

<b>Zeitschrift:</b>	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
<b>Band:</b>	93 (2001)
<b>Heft:</b>	9-10
<b>Artikel:</b>	Estimation des débits de pointe pour des bassins versants non jaugés : application à la Suisse Occidentale
<b>Autor:</b>	Niggli, Markus / Talamba, Daniela / Hingray, Benoit
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-939927">https://doi.org/10.5169/seals-939927</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 21.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# **Estimation des débits de pointe pour des bassins versants non jaugés: application à la Suisse Occidentale**

■ Markus Niggli, Daniela Talamba, Benoît Hingray et André Musy

## Résumé

L'étude présentée dans cet article résulte des recherches menées par l'Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne dans le cadre du projet GESREAU (GEStion des Ressources en EAU). L'objectif de l'étude est de proposer une méthode d'estimation des débits de pointe applicable aux bassins versants non jaugés de Suisse Occidentale et de moins de 500 km<sup>2</sup>. Deux méthodes d'estimation des débits de pointe ont été retenues. La première est une approche de type «index-flood», qui s'est révélée adaptée à l'estimation de débits de pointe de bassins versants dont la surface est supérieure à 30 km<sup>2</sup>. La deuxième est une version de la méthode rationnelle, qui a prouvé sa capacité à estimer correctement les débits de pointe pour les petits bassins versants (moins de 10 km<sup>2</sup>). Pour les surfaces intermédiaires, une combinaison entre ces deux modèles est proposée. La méthode finale est proposée sous la forme d'une procédure globale d'estimation des débits de crue qui prend en compte à la fois les caractéristiques des bassins versants (surface, couverture du sol) et la performance relative des deux modèles ci-dessus. Non seulement une valeur centrale est donnée, mais également un intervalle de vraisemblance, de telle sorte que l'utilisateur puisse juger de la précision de la méthode.

## 1. Introduction

Cet article présente les recherches menées par l'Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux (IATE) dans le domaine de l'estimation des débits de pointe pour des bassins versants non jaugés, c'est à dire sans mesures du débit à l'exutoire. Il synthétise les résultats de deux rapports réalisés pour le compte du Service des Eaux, Sols et Assainissement du canton de Vaud (Talamba *et al.*, 2000; Niggli *et al.* 1998). Ces recherches s'inscrivent dans le cadre du projet GESREAU (GEStion des Ressources en EAU) où l'objectif était de fournir un outil d'estimation des débits de pointe pour des bassins ver-

sants jusqu'à 500 km<sup>2</sup> et pour différents temps de retour. Cet article cherche avant tout à présenter quelques grandes lignes directrices, fournissant à l'utilisateur potentiel une première estimation vraisemblable du débit cherché. La méthodologie proposée ici peut bien entendu être affinée et adaptée à un contexte plus spécifique en fonction de l'expérience du modélisateur.

Le débit de pointe pour un temps de retour  $T$  est une valeur essentielle pour le dimensionnement d'ouvrages soumis aux impacts potentiels des crues (digues, ouvrages de franchissement, bassins de rétention, etc.) ou pour l'évaluation des risques d'inondation d'une plaine exposée à ce type de danger. Lorsque des mesures de débit en quantité suffisante existent pour le site d'intérêt, on estime généralement cette variable par ajustement d'une distribution statistique aux données de débits maximum annuels. Sinon, l'estimation doit être effectuée à partir d'une représentation simplifiée du comportement hydrologique du bassin versant et/ou sur la base des données de sites hydrologiquement semblables au site d'intérêt. Dans cette catégorie, deux approches sont le plus couramment mentionnées dans la littérature:

- Les méthodes empiriques, qui se basent sur une représentation simplifiée du comportement physique du bassin versant en cas de crue. Ces concepts découlent de l'expérience des hydrologues, d'où le qualificatif d'«empirique» pour ces méthodes. La plus connue d'entre elles, et sans doute la plus utilisée des ingénieurs, est la méthode rationnelle, qui doit son origine à Mulvaney (1851). Son expression, sous sa forme la plus simple, est la suivante:

$$Q_T = u \cdot C_r \cdot I_T(t_c) \cdot A \quad \text{Eq 1}$$

Où  $Q_T$  est le débit maximum annuel de temps de retour  $T$  et  $C_r$  est le coefficient de ruissellement (adimensionnel).  $I_T(t_c)$  est l'intensité moyenne maximale des précipitations pour le temps de retour  $T$  et pour une durée critique égale au temps de concentration  $t_c$  du bassin versant. Enfin,  $A$  est la surface du bassin versant et  $u$  est une constante dépendant des unités choisies.

- Les méthodes régionales qui mettent en évidence par une analyse statistique multivariée les relations entre des caractéristiques des bassins versants et les quantiles de débits de pointe. Le but est de compléter l'information locale en un site où l'on dispose de peu ou d'aucune série de mesure de débit par des informations provenant de sites provenant d'une même région. À l'inverse des formules empiriques, la régionalisation n'introduit pas à priori une conceptualisation du comportement hydrologique du bassin versant, mais se base sur une exploitation statistique des données et des relations entre elles. La plus connue et la plus utilisée de ces méthodes et la méthode de «l'indice de crue» ou «index-flood». Cette méthode a été proposée la première fois par Dalrymple (1960) et repose sur le principe qu'à l'intérieur d'une région dite «homogène» toutes les distributions de débit de pointe suivent une même loi statistique dont les paramètres restent inchangés, à un facteur d'échelle près. Ce dernier est généralement le débit de pointe annuel moyen.

La taille du bassin versant joue souvent un rôle essentiel dans la définition du domaine d'applicabilité des deux méthodes mentionnées ci-dessus. En général, les formules empiriques (comme la méthode rationnelle) sont réservées aux bassins versants de petite taille alors que les méthodes statistiques (régionalisation) sont plus adaptées aux bassins versants de taille moyenne<sup>1</sup>. Plusieurs arguments peuvent être avancés pour justifier cette différence au niveau des domaines de validité:

1. Les hypothèses simplificatrices du comportement hydrologique de formules empiriques comme la méthode rationnelle ne sont valables que pour les bassins versants réunissant certaines conditions. Ainsi, pour que la méthode rationnelle puisse être appliquée, l'intensité de la pluie  $I_T$  ainsi que le coefficient de ruissellement  $C_r$  doivent être considérés comme constants dans l'espace. Cette contrainte d'homogénéité implique la restriction de la formule rationnelle aux bassins versants de petite taille.

2. L'approche statistique (régionalisation) n'a de sens que si l'on dispose d'un jeu de données suffisamment important pour établir des relations robustes entre les quantiles de débit de pointe et les caractéristiques des bassins versants. Pour les petits bassins versants, les données disponibles sont fréquemment insuffisantes pour permettre la «lecture» statistique des relations entre les débits et les caractéristiques des bassins versants. Une information supplémentaire, résultant de l'expérience et d'une certaine conceptualisation du comportement hydrologique du bassin versant est alors nécessaire pour compenser le manque d'information observable.

Compte tenu des considérations énumérées ci-dessus, aucun des modèles pris individuellement est a priori en mesure de garantir une estimation fiable des débits de pointe pour toute la gamme des surfaces requise (jusqu'à 500 km<sup>2</sup>), ce qui comprend autant des petits bassins que des bassins de taille moyenne. Pour parvenir néanmoins à cet objectif, nous proposons d'exploiter la complémentarité des méthodes empiriques et régionales. Une combinaison linéaire (ou une moyenne pondérée) de deux modèles (méthode rationnelle et méthode «index-flood») est proposée. Différents critères sont proposés pour pondérer les estimations des modèles. Ces critères sont liés au domaine de validité des modèles (dépendant la taille des bassins versants) et à la vraisemblance de leur estimation. L'étude propose également pour le bassin étudié, un intervalle plausible de variation du quantile estimé, obtenu à partir de l'ensemble des informations hydrologiques disponibles sur la région concernée.

La structure de ce document a été choisie de manière à faciliter la compréhension de la démarche proposée. Après une brève description du périmètre d'étude (cf. section 2), les sections 3 et 4, présentent respectivement la méthode «index-flood» et la méthode rationnelle proposées dans cette étude. La section 5 identifie les domaines de validité des modèles en évaluant leur performance avec un critère approprié. La section 6 présente une façon de construire la plage de variation possible du quantile de période de retour  $T$  à estimer. Cette plage de variation servira à évaluer la vraisemblance des estimations des débits de pointe données par les différents modèles. A la section 7, enfin, on décrit la procédure d'estimation du débit de pointe, compte tenu du domaine de validité des modèles et de l'intervalle de vraisemblance associé à ce débit. Afin de faciliter la compréhension de la procédure d'estimation

des débits de pointe, cette dernière sera finalement illustrée à l'aide d'un exemple concret de bassin versant appartenant à la région d'étude.

## 2. Description du périmètre d'étude

### 2.1 Données disponibles

La région d'étude comprend environ 60 bassins versants situés dans la moitié ouest de la Suisse (cf. figure 1). Du point de vue hydrologique, la région d'étude comprend le bassin de L'Aare jusqu'à la jonction avec la Reuss, la partie suisse du Rhône et du Doubs, et enfin la partie suisse du Rhin en aval de la jonction avec l'Aare. Les bassins d'altitude moyenne supérieure à 1500 m (Alpes bernoises et valaisannes, où le régime hydrologique est influencé par la neige de manière prépondérante), de surface supérieure à 500 km<sup>2</sup> ou dont le régime hydrologique est influencé par l'activité humaine n'ont pas été retenus dans notre étude. Les données hydrologiques incluent des séries de débits maximum annuels mesurés aux exutoires des bassins versants considérés et dont la longueur varie entre 5 et 80 ans (cf. figure 2). Pour les bassins versants de moins de 100 km<sup>2</sup>, la longueur des séries ne dépasse que rarement 40 ans. On remarque que, compte tenu des données à disposition, la méthodologie proposée ci-dessous ne peut donc être validée que pour des temps de retour de l'ordre de 20 à 50 ans.

