

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 90 (1998)
Heft: 9-10

Artikel: Application au bassin versant supérieur du Rhône
Autor: Consuegra, David / Niggli, Markus / Musy, André
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939405>

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: 10.02.2026

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

Concepts méthodologiques pour le calcul des crues

Application au bassin versant supérieur du Rhône

David Consuegra, Markus Niggli et André Musy

Résumé

Cet article présente les principaux résultats des activités menées dans le cadre du projet *Consecru* par l'unité hydrologie et aménagement de l'Institut de l'aménagement des terres et des eaux (IATE/HYDRAM) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Ce projet, initié par le Conseil d'Etat du canton du Valais dans le but de prévenir et d'évaluer les conséquences de crues extrêmes dans le Rhône, fait suite aux inondations catastrophiques de septembre 1993 dans le Haut-Valais et à Brigue plus particulièrement. La contribution de l'IATE/HYDRAM consiste à développer une méthodologie capable de produire des hydrogrammes de crue le long du Rhône entre Reckingen et Branson ainsi qu'à l'exutoire de ses affluents principaux, comme la Vièze. Les scénarios de crues correspondent à des conditions dites «naturelles», c'est-à-dire sans influence des aménagements hydro-électriques. C'est en couplant une modélisation hydrologique déterministe à un générateur stochastique des précipitations que l'IATE/HYDRAM est parvenu à satisfaire les objectifs posés. Les questions liées à l'abattement spatial des pluies ont été résolues grâce à une collaboration efficace avec l'Institut de géographie de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich (GIETHZ). Les catalogues d'hydrogrammes produits par la méthodologie proposée constituent les bases de dimensionnement de projets liés à la cartographie des risques d'inondation ou encore à l'estimation du potentiel d'écritage des crues de certains barrages. A ce titre, cette communication présente succinctement les résultats d'une application à la retenue de Mattmark où il était question d'évaluer l'impact de ce barrage sur les crues de la Vièze à Vièze.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeigt die Hauptresultate der Aktivitäten des «Institut de l'aménagement des terres et des eaux, unité hydrologie et aménagement (IATