributions des lois de Weibull, Gamma, GEV et Gumbel d'estimer respectivement les quantiles des crues du bassin versant du Cavally à l'exutoire de Feté, Toulepleu, Niébé, Tiéouloula, Taï ; Flampleu et Taté ; Ity ; et de Taï-pont et Nekaounié. Cette étape est primordiale dans la gestion des inondations puisqu'elle fournit des débits susceptibles d'apparaître à des périodes données et en fonction du comportement du bassin. La loi de Weibull est celle qui a eu le plus de succès dans l'ajustement des échantillons du bassin soit 50% d'ajustements réussis sur l'ensemble des stations. Aussi la validation des techniques d'échantillonnage a révélé que la méthode supseuil donnait de meilleurs NASH donc de meilleurs quantiles par rapport à la méthode maxan. Plusieurs études ont montré l'intérêt de la méthode supseuil par rapport à la méthode maxan de par la précision des estimations [28], [29] en Serbie, [17] en France, [30] en Allemagne. La comparaison des quantiles de débits et des débits moyens annuels observés sur l'ensemble des stations a montré qu'aussi bien les débits de crues fréquentes ($T = 2$ à 10 ans) et de crues rares ($T > 10$ ans) sont supérieurs au débits instantanés moyens enregistrés au niveau de chaque station hydrométrique ; traduisant ainsi la responsabilité des crues fréquentes dans les inondation observées dans le bassin versant. De tels résultats ont été obtenus au Bénin par [31] dans le bassin versant de la Sota.

Par ailleurs, les résultats obtenus par la méthode supseuil ont servi à la construction des modèles QdF locaux finaux. Comparés aux résultats obtenus par application des modèles bassin de référence, l'analyse des courbes QdF a montré que le modèle Vandenesse est meilleur dans le domaine des fréquences observables ainsi que dans le domaine des fréquences rares. Aussi les domaines de validité des lois de Vandenesse et Soyans selon le NASH étant compris entre 2 et 20 montrent que la méthode d'extrapolation de type Gradex des modèles bassin de référence ne décrivent pas au mieux le bassin versant du Cavally.

5 CONCLUSION

La méthodologie adoptée dans cette étude a permis d'analyser les différents risques liés aux crues dans le bassin versant du Cavally à travers l'analyse fréquentielle des crues sur la base des techniques d'échantillonnage du maxan et du supseuil et à partir de la modélisation des intensités de débits de crue par la construction des courbes Débit-Durée-Fréquence QdF. Les évènements extrêmes ont été analysés sur la base des débits journaliers pour 10 stations hydrométriques installées sur le bassin versant du Cavally : Feté, Flampleu, Ity, Taï-pont, Taté, Toulepleu, Niébé, Nekaounié, Tiéouloula et Taï. Les résultats du modèle QdF par ajustement statistique indiquent que la distribution de Weibull est le modèle dominant pour la description de la probabilité d'occurrence des crues dans le bassin versant du Cavally. Quant à la méthode d'échantillonnage, la méthode supseuil s'est révélée être la meilleure pour l'extraction des données. En outre le régime de crue a été explicité par une adéquation du modèle QdF de type bassins de référence de Vandenesse tant dans le domaine des fréquences observables que dans celui des fréquences rares. Ces courbes QdF décrivant l'intensité des débits journaliers ont montré des quantiles de débits de période de retour de 2 à 100 ans, tous supérieurs aux débits moyens observés dans le bassin versant. Ces résultats témoignent d'un risque élevé d'inondation dans ce bassin puisque, même les crues les plus fréquentes (ayant une probabilité sur deux de se produire) sont susceptibles de générer des inondations.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à traduire leur gratitude à l'endroit de la Direction de l'Hydrologie pour son aide et la mise à disposition des données hydrologiques nécessaires à la réalisation de cette étude.

REFERENCES

- [1] Banque Mondiale, "Integrating Environmental Considerations in Policy Formulation: Lessons from Policy-Based SEA Experience", *Environment Department*, World Bank, Washington, D.C, report No 32783, 86p., 2005.
- [2] Q.K. Ahmad, A.K. Biswas, R. Rangachari, M.M. Sainju, "Région de Ganges-Brahmapoutre-Meghna : un cadre pour le développement durable", Dhaka, University Press Limited. 208p., 2001.
- [3] K. Nakamura, K. Tockner, K. Amano, "River and wetland restoration: lessons from Japan", *Bioscience*, Vol.56, N°5, 419-429., 2006.
- [4] P. Javelle, "Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale" Sciences de l'environnement. Doctorat Mécanique de milieux géophysiques et environnement, Institut national polytechnique de Grenoble, 278p., 2001.