Différentes sources de données ont été consultées. Les données de débits proviennent essentiellement du Service Hydrologique et Géologique National (SHGN). La prise en compte des mesures effectuées par les services cantonaux de la zone d'étude a permis d'augmenter encore le nombre de bassins versants à disposition. Les données spatiales relatives à la topographie (modèle numérique d'altitude MNA25) ont été obtenues auprès de l'Office Fédéral de Topographie (OFT). L'OFT a également fourni le réseau hydrographique mesuré et digitalisé au 1:25 000 (VECTOR25).

Les données de couverture du sol (GEOSTAT) ont été fournies par l'Office Fédéral des Statistiques. D'autres sources d'informations non numériques ont également été consultées. Mentionnons l'Atlas Hydrologique (Spreafico et al., 1992) pour des données pluviométriques et certaines caractéristiques générales des bassins versants, l'Atlas Géographique (*Atlas de la Suisse*, 1965–1978) pour des données relatives à la géologie et enfin les catalogues des précipitations extrêmes de la Suisse (Röthlisberger et al., 1979–1981–1992).

## 2.2 Identification des régions hydrologiquement homogènes

Une première analyse des données montre que d'une façon générale le comportement hydrologique des bassins versants peut être expliqué par l'appartenance à 3 régions géographiques distinctes: Les *Préalpes*, le *Plateau* et le *Jura*.

Dans les *Préalpes*, du fait de la forte densité du réseau hydrographique, de la quasi-imperméabilité des surfaces et des pentes élevées, on note une prépondérance de crues estivales. Ces dernières sont produites par des précipitations convectives, de courtes durées et de forte intensité. Les distributions des débits de pointe de cette région (en particulier les petits bassins versants) se caractérisent par une moyenne, un coefficient de variation et un coefficient d'asymétrie élevé. Dans la région du *Plateau* en revanche, les crues produites par des précipitations hivernales à caractère frontal (longues durées, faibles intensité) dominent. Les distributions des débits de pointe y ont des moyennes, des coefficients de variation et des coefficients d'asymétrie plus faibles que dans les *Préalpes*. Par ailleurs, l'effet de la diminution de la surface sur l'accroissement des débits se fait moins sentir. Le *Jura*, du fait de sa nature karstique présente une très grande diversité au niveau des réactions hydrologiques des bassins versants. On y observe cependant que les bassins versants ont une densité du réseau hydrographique généralement faible ce qui a pour effet d'augmenter les temps de concentration, et ce malgré le relief important de la région. Ceci est sans doute lié à la géologie calcaire de la région, rendant la perméabilité des bassins versants importante. Comme pour la région du *Plateau*, ce sont les crues hivernales, générées par des précipitations frontales, qui sont les plus fréquentes. Les propriétés statistiques des séries de débit de pointe se caractérisent par les moyennes et les coefficients de variation et d'asymétrie les plus bas des trois régions. Il est intéressant de relever que les différences des régions au niveau géologiques, morphométriques et altimétriques se répercutent au niveau de la saisonnalité des crues annuelles (crues annuelles estivales pour les *Préalpes* et hivernales pour le *Plateau* et le *Jura*) et aussi au niveau des statistiques des débits de pointe. Notons encore que le concept de saisonnalité avait aussi été exploité par (Piocck-Ellena et al., 2000) pour définir des régions hydrologiquement homogènes pour la Suisse et l'Autriche.

La figure 1 montre l'affectation des bassins versants aux trois régions définies ci-dessus. La clé de répartition des bassins versants proposée intègre les informations de la

carte géologique donnée dans l'Atlas Géographique de la Suisse (*Atlas de la Suisse*, 1965–1978), ainsi que l'altitude (calculée avec le modèle numérique MNA25).

Les bassins classés dans la région Jura correspondent dans notre cas aux bassins dont la surface est majoritairement située dans le «Jura plissé» ou le «Jura tabulaire» de la carte géologique.

Les bassins du Plateau ont l'essentiel de leur surface dans les zones de molasse ou les zones de dépôts alluviaux ou glaciaires. Leur altitude moyenne est inférieure à 850 mètres.

Enfin la région hydrologique Préalpes regroupe les bassins situés essentiellement dans les zones de sédiments «Préalpins», au sens géologique du terme, ainsi que dans les zones molassiques dont l'altitude moyenne excède 850 mètres. Cette valeur correspond approximativement à la limite au dessus laquelle on observe une fréquence plus importante de crues annuelles estivales que de crues annuelles hivernales.

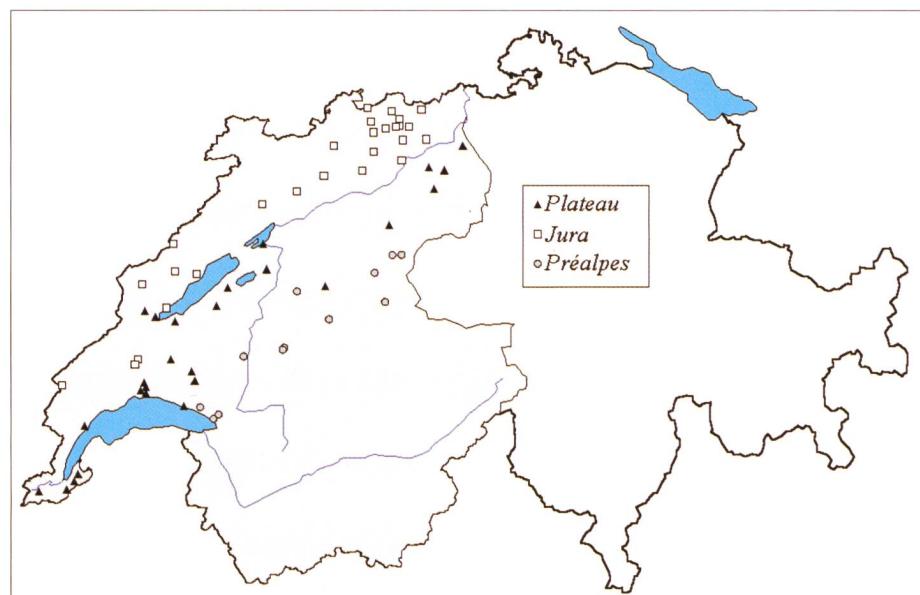
L'altitude est une sorte d'intégrateur de caractéristiques physiographiques (pente) et climatiques (précipitations, températures) des bassins versants. D'autres critères peuvent bien évidemment être retenus pour délimiter les régions. Ils peuvent conduire à une affectation différente pour l'un ou l'autre des bassins versants situés dans le périmètre d'étude. Il se peut également qu'en fonction du critère de délimitation retenus, certains bassins soient partiellement dans une région et partiellement dans une autre région.

### 3. La méthode régionale proposée

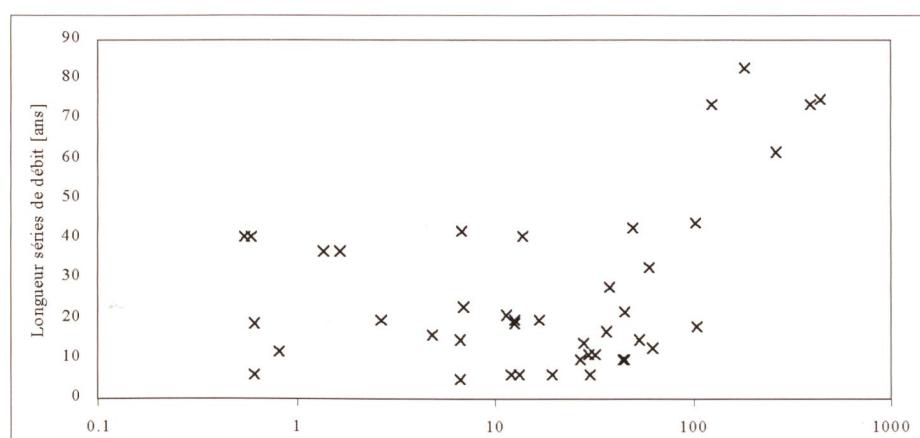
#### 3.1 Principes généraux

La méthode régionale de détermination des débits de pointe est une approche de type «index-flood», présentée en introduction de cet article. Trois étapes ont été nécessaires pour aboutir à une estimation des débits de pointe:

- Vérification de l'homogénéité des régions du point de vue des caractéristiques statistiques principales des débits de pointe annuels observés (coefficients de variation et d'asymétrie).
- Pour chacune de ces régions, ajustement d'une loi statistique à la distribution normalisée des débits de pointe annuels (c'est-à-dire divisée par le débit de pointe annuel moyen). Cette distribution normalisée, représentative de la région est aussi appelée «courbe de croissance».
- Enfin, détermination de l'expression permettant d'obtenir pour chacun des sites le débit de pointe annuel moyen (facteur



**Figure 1.** Périmètre d'étude et position des bassins versants retenus. Sur la figure est également représentée l'affectation des bassins versants à l'une des trois régions Préalpes, Plateau et Jura.



**Figure 2.** Les bassins sélectionnés: longueurs des séries disponibles et surface du bassin versant.

d'échelle) à partir de certaines caractéristiques physiographiques ou climatiques des bassins versants. Cette expression a été obtenue par régression multiple.

La distribution des débits de pointe recherchée au site  $i$  est alors le produit de débit de pointe annuel moyen du site  $i$  et de la courbe de croissance de la région correspondante.

#### 3.2 Application de la méthode au périmètre d'étude

Une région est définie comme homogène au sens de la méthode «index-flood» lorsque l'on peut attribuer la même courbe de croissance des débits de pointe annuels à tous les bassins versants qui la constituent. Si l'on peut admettre que les courbes de croissances suivent une loi statistique théorique, la vérification de l'homogénéité revient à vérifier que certaines caractéristiques statistiques comme les coefficients de variation et

d'asymétrie peuvent être considérés comme constants dans la région. La distribution la plus couramment utilisée dans les études de régionalisation est la loi des extrêmes généralisée ou GEV. Celle-ci peut être considérée comme une généralisation de la loi de Gumbel, fréquemment utilisée en Suisse. Ces deux lois sont abondamment décrites dans la littérature scientifique (par exemple dans Cunnane, 1989). La GEV est préférable à la loi de Gumbel pour notre étude, car elle dispose de 3 paramètres (au lieu de deux pour la loi de Gumbel) et peut ainsi prendre en compte les différences régionales au niveau des coefficients d'asymétrie.

Les statistiques retenues pour vérifier l'homogénéité des régions sont les L-coefficients de variation et d'asymétrie (respectivement  $L-CV$  et  $L-CS$ ) définis par Hosking (1990). Ils sont préférables aux coefficients de variation et d'asymétrie classiques car plus robustes et donc plus adaptés aux échan-

tillons de taille réduite. La figure 3 montre que les différences au niveau des processus de génération des crues pour les trois régions se répercutent au niveau des  $L$ -CV et  $L$ -CS. Ainsi les bassins préalpins, dont le régime de crue se caractérise par une prédominance de crues estivales, présentent des valeurs plutôt élevées de  $L$ -CV et  $L$ -CS. A l'inverse, les bassins du Jura, dominés par des crues hivernales se caractérisent par des valeurs plutôt faibles de  $L$ -CV et  $L$ -CS. Les bassins versants du Plateau constituent une région intermédiaire entre les bassins jurassiens et préalpins et leur valeur de  $L$ -CS est proche de celle de la distribution théorique de Gumbel. Pour vérifier l'homogénéité, le test statistique de Chowdhury (Chowdhury et al., 1991) peut être appliqué.

L'application du test a mis en évidence l'homogénéité des régions Préalpes et Plateau et l'hétérogénéité de la région Jura. Pour cette dernière région, le recours à une seule courbe de croissance pour tous les bassins versants est donc plus discutable. Ceci s'explique sans doute par la nature karstique des bassins du Jura, qui contribue à une grande variabilité de la réponse hydrologique. L'influence du karst est cependant difficilement identifiable sur le terrain et une subdivision en plus petites régions n'est donc pas raisonnablement envisageable. Il se peut aussi que les critères d'affectation régionale des bassins versants se révèlent parfois inadéquats. Il appartient cependant à l'utilisateur de choisir une pondération entre différentes régions (bassin de transition) ou l'affectation à une autre région (mauvaise affectation), au cas où il dispose d'éléments supplémentaires. Les bassins de petite taille (dont la surface est, disons, inférieure à  $10 \text{ km}^2$ ) ont des valeurs de  $L$ -CV et  $L$ -CS plus variables que les grands bassins versants, ce qui tend à augmenter l'hétérogénéité des régions et montre la limite de ce type d'approche (régionalisation) lorsqu'elle est appliquée aux petits bassins versants.

La figure 4 montre les courbes de croissances obtenues pour les 3 régions (seuls les bassins versants de plus de  $10 \text{ km}^2$  ont été considérés). L'échelle des abscisses (temps de retour) a été construite de telle manière qu'une distribution de Gumbel y soit représentée par une droite. On relève la croissance particulièrement forte de la courbe obtenue pour la région Préalpes avec une incurvation vers le haut. A l'inverse, la région Jura se caractérise par une courbe de croissance de pente peu élevée et une incurvation vers le bas. Compte tenu de l'hétérogénéité de la région jura, cette courbe n'a cependant qu'une valeur indicative de la tendance centrale. Pour la région Plateau, la distribution

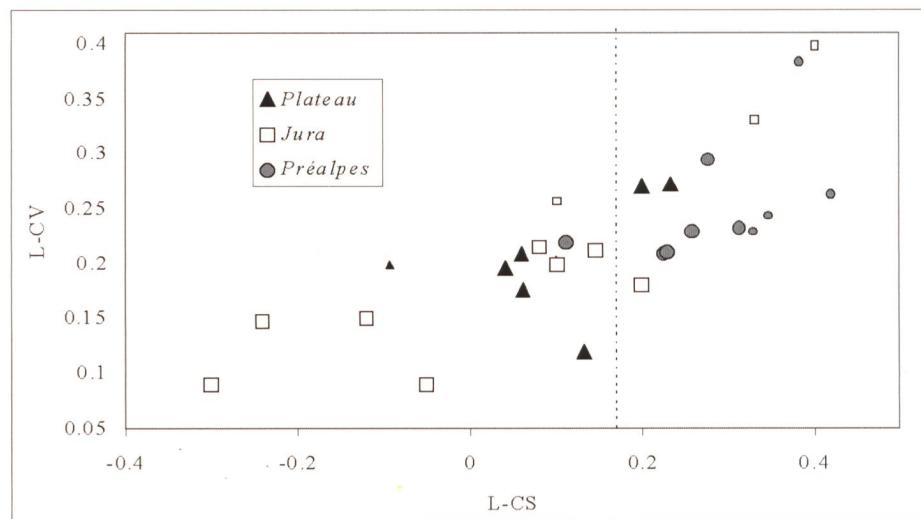


Figure 3. Diagramme des  $L$ -moments. Seuls les bassins versants disposant d'au moins 20 ans de mesures sont représentés sur ce graphique. Lorsque les symboles sont de taille réduite, ils correspondent à des bassins versants de moins de  $10 \text{ km}^2$ .

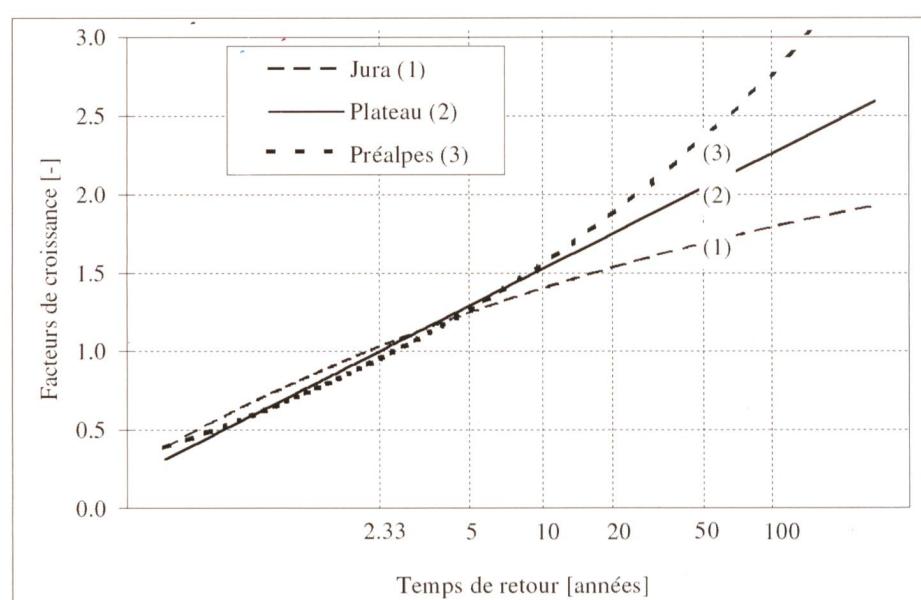


Figure 4. Comparaison des courbes de croissance des régions Jura, Plateau et Préalpes. Le facteur de croissance est le rapport entre le débit à un temps de retour donné  $Q_T$  et le débit de pointe annuel moyen.

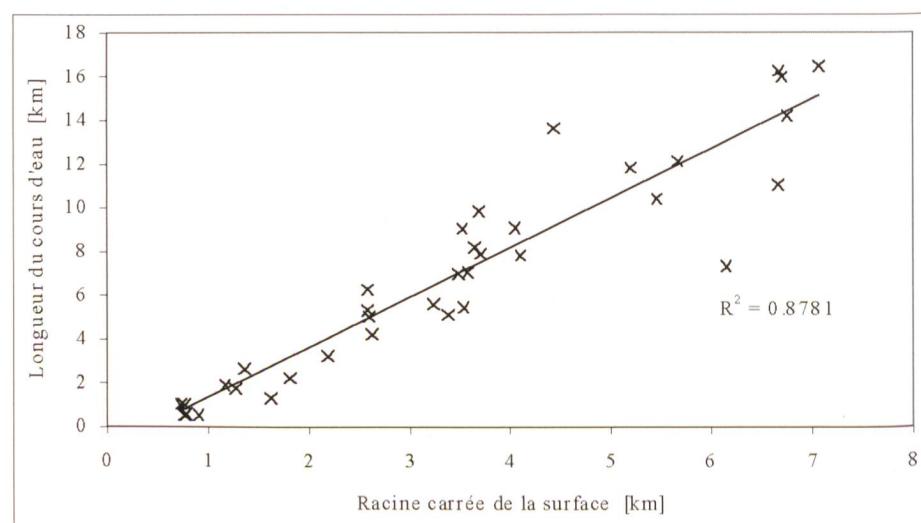


Figure 5. Corrélation entre la racine carrée de la surface du bassin versant et la longueur du cours d'eau principal mesurée avec VECTOR25.

obtenue n'a pas d'incurvation significative et peut être considérée comme une distribution de Gumbel.