- [5] N. Simona, L. Cédric, "Gestion durable des zones inondables dans le delta du Danube (Roumanie), 1ères journées Scientifiques Inter-Réseaux de l'AUF, Gestion intégrée des eaux et des sols. Ressources, Aménagements et Risques en milieux ruraux et urbains, pp. 6 – 9, 2007.
- [6] OMM, Programme associé OMM-GWP de gestion des crues (APFM), "Gestion intégrée des crues-Document de fond" Document technique N°1, deuxième Edition, Genève, 2004.
- [7] M.B. Saley, F.K. Kouamé, M.J. Penven, J. Biémi, H.B. Kouadio, "Cartographie des zones à risques d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire : apport des MNA et de l'imagerie satellitaire" *Téledétection*, vol. 5 n° (1-2-3), pp ; 53 – 67, 2005.
- [8] N. Rifai, A. Khattabi, L. Rhazi, "Modélisation des crues des rivières pour la gestion intégrée du risque d'inondation : cas du bassin versant de Tahaddart (nord-ouest du Maroc)", *Revue des sciences de l'Eau*, Vol.27, N°1, 57-69., 2014.
- [9] A. Yahiaoui, B. Touaïbia, C. Bouvier, N. Dechemi, "Modélisation du régime de crue en Débit-durée-Fréquence du bassin de l'oued Mekerra dans l'ouest Algérien", *Revue des sciences de l'eau*, Vol.24, n°2, 103-115., 2011
- [10] C. Ancey, "Risques hydrologiques et aménagement du territoire" version 7.1. 342p., 2012.
- [11] E. Amoussou, Y. Trambly, H. S.V. Totin, G. Mahé & P. Camberlin, "Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto (Togo/Bénin)", *Hydrological Sciences Journal*, 59 :11, 2060-2071pp., 2014.
- [12] A.M. Bouzada, G. Kennedy, "Digitalization of Hydrological Data from Liberia", *Norwegian Water Resources and Energy Directorate*, 20p., 2019.
- [13] L. Jin, G. Galea, "Modèles descriptifs synthétiques des connaissances régionales en crues, représentativité spatiale et domaine de validité". *IRSTEA*. 250p., 1990.
- [14] A.A. Assani, "Recherche d'impacts d'une retenue sur le comportement d'une rivière ardennaise : hydrologie, sédimentologie, morphologie, végétation. Le cas du barrage de Butgenbach sur la Warche (Belgique)". *Thèse de Doctorat en sciences géographiques*, Université de Liège. 482p., 1997.
- [15] B. Renard, "Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France", *Thèse de Doctorat*, l'INP Grenoble, 364p., 2006.
- [16] M. Lang, P. Rasmussen, G. Oberlin, B. Bobee, "Echantillonnage par valeurs supérieures à un seuil : modélisation des occurrences par la méthode du renouvellement. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 10, N°3 : pp. 279-299., 1997.
- [17] M. Lang, "Les chroniques en hydrologie : Modélisation comparée par un système de gestion de base de données relationnel et orienté objet ; Traitements de bases et intervalles de confiance des quantiles de crues ; Techniques d'échantillonnage par la méthode du renouvellement", Université Joseph Fourier, 296p., 1995.
- [18] Wald, A. et Wolfowitz, J., 1940. On a test whether two samples are from the same population. *Annals of Mathematical Statistics*, 11, 147–162.
- [19] C. Libiseller, A. Grimvall, "Performance of Partial Mann-Kendall Test for trend Detection in the Presence of Covariates", *Environmetrics*, 13: 71-84, 2002.
- [20] N. Souanef, "Analyse fréquentielle des débits max de crues de l'Oued Abiod", Master en hydraulique. Université Mohamed Khider-Biskra. 134 p., 2015.
- [21] A. Kouider, "Analyse fréquentielle locale des crues au Québec". Université du Québec, INRS-ETE, 2003.
- [22] G. Soro, "Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire". Thèse de doctorat, Univ. Nangui-Abrogoua, Côte d'Ivoire, 172p., 2011.
- [23] B. Habibia, M. Meddi, P.J.J.F. Torfsc, R. Remaound, H.A.J. Van Lanenc, "Characterisation and prediction of meteorological drought using stochastic models in the semi-arid Chélif-Zahrez basin (Algeria)", *Journal of Hydrology: Regional Studies*. Vol. 16, pp. 15 – 31., 2018.
- [24] S. El Adlouni, B. Bobee, "Analyse fréquentielle hydrologique : Logiciel Hyfran-Plus (Version-V2,1)", 71p., 2014.
- [25] G. Galea, C. Prudhomme, "Modèles débit-durée-fréquence et conceptualisation d'un hydrogramme de crue synthétique : validation sur le BVRE de Draix", *Hydrologie Continentale*, Vol. 9, N°2 : 139-151, 1994.
- [26] S. CTGREF, S.H. DIAME, "Synthèse nationale sur les crues des petits bassins", fascicule 2 : la méthode SOCOSE ; fascicule 3 : la méthode CRUPEDIX. 39p., 1980.
- [27] J.E. Nash, J.V. Sutcliffe, River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290, 1970.
- [28] C. Cunnane, "A note on the Poisson assumption in partial duration series models". *Water Resources Research*, Vol. 15, N°2, 489-494. 1979.
- [29] N. Bezak, M. Brilly "Comparison between the peaks-over-threshold method and the annual maximum method for flood frequency analysis", *Hydrological Sciences Journal*, pp.959-977, 2014.
- [30] S. Fischer, A. Schumann, "Comparison between classical annual maxima and peak over Threshold approach concerning robustness", 20p. 2014.
- [31] H. Koumassi, "Risques hydroclimatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Couberi. *Environnement et Société*. Université d'Abomey Calavi, 2014.