Le facteur d'échelle, qui permet la reconstruction de la distribution statistique des débits de pointe pour un bassin particulier, n'est autre que le débit de pointe annuel moyen. Il doit être estimé à partir de caractéristiques physiographiques ou climatiques du bassin versant. L'équation 2 ci-dessous a été obtenue par une analyse de régression multiple entre le débit de pointe annuel moyen et les variables des bassins versants. Nous avons choisi de ne pas travailler directement sur les débits et les caractéristiques des bassins versants mais plutôt sur les logarithmes de ces derniers. La formule d'estimation du débit de pointe annuel moyen sera donc une fonction puissance, ce qui garantit que les valeurs calculées sont toujours positives. La méthode de sélection de la meilleure équation de régression est appelée «Stepwise Regression Procedure» (Draper et Smith, 1981). Les principes de base de la méthode est de ne retenir que les variables explicatives les plus significatives pour expliquer la variation du débit de pointe annuel.

Le débit de pointe  $Q_T$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] pour un temps de retour  $T$  est estimé selon la relation suivante:

$$Q_{T,\text{index-flood}} = 0.0056 \cdot f_{(T,R)} \cdot EL^{-0.56} \cdot ALT^{0.63} \cdot A^{0.66}$$

avec

$$EL = 2 \cdot \frac{\sqrt{A / \pi}}{L} \quad \text{Eq 2}$$

$A$ ,  $ALT$  et  $EL$  sont respectivement la surface [ $\text{km}^2$ ], l'altitude moyenne [m] et l'indice d'elongation du bassin versant. Ce dernier paramètre est exprimé en fonction de la longueur totale du réseau hydrographique  $L$  (somme des longueurs de cours d'eau permanents et temporaires) mesuré au 1: 25 000 (VECTOR25). Il constitue une sorte de mesure de la densité du réseau hydrographique. Enfin,  $f_{(T,R)}$  est un facteur multiplicatif dépendant de la région et du temps de retour  $T$ . Sa valeur est déterminée à partir des courbes de croissance de la figure 4.

Comme mentionné plus haut, la principale limite de la méthode reste son inadéquation aux bassins de petite taille. Les principales raisons ont été données en introduction de cet article. Dans notre cas particulier, deux exemples illustrent cette inaptitude à reproduire les réponses hydrologiques des bassins versants à petite échelle:

- L'augmentation de l'hétérogénéité des régions si des petits bassins versants sont incorporés dans l'étude. Une seule courbe de croissance par région n'est plus satisfaisante pour les petits bassins versants.

- La sélection d'un modèle de régression multiple faisant intervenir une variable ( $EL$  mesuré au 1: 25 000) inadéquate pour caractériser les petits bassins versants. L'étude de Talamba et al. (2000) a en effet montré que cette variable ne pouvait être déterminée de façon fiable pour les bassins de moins de 10  $\text{km}^2$ . En revanche, la pluviométrie locale, certainement déterminante pour les petits bassins versants, n'est pas retenue.

#### 4. La formule rationnelle: expression synthétique et adaptation au contexte de l'étude

##### 4.1 Principes

La formule rationnelle a été choisie comme méthode alternative potentielle à la méthode régionale pour les petits bassins versants. L'analyse de différentes expressions de ce modèle a permis d'en proposer une formulation synthétique. Les paragraphes ci-dessous décrivent les différentes formules et méthodes utilisées pour estimer les paramètres de la méthode rationnelle (cf. équation 1). Ils présentent ensuite la formulation synthétique et l'adaptation qui a pu être faite au périmètre d'étude.

##### 4.2 Détermination du temps de concentration

Plusieurs formules de la littérature spécialisée existent pour estimer le temps de concentration. Mentionnons par exemple les formules de Ventura, Passini, Bransby, Kirpich, NERC (Natural and Environmental Research Council). Une description de ces formules peut être trouvée par exemple dans ASCE (1996) ou Chow et al. (1988). L'analyse de ces formules montre qu'elles recourent toutes à deux paramètres de base que sont la surface du bassin versant et la pente moyenne du bassin. D'autres paramètres tels que la longueur du cours d'eau principal ou la longueur du bassin versant<sup>2</sup> sont parfois ajoutés. Ces paramètres sont cependant délicats à déterminer et leur valeur est dépendante de l'échelle de travail (qui n'est d'ailleurs pas toujours précisée dans la littérature). L'application de ces formules implique une certaine subjectivité, ce qui rend les résultats difficilement exploitables à une échelle régionale. Par ailleurs, la figure 5 montre que la longueur du cours d'eau principal mesurée avec VECTOR 25 est fortement corrélée avec la racine carrée de la surface des bassins versants de notre étude.

Des résultats similaires sont obtenus avec la longueur du bassin versant. En substituant dans les différentes expressions du temps de concentration la surface aux deux longueurs

représentatives précédentes, il devient possible de exprimer l'ensemble des formules répertoriées pour estimer le temps de concentration [min] sous la forme synthétique unique suivante:

$$t_c = \beta \cdot \left( \frac{A}{P} \right)^\alpha \quad \text{Eq 3}$$

où  $A$  est la surface du bassin versant [ $\text{km}^2$ ] et  $P$  est sa pente moyenne [ $\text{m/m}$ ].  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres dont les valeurs sont variables selon la formule proposée. Nous avons choisi de fixer le paramètre présentant la plus faible variabilité entre les différentes formules répertoriées, soit  $\alpha$  à 0.5. Cette valeur correspond à la valeur le plus souvent proposée pour les différentes formules d'estimation du temps de concentration. Le paramètre  $\beta$ , en revanche sera ajusté sur la base des débits observés à disposition (cf. section 4.4 de cette communication).

##### 4.3 Détermination de l'intensité de pluie et du coefficient de ruissellement

Pour calculer  $I_T(t_c)$  [ $\text{mm/h}$ ], c'est à dire l'intensité moyenne maximale des précipitations correspondant à une période de retour  $T$  donnée et de durée critique égale au temps de concentration du bassin versant, les courbes *IDF* (Intensité-Durée-Fréquence) de type MONTANA, ont été utilisées. L'expression mathématique est la suivante:

$$I_T(t_c) = \epsilon_1(T) \cdot t_c^{\epsilon_2} \quad \text{Eq 4}$$

où les paramètres  $\epsilon_1(T)$  et  $\epsilon_2$  sont des paramètres régionaux,  $\epsilon_1(T)$  dépendant de la période de retour  $T$ . Les courbes *IDF* figurant dans les catalogues des précipitations extrêmes de la Suisse (Röthlisberger et al., 1979–1981–1992) peuvent être considérées. A chaque bassin versant de la région d'étude on affecte une station pluviométrique représentative, en utilisant un critère de proximité géographique. On peut ensuite calculer les paramètres  $\epsilon_1(T)$  et  $\epsilon_2$  à partir des courbes *IDF* correspondantes.

D'autres sources bibliographiques peuvent également être exploitées pour déterminer les paramètres  $\epsilon_1(T)$  et  $\epsilon_2$ . La principale est celle de l'Atlas Hydrologique de la Suisse (Jensen, Lang et Rinden, 1992), dans lequel est représentée la carte des pluies ponctuelles extrêmes pour différents temps de retour et différentes durées.

Pour la détermination du coefficient du ruissellement, les normes suisses SNV ont été retenues (citées dans Musy et Higy, 1998). Celles-ci proposent une valeur du coefficient de ruissellement uniquement en fonction de l'occupation du sol. Elles ont été préférées à d'autres méthodes faisant intervenir égale-

ment la pente, comme celle de Sautier (*Musy et Higy, 1994*) ou celle de Melli-Muller (*Forster, 1992*). La pente est en effet déjà prise en compte dans le calcul du temps de concentration et il n'a pas été jugé utile de la reprendre dans le calcul du coefficient de ruisselement.

#### 4.4 Expression synthétique de la formule rationnelle

Une fois tous les paramètres identifiés, l'expression synthétique de la formule rationnelle devient:

$$Q_{T,\text{rationnelle}} = u \cdot C_r \cdot \beta^{\epsilon} \cdot p^{-0.5\epsilon} \cdot \epsilon_{1(T)} \cdot A^{1+0.5\epsilon}; \quad \text{Eq 5}$$

Compte tenu des unités des paramètres de l'équation 5 (cf. sections 4.2 et 4.3), la constante  $u$  vaut 0.28. Cette expression contient un paramètre à caler, le paramètre  $\beta$ .

Le paramètre  $\beta$  «optimal» a été estimé pour chaque bassin versant de manière à reproduire pour différentes périodes de retour caractéristiques le quantile «observé» correspondant ( $q_T$ ). La variabilité de  $\beta$  peut être expliquée en grande partie par l'appartenance des bassins versants à une des régions définies à la section 2 de cet article.

Le tableau 1 propose un jeu de valeur de  $\beta$  qui permet une bonne reproduction du débit de pointe, quel que soit le temps de retour. La région peut donc ici être considérée comme une sorte d'intégrale de tous les paramètres non pris en compte (mesurables ou non) participant à la réponse hydrologique d'un bassin versant.

Région	$\beta$ régional
Préalpes	20
Plateau	30
Jura	75

Tableau 1. Valeur de  $\beta$  optimales par région (tous temps de retour confondus).

Remarquons que nous n'avons pris en compte le coefficient d'abattement pour le calcul des précipitations moyennes. Comme la majorité des bassins versants ont des surfaces inférieures à 100 km<sup>2</sup>, celui-ci serait très proche de 1 selon l'Atlas Hydrologique de la Suisse (*Grebner et al., 1992*). Les coefficients d'abattement le plus bas sont voisins de 0.8 (pour la Broye à Payerne, par exemple). Aussi la prise en compte des coefficients d'abattement n'a pas d'incidence majeure sur les valeurs optimales de  $\beta$ .

## 5. Comparaison et combinaison des modèles

### 5.1 Comparaison de la performance des modèles

La comparaison des modèles a été réalisée en calculant l'indice de performance suivant:

$$I_i = \frac{V_i + [E_i - \alpha_0 - \alpha_1 \cdot Q_i^R]^2}{[E_i]^2} \quad \text{Eq 6}$$

où  $I_i$  est l'indice de performance individuel calculé pour chaque bassin versant et pour un temps de retour donné.  $\alpha_0$  et  $\alpha_1$  sont les biais respectivement absolus et relatifs de l'estimation du débit de pointe  $Q_i^R$  donnée par le modèle utilisé (méthode rationnelle ou méthode «index-flood») pour le bassin versant  $i$ .  $E_i$  et  $V_i$  sont respectivement l'espérance et la variance de l'estimateur du débit de pointe dit «vrai». Les termes intervenant dans le calcul de  $I_i$  sont obtenus par une approche bayésienne empirique et par résolution d'un système d'équations linéaires avec la méthode des moindres carrés pondérés (*Stedinger et Tasker, 1996*). Plus la valeur de l'indice est grande, moins le modèle est performant pour le bassin étudié. Cette indice peut aussi être calculé pour un groupe de bassins versants. Il suffit alors d'additionner les valeurs individuelles  $I_i$  correspondant aux bassins versants appartenant au groupe défini. Plus de détails sont donnés dans *Rasmussen et al. (1994)* et dans *GREHYS (1996)*. Même si les termes de l'équation 6 sont relativement complexes à calculer, cet indice présente l'avantage décisif d'intégrer l'incertitude sur l'estimation des quantiles observés compte tenu de la longueur variable des séries d'observations.

La performance de chacun des deux modèles d'estimation des débits de pointe est présentée pour le quantile  $Q_{20}$  à la figure 6. Les résultats sont semblables pour les autres temps de retour. Ils confirment les remarques ci-dessus:

- la formule rationnelle semble être nettement plus appropriée que la méthode «index-flood» pour les petits bassins versants (surface inférieure à 10–15 km<sup>2</sup>). La figure 6 montre par ailleurs que la performance de la méthode rationnelle décroît lorsque la taille des bassins versants augmente;
- à l'inverse, la performance de la méthode «index-flood», médiocre pour les petits bassins versants comparativement à la méthode rationnelle, tend à s'améliorer sensiblement avec la taille des bassins versants. On observe un changement relativement brusque autour de 10–20 km<sup>2</sup>. La méthode «index-flood» devient alors incontestablement supérieure à la méthode rationnelle;

- pour les surfaces entre 10 et 30 km<sup>2</sup>, il est difficile de mettre en évidence la supériorité d'un des modèles par rapport à l'autre, les performances individuelles des deux modèles étant en moyenne équivalentes.

Cette évaluation comparative est complétée par une indication aisément interprétable de l'erreur relative au niveau de la prédiction des débits de pointe par chacun des modèles. Selon les critères *Naef (1983)* une estimation peut être considérée comme «exacte» ou «suffisante» si le rapport entre le débit calculé et le débit observé est situé entre 0.7 et 1.5, autrement dit si la valeur donnée par le modèle surestime ou sous-estime le débit d'un facteur maximum de 1.5. Bien entendu, cette comparaison n'a de sens que si les débits observés ne sont pas entachés d'une erreur d'échantillonnage importante et qu'ils constituent une bonne indication de la valeur «vraie». Ces conditions ne sont réunies que si les longueurs des séries sont suffisamment longues et/ou si le temps de retour du débit à évaluer est suffisamment petit. Compte tenu des données à disposition, nous avons effectué cet exercice pour le temps de retour 5 ans (cf. tableau 2). Les résultats montrent que même dans le meilleur des cas (soit quand la formule rationnelle est utilisée), l'estimation pour les petits bassins reste délicate. Environ 60% de estimations sont considérées comme «exactes» ou «suffisantes». Ce chiffre serait probablement plus bas si l'on n'avait considéré que des bassins n'ayant pas servi à l'élaboration des formules. Pour les bassins plus grands, l'estimation s'améliore puisque la meilleure des formules conduit à environ 80% d'estimations «exactes» ou «suffisantes».

Au vu de la performance de chacun des deux modèles en fonction de la surface, il est tentant d'envisager un modèle combinant les estimations fournies par les deux méthodes prises séparément. Ce modèle combiné donnerait un poids plus important à l'estimation fournie par la méthode rationnelle dans le cas d'un petit bassin et un poids plus important à l'estimation fournie par le modèle régional dans le cas d'un bassin de grande taille.

La figure 6 montre que la formule rationnelle doit être préférée à la méthode «index-flood» pour les bassins versants ne dépassant pas 10 km<sup>2</sup>. En revanche la méthode «index-flood» est à recommander au-delà de 30 km<sup>2</sup>. Pour une plage de surfaces intermédiaires, une estimation basée sur une moyenne pondérée des estimations des deux modèles est proposée. Il est relativement difficile d'identifier une évolution précise du jeu de pondération, les estimations fournies par les deux modèles étant fréquem-

ment équivalentes. Il est néanmoins intéressant de proposer une évolution de la pondération qui permet d'assurer une continuité du modèle combiné envisagé. Une évolution possible est proposée ci-dessous (cf. équations 7 et 8). Entre les deux surfaces limites inférieures et supérieures identifiées ci-dessus ( $A_{\min} = 10 \text{ km}^2$  et  $A_{\max} = 30 \text{ km}^2$ ), le poids  $p$  accordé à la méthode rationnelle décroît linéairement en fonction du logarithme de la surface du bassin versant  $A$ :

$$p = \frac{\ln(A) - \ln(A_{\max})}{\ln(A_{\min}) - \ln(A_{\max})} \quad \text{Eq 7}$$

L'estimation du quantile de débit de pointe résultant de la combinaison des deux modèles est alors la suivante:

$$Q_{T,\text{combiné}} = p \cdot Q_{T,\text{rationnelle}} + (1-p) \cdot Q_{T,\text{index-flood}} \quad \text{Eq 8}$$

La façon d'exploiter ces résultats et cette pondération en particulier est présentée dans la section 7 de cet article.

## 6. Intervalles de vraisemblance: «Modèle cadre régional»

Les chapitres précédents ont mis en évidence la nécessité de recourir à plusieurs méthodes d'estimation des débits de pointe relatifs à une période de retour donnée. Ils ont aussi montré que ces méthodes, même après avoir été adaptées au contexte de l'étude peuvent fournir pour certains bassins particuliers des estimations parfois relativement lointaines des quantiles observés. Il s'est donc révélé indispensable de mettre en place un «garde fou» permettant d'avertir l'utilisateur de la méthode lorsque celle-ci conduit à une estimation peu vraisemblable du quantile  $Q_T$  cherché. Ce «garde fou» revêt en fait la forme d'un troisième modèle, dénommé par la suite «modèle cadre régional», qui a pour but de caractériser d'un point de vue hydrologique chacune des 3 régions géographiques précédemment identifiées (Jura, Plateau, Préalpes).

Ce modèle est élaboré à l'aide de l'ensemble des données à disposition sur la région d'étude. Il fournit une plage de variation potentielle du quantile recherché, compte tenu de la région d'appartenance géographique et de la surface. Par ailleurs, il a pour but de compléter l'expertise (ou, à défaut, d'en constituer la base) de l'utilisateur qui peut ainsi valoriser son expérience et sa perception des phénomènes pour valider, invalider ou affiner l'estimation du quantile cherché. Pour ce faire, les plages de variation du débit annuel maximum ont été déterminées pour différentes périodes de retour des débits maximum annuels et pour différentes classes de surface des bassins versants. Trois

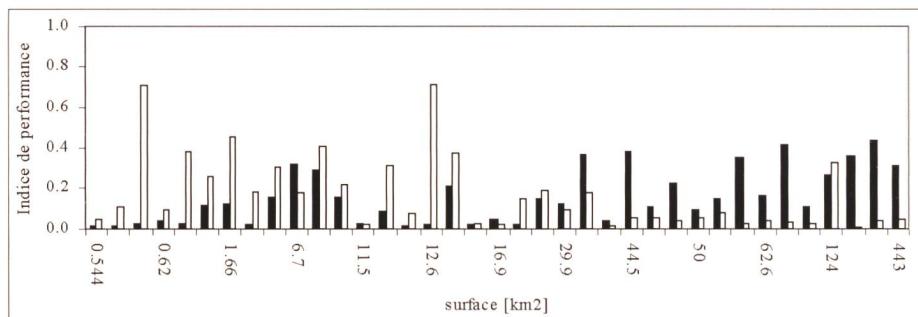


Figure 6. Indice de performance pour la méthode rationnelle (en noir) et la méthode «index-flood» (en blanc). Le temps de retour est ici de 20 ans. Les bassins sont classés de gauche à droite dans l'ordre croissant des surfaces.

	$A < 10 \text{ km}^2$	$10 < A < 30 \text{ km}^2$	$A > 30 \text{ km}^2$
Méthode rationnelle	62	80	25
Méthode «index-flood»	45	60	85

Tableau 2. Proportion [%] d'estimations «exactes» ou «suffisantes» selon Naef (1983) pour les deux modèles testés.

classes de surface ont été considérées:  $[0, 10 \text{ km}^2]$ ,  $[10, 50 \text{ km}^2]$  et  $[50, 500 \text{ km}^2]$ . Pour chaque région, chaque classe de surface et chaque période de retour, une «série régionale» de débits maximum annuels a été créée. Cette série régionale a été reconstituée à partir de simulations Monte Carlo pour chaque temps de retour. Chaque série permet ainsi d'obtenir pour un temps de retour et pour une classe de surface donnée, un intervalle de vraisemblance régional déterminé par l'intervalle comprenant 80% des débits observés ou simulés.

Cette analyse a confirmé les différences importantes entre les caractéristiques hydrologiques des régions et a permis également d'identifier le «modèle cadre régional». Ce dernier permet de situer la plage de variation plausible dans laquelle le débit de pointe à estimer est supposé varier lorsque l'on exploite l'ensemble des informations à disposition pour la région et la classe de surface concernées. Il permet aussi, d'évaluer la vraisemblance des estimations fournies par

d'autres modèles d'estimation (comme la méthode rationnelle ou la méthode «index-flood» présentées précédemment). Une présentation synthétique du «modèle cadre régional» pour les temps de retour 5, 20 et 50 ans est donnée au tableau 3. Ce «modèle cadre régional» est donc à prendre comme un modèle d'expert et pourra, de la même façon qu'un expert affine son expertise avec les nouvelles informations qu'il engrange continûment, être amélioré au fur et à mesure que de nouvelles données de débits seront disponibles (nouveaux bassins jaugés ou années de mesure supplémentaires).

On note, que pour une région donnée, la taille des intervalles de vraisemblance augmente lorsque la taille des bassins versants diminue (à période de retour  $T$  fixée) ou lorsque la période de retour  $T$  augmente (à classe de surface fixée). Ceci est bien entendu conforme aux principes élémentaires de l'hydrologie statistique de même qu'aux observations faites dans les chapitres précédents (variabilité importante du comportement hy-

Région	Classe de surface	$q_{5-}$	$q_{5+}$	$q_{20-}$	$q_{20+}$	$q_{50-}$	$q_{50+}$
Préalpes	Moins de $10 \text{ km}^2$	1.50	4.00	2.35	6.02	2.40	7.20
Préalpes	Entre 10 et $50 \text{ km}^2$	0.70	2.14	0.95	3.25	1.10	4.12
Préalpes	Plus de $50 \text{ km}^2$	0.3	1.2	0.40	1.60	0.45	1.87
Plateau	Moins de $10 \text{ km}^2$	0.27	1.63	0.35	2.05	0.41	2.32
Plateau	Entre 10 et $50 \text{ km}^2$	0.25	0.96	0.30	1.38	0.33	1.69
Plateau	Plus de $50 \text{ km}^2$	0.22	0.55	0.30	0.82	0.30	0.99
Jura	Moins de $10 \text{ km}^2$	0.20	0.68	0.28	1.10	0.32	1.37
Jura	Entre 10 et $50 \text{ km}^2$	0.20	0.46	0.26	0.63	0.30	0.80
Jura	Plus de $50 \text{ km}^2$	0.20	0.34	0.25	0.40	0.28	0.46

Tableau 3. «Modèle cadre régional»: plages de variation des débits spécifiques  $q_T$  (en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ) pour une région, une classe de surface et un temps de retour  $T$ .  $q_{T-}$  et  $q_{T+}$  sont respectivement les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de vraisemblance des débits spécifiques.

drologique et durée réduite des séries d'observation pour les bassins de petite taille).

La méthode utilisée pour construire ce modèle cadre conduit par nature à différentes discontinuités entre les intervalles de vraisemblance de deux classes de surfaces successives. De ce fait les bornes de l'intervalle de vraisemblance à affecter à un bassin versant dont la surface avoisine l'une des limites de ces classes de surfaces peuvent être très différentes suivant que l'on choisit d'affecter le bassin versant à la classe de surface inférieure ou supérieure.

C'est pourquoi des intervalles de vraisemblance ont également été construits pour les classes de surfaces [5, 20 km<sup>2</sup>] et [20, 200 km<sup>2</sup>] situées à cheval sur les classes de surface du tableau 3. Ils sont indiqués dans Talamba et al. (2000).

## 7. Procédure d'estimation des débits de pointe

### 7.1 Mise en place de la procédure

Pour estimer les débits de pointe d'un bassin versant situé dans la moitié occidentale de la Suisse, il est possible de proposer, sur la base des différents résultats présentés dans les paragraphes précédents, une procédure adaptée au contexte de l'étude. Elle renvoie à un système d'aide à la décision élaboré en fonction des conclusions concernant la performance des deux modèles pour les bassins versants formant l'échantillon d'étude et des informations fournies par le «modèle cadre régional».

L'expert qui aura à estimer un débit de pointe pour la région est libre de suivre ou non tout ou partie de cette procédure ou encore d'utiliser à sa convenance tout ou partie des informations dérivant de l'application de cette procédure.

Les étapes à parcourir pour la détermination du débit de pointe pour un temps de retour  $T$  sont les suivantes:

1. Attribution à une région géographique de chaque bassin versant: identification du «modèle cadre régional» approprié et détermination des paramètres régionaux pour chacun des deux modèles (méthode «index-flood» et méthode rationnelle).
2. Calcul du quantile  $Q_T$  obtenu avec la méthode «index-flood» ( $Q_{T,\text{index-flood}}$ ) et avec la méthode rationnelle ( $Q_{T,\text{rationnelle}}$ ).
3. Comparaison de chacune des estimations  $Q_{T,\text{index-flood}}$  et  $Q_{T,\text{rationnelle}}$  par rapport aux intervalles de vraisemblance donnés par le «modèle cadre régional» et calcul du quantile final  $Q_T$ . Différents cas de figure (cf. tableau 4) se présentent suivant la situation des deux estimations par rapport aux bornes  $[Q_{T-}, Q_{T+}]$  de l'intervalle de vrai-

semblance régional [m<sup>3</sup>/s] dérivées du tableau 3.

4. Présentation de l'estimation du quantile cherché pour la période de retour  $T$  sous la forme suivante:

$$[Q_T, Q_T, Q_{T+}]$$

où  $Q_T$  et  $Q_{T+}$  sont les bornes de l'intervalle de vraisemblance régional  $Q_T$  pour la région et la classe de surface où se situe le bassin concerné et où  $Q_T$  est l'estimation du quantile issue de la procédure d'aide à la décision évoquée dans le point 3.

### 7.2 Règles de décision et estimation de la valeur centrale du quantile $Q_T$

La procédure d'aide à la décision permettant de proposer une estimation finale du quantile recherché se base d'une part sur la comparaison des estimations  $Q_{T,\text{index-flood}}$  et  $Q_{T,\text{rationnelle}}$  par rapport aux bornes  $[Q_{T-}, Q_{T+}]$  (vraisemblance de l'estimation) et d'autre part sur la surface du bassin versant (domaine de validité des modèles).

En fonction de ces critères de décision, la valeur de  $Q_T$  finalement retenue peut être l'une des suivantes:

- $Q_{T,\text{index-flood}}$  (équation 2),
- $Q_{T,\text{rationnelle}}$  (équation 5),
- $Q_{T,\text{combiné}}$  (équation 8),
- $Q_{T-}$  (valeur  $q_{T-}$  du tableau 3 multipliée par la surface du bassin versant),
- $Q_{T+}$  (valeurs  $q_{T+}$  du tableau 3 multipliée par la surface du bassin versant).

Le tableau 4 présente tous les cas de figure et la valeur de  $Q_T$  correspondante. On note que pour certains de ces cas, on ne propose pas de valeurs de  $Q_T$ . Il s'agit des cas où les deux estimations sont d'un côté ou de l'autre de l'intervalle de vraisemblance régional. On ne considère alors que les bornes de l'intervalle de vraisemblance régional.

Cette procédure de décision a été appliquée sur tous les bassins versants de la région d'étude afin d'estimer pour chacun d'eux le débit de pointe de temps de retour 20 ans.

Les résultats de cette procédure sont présentés à la figure 7. Cette dernière, construite sur le même principe que la figure 6, montre une amélioration, suite à l'application de cette procédure, des estimations initiales des quantiles.

D'une manière générale, on aboutit à une estimation au moins équivalente à la meilleure des estimations données par la méthode rationnelle et la méthode index-flood.

### 7.3 Exemple d'application de la procédure d'estimation des débits de crue

A titre d'exemple, la procédure d'estimation précédente a été utilisé pour estimer le quantile de période de retour  $Q_{20}$  du bassin versant de la Baye de Montreux à Montreux:

1. Attribution à une région géographique et informations dérivées:

L'altitude du bassin versant est de 1200 mètres et sa géologie est de type préalpin. En vertu des critères d'attribution définis à la section 2 de cet article, ce bassin peut donc être affecté à la région Préalpes.

– Sachant que le bassin versant à une surface de 14 km<sup>2</sup>, l'intervalle de vraisemblance du débits de temps de retour 20 ans peut être donné par le «modèle cadre régional» (valeurs  $q_{20-}$  et  $q_{20+}$  du tableau 3 multipliées par la surface):  $[Q_{20-} = 13 \text{ m}^3/\text{s}; Q_{20+} = 46 \text{ m}^3/\text{s}]$ .

– Les paramètres régionaux des modèles de calcul de débit de pointe sont les suivants:

Méthode «index-flood»:  
facteur de croissance = 1.85

(cf. figure 4),

Méthode rationnelle:

$\beta$  régional = 20  
(cf. tableau 1).

2. Estimation du quantile  $Q_{20}$  avec les deux modèles:

En fonction des caractéristiques du bassin versant, on obtient:

Méthode «index-flood»:

$Q_{20,\text{index-flood}} = 21 \text{ m}^3/\text{s}$ ,

Méthode rationnelle:

$Q_{20,\text{rationnelle}} = 18 \text{ m}^3/\text{s}$ .

3. Estimation finale du quantile selon le tableau 4:

On se trouve dans la situation où:

$A > 10 \text{ km}^2$  et  $A < 30 \text{ km}^2$

et

$Q_{20-} < Q_{20,\text{rationnelle}} < Q_{20,\text{index-flood}} < Q_{20+}$ .

Selon le tableau 4, la valeur de  $Q_T$  à retenir est celle de  $Q_{T,\text{combiné}}$  (équation 8).

4. Présentation du quantile recherché:

On obtient donc l'estimation suivante pour le quantile  $Q_{20}$  et son intervalle de vraisemblance:

$[Q_{20-} = 13 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2;$

$Q_{20} = 19 \text{ m}^3/\text{s};$

$Q_{20+} = 46 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2]$ .

## 8. Conclusions et perspectives

Cette étude propose une méthodologie d'estimation des débits de crue résultant de la combinaison de deux modèles complémentaires, à savoir la méthode rationnelle et la méthode «index-flood». Ces deux méthodes

se distinguent par leurs domaines de validité, lié en grande partie à la taille du bassin versant. Elles ont été choisies pour leur simplicité de mise en œuvre et parce qu'elles représentent les approches empirique et statistique (régionale) les plus courantes en matière d'estimation des débits de pointe pour des bassins versants non jaugés. La méthode «index-flood» (régionale) s'avère en général plus performante que la méthode rationnelle (empirique) pour des bassins versants dont la surface excède environ  $30 \text{ km}^2$ . Pour les bassins de moins de  $10 \text{ km}^2$  en revanche, la mé-

thode rationnelle donne des résultats sensiblement meilleurs.

La méthode finale est proposée sous la forme d'une procédure globale d'estimation des débits de crue qui prend en compte à la fois les caractéristiques des bassins versants, la performance relative des deux modèles ci-dessus et l'information fournie par un «modèle cadre régional». Le modèle cadre est élaboré à l'aide de l'ensemble des données à disposition sur la région d'étude et fournit donc une connaissance a priori d'une plage de variation possible du débit de pointe

d'un bassin versant appartenant à une région géographique et à une plage de surfaces données. La procédure d'estimation des débits de crue distingue trois régions (les *Préalpes*, le *Plateau* et le *Jura*) et s'assimile à un outil d'aide à la décision permettant à l'utilisateur de valoriser son expérience et sa perception des phénomènes. Elle s'applique aux bassins versants situés en Suisse occidentale pour des surfaces jusqu'à  $500 \text{ km}^2$ .

Les résultats de l'application de cette procédure aux bassins versants de la région d'étude sont satisfaisants. Ces résultats montrent tout de même que cette procédure reste imprécise dans les zones fortement influencées par le karst, pour les bassins versants avec des caractéristiques physiographiques particulières ou fortement anthropisées. Il faut ajouter que malgré les développements proposés dans cet article, l'estimation du débit de pointe pour les petits bassins versants reste une tâche délicate. L'expérience et la visite de terrain seront toujours des éléments essentiels pour affiner l'estimation proposée. Il en va de même pour les bassins versants que l'on ne peut classer de façon évidente dans une région particulière. Il appartient au modélisateur, en fonction de sa perception des phénomènes et de sa connaissance du terrain, de choisir une pondération judicieuse entre les différentes régions et par suite entre les estimations de quantile  $Q_T$  obtenues, lorsqu'il a affaire à un tel bassin versant de transition.

Une méthode plus générale de combinaison des estimations pourrait être envisagée. En effet, le critère de surface n'est pas toujours le seul critère déterminant pour définir des pondérations entre les estimations des différents modèles. Par exemple, lorsqu'on considère des débits observés au site  $i$  dans l'estimation du quantile cherché, la longueur des séries d'observation doit être prise en compte dans la pondération. Dans cette optique, le développement d'une approche bayésienne semble intéressant. Celle-ci avait notamment été proposée par Kuczera (1982) pour combiner des données observées en un site et celles provenant d'un modèle régional. L'approche bayésienne permettra d'abord de combiner les estimations fournies par les méthodes rationnelle et la méthode «index-flood» sur la base de pondérations fonction de la variance de l'estimation donnée par ces modèles (Niggli *et al.*, 2000). Elle permettra aussi de prendre en compte et d'intégrer dans la procédure d'autres estimations du quantile cherché. Ces estimations pourraient provenir d'autres modèles, de mesures directes ou de plusieurs variantes dans la définition de certaines entrées des modèles (par exemple sur le choix de la station *IDF* représentative du

Condition sur $A$	Condition sur $Q_{T,\text{index-flood}}$	Condition sur $Q_{T,\text{rationnelle}}$	Valeur proposée pour $Q_T$
$A < 10 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} < Q_T$	$Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_T$	$Q_T$
$10 \text{ km}^2 < A < 30 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} < Q_T$	$Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_T$	$Q_T$
$30 \text{ km}^2 < A < 500 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} < Q_T$	$Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_T$	$Q_T$
$A < 10 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} > Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}} > Q_{T+}$	$Q_{T+}$
$10 \text{ km}^2 < A < 30 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} > Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}} > Q_{T+}$	$Q_{T+}$
$30 \text{ km}^2 < A < 500 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} > Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}} > Q_{T+}$	$Q_{T+}$
$A < 10 \text{ km}^2$	$Q_T < Q_{T,\text{index-flood}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_T$	$Q_{T,\text{index-flood}}$
$10 \text{ km}^2 < A < 30 \text{ km}^2$	$Q_T < Q_{T,\text{index-flood}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_T$	$Q_{T,\text{index-flood}}$
$30 \text{ km}^2 < A < 500 \text{ km}^2$	$Q_T < Q_{T,\text{index-flood}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_T$	$Q_{T,\text{index-flood}}$
$A < 10 \text{ km}^2$	$Q_T < Q_{T,\text{index-flood}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}} > Q_{T+}$	$Q_{T,\text{index-flood}}$
$10 \text{ km}^2 < A < 30 \text{ km}^2$	$Q_T < Q_{T,\text{index-flood}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}} > Q_{T+}$	$Q_{T,\text{index-flood}}$
$30 \text{ km}^2 < A < 500 \text{ km}^2$	$Q_T < Q_{T,\text{index-flood}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}} > Q_{T+}$	$Q_{T,\text{index-flood}}$
$A < 10 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} < Q_T$	$Q_T < Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}}$
$10 \text{ km}^2 < A < 30 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} < Q_T$	$Q_T < Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}}$
$30 \text{ km}^2 < A < 500 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} < Q_T$	$Q_T < Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}}$
$A < 10 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} > Q_{T+}$	$Q_T < Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}}$
$10 \text{ km}^2 < A < 30 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} > Q_{T+}$	$Q_T < Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}}$
$30 \text{ km}^2 < A < 500 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} > Q_{T+}$	$Q_T < Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}}$
$A < 10 \text{ km}^2$	$Q_T < Q_{T,\text{index-flood}} < Q_{T+}$	$Q_T < Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}}$
$10 \text{ km}^2 < A < 30 \text{ km}^2$	$Q_T < Q_{T,\text{index-flood}} < Q_{T+}$	$Q_T < Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_{T+}$	$Q_{\text{combiné}}$
$30 \text{ km}^2 < A < 500 \text{ km}^2$	$Q_T < Q_{T,\text{index-flood}} < Q_{T+}$	$Q_T < Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_{T+}$	$Q_{T,\text{index-flood}}$
$A < 10 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} < Q_T$	$Q_{T,\text{rationnelle}} > Q_{T+}$	<i>Pas d'estimation de <math>Q_T</math></i>
$10 \text{ km}^2 < A < 30 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} < Q_T$	$Q_{T,\text{rationnelle}} > Q_{T+}$	<i>Pas d'estimation de <math>Q_T</math></i>
$30 \text{ km}^2 < A < 500 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} < Q_T$	$Q_{T,\text{rationnelle}} > Q_{T+}$	<i>Pas d'estimation de <math>Q_T</math></i>
$A < 10 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} > Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_T$	<i>Pas d'estimation de <math>Q_T</math></i>
$10 \text{ km}^2 < A < 30 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} > Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_T$	<i>Pas d'estimation de <math>Q_T</math></i>
$30 \text{ km}^2 < A < 500 \text{ km}^2$	$Q_{T,\text{index-flood}} > Q_{T+}$	$Q_{T,\text{rationnelle}} < Q_T$	<i>Pas d'estimation de <math>Q_T</math></i>

Tableau 4. Règles de décision en fonction du domaine de validité des modèles et en fonction de la vraisemblance des estimations.

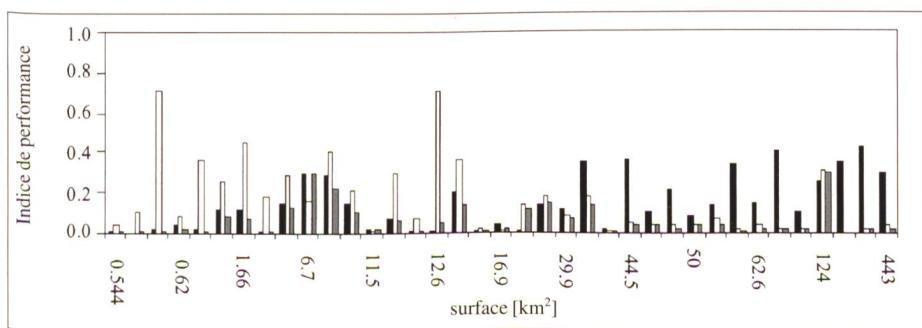


Figure 7. Indices de performance individuels obtenus pour les bassins versants après l'application de la procédure décrite dans cette section (en blanc: la méthode «index-flood»; en noir: la méthode rationnelle; en gris: la méthode selon les règles de décision du tableau 4).

bassin à traiter). Les méthodes appliquées en Suisse comme celles décrites dans *Bacchi et al.* (1989), *Kölla* (1986), de *Forster* (1992), *Düster* (1994), *Weingartner et Manser* (1996) ou *Piöck-Ellena* (2000) pourront ainsi par exemple être considérées. Enfin, l'approche bayesienne s'affranchit de la notion de région «homogène» avec une délimitation fixe, ce qui permettrait de mieux traiter les bassins versants dont l'affectation à l'une des trois régions mentionnées ci-dessus est délicate. Cette approche révèle donc tout son intérêt pour cette problématique et devrait permettre d'accroître considérablement le potentiel de la méthode proposée ici.

#### Remerciements

Cette étude a été financièrement soutenue par le Service des Eaux, Sols et Aménagement (SESA) du canton de Vaud. Elle a bénéficié de l'apport scientifique du Dr. David Consuegra, ancienement à l'Institut de l'Aménagement des Terres et des Eaux (IATE) et actuellement au bureau HYDRONAT S.A. à Vétroz VS. Les contributions du Dr. Pierre-André Causaz, du Dr. Marc Soutter, du Dr. Olivier Overney et de M. Eric Vez (tous à l'IATE au moment de l'étude), ainsi que de M. Philippe Hohl (SESA), sont également à souligner. Enfin nos remerciements vont à l'Office Fédéral de la Topographie, à l'Office Fédéral des Statistiques, au Service Hydrologique et Géologique National et aux divers services cantonaux concernés (Vaud, Genève, Berne, Argovie, Soleure et Bâle-Campagne), qui nous ont fourni les données nécessaires à l'élaboration de la méthodologie proposée dans cet article.

#### Références

- Ahmad M. I., Sinclair C. D., Spurr B. D., 1988. Assessment of Flood Frequency Models Using Empirical Distribution Function Statistics, Water Resources Research, vol. 24 (8), pp. 1323–1328.
- ASCE, 1996. Handbook of Hydrology, second edition, Manuals and Reports on Engineering Practice No. 28.
- Atlas de la Suisse, 1965–1978. Edition du Service topographique fédéral, Berne.
- Bacchi B., Rosso R., Adom D., 1989. On the geomorphologic derivation of flood frequency (peak and volume) at the basin and regional scale, New Directions for Surface Water Modelling, Proceedings of the Baltimore Symposium, IAHS Publ. No. 181, pp. 165–176.
- Chow V. T., Maidment D. R., Mays L. W., 1988. Applied Hydrology, McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series.
- Chowdhury J. U., Stedinger J. R., Li-Hsiug Lu., 1991. Goodness-of-fit Tests for Regional Generalized Value Flood Distributions, Water Resources Research, vol. 27 (7), pp. 1765–1776.
- Cunnane C., 1989. Statistical distributions for flood frequency analysis, World Meteorological Organization, Operational hydrology report No. 33 (WMO No. 718), Geneva.
- Dalrymple T., 1960. Flood Frequency analysis, Manual of Hydrology, Pt 3, US Geological Survey.
- Draper N. R., Smith H., 1981. Applied regression analysis, Second edition, John Wiley & Sons, New York.
- Düster H., 1994. Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz, Geographica Bernesia, G44, Geographisches Institut der Universität Bern.
- Forster F., 1992. Hochwasserabflüsse in kleinen Einzugsgebieten, WSL, Forstliche Hydrologie.
- Grebner D., Rösch T., Schwab M., 1992. Extreme Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1981–1993, Atlas Hydrologique de la Suisse, Service Hydrologique et Géologique National, Bern.
- GREHYS, 1996. Inter-comparison of regional flood frequency procedures for Canadian rivers, Journal of Hydrology, vol. 186, 85–103.
- Hosking J. R., 1990. L-moments: analysis and estimation of distribution using linear combinations of order statistics, Journal of Royal Statistical Society, serie B, vol. 52 (1), pp. 105–124.
- Jensen H., Lang H., Rinderknecht J., 1992. Extreme Punktreignisse unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970, Atlas Hydrologique de la Suisse, Service Hydrologique et Géologique National, Bern.
- Kuczera G., 1982. Effect of sampling uncertainty and spatial correlation for combining site and regional procedure, Journal of Hydrology, 65, pp. 373–398.
- Kölla E., 1986. Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen, Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich.
- Maidment D. R., 1993. Handbook of Hydrology, McGraw-Hill, United States of America.
- Meylan P., Musy A., 1998. Hydrologie fréquentielle, IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
- Mulvaney, 1851. On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relation of rainfall and floods discharges in a given catchment, Proceedings of the Civil Engineers of Ireland, 4, pp. 18–31.
- Musy A., Higgi C., 1998. Hydrologie appliquée, IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
- Naef F., 1983. Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen, Zwischenbericht NF-Projekt «Abschätzung der Abflüsse in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen», Zürich.
- Niggli M., Consuegra D., Causaz P. A., Vez E., 1998. Régionalisation des débits de pointe du canton de Vaud, Projet GESREAU, Rapport IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
- Niggli M., Talamba D., Hingray B., Musy A., 2000. Regionalisation of annual floods – a mixed regional method adapted to western Switzerland, American Geophysical Union, Fall Meeting, San Francisco.
- Piöck-Ellena U., Pfaundler M., Blöschl G., Burland P., Merz R., 2000. Saisonalanalyse als Basis für die Regionalisierung von Hochwässern, wasser, energie, luft, 1–2, pp. 13–21.
- Rasmussen P. F., Bobée B., Bernier J., 1994. Une méthodologie générale de comparaison de modèles d'estimation régionale de crue, Revue des Sciences de l'eau, No. 7, pp. 23–41.
- Röthlisberger G., Geiger H., Zeller J., 1979, 1981, 1992. Starkniederschläge in der Schweiz, Band 4–9, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Birmensdorf.
- Stedinger J. R., Tasker G. D., 1985. Regional hydrological analysis. 1. Ordinary, weighted, and generalized least square compared. Water Resources Research, 21 (9), pp. 1421–1432.
- Spreafico M., Weingartner R., Leibundgut C., 1992. Atlas hydrologique de la Suisse, Institut de Géographie de Berne, Editions du Service Hydrologique et Géologique National, Berne.
- Talamba D., Niggli M., Hingray B., Musy A., 2000. Méthode de régionalisation des débits de pointe pour les bassins versants du canton de Vaud, Projet GESREAU, Rapport IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
- Weingartner R., Manser S., 1997. Möglichkeiten und Grenzen der Hochwasserabschätzung in kleineren schweizerischen Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen, wasser, energie, luft, 5/6, pp. 131–138.

<sup>1</sup> A titre de valeurs purement indicative, on relèvera les indications de *Duster* (1994) qui considère comme «petits» les bassins versants jusqu'à 10 km<sup>2</sup> et «moyens» ceux dont la surface est comprise entre 10 km<sup>2</sup> et 200 km<sup>2</sup>. *Maidment* (1993) suggère quant à lui des valeurs de 25 km<sup>2</sup> et de 500 km<sup>2</sup> pour les limites supérieures des bassins versants respectivement de petite taille et de taille moyenne.

<sup>2</sup> La longueur du cours d'eau principal ou celle de bassin versant doit être ici interprétée comme un indicateur de l'allongement du bassin versant et non de la densité du réseau hydrographique. Dans ces formules, une valeur importante de la longueur implique une valeur du temps de concentration importante.

#### Adresse des auteurs

M. Markus Niggli, Mme Daniela Talamba, Dr. Benoît Hingray et Prof. André Musy, de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux, CH-1015 Lausanne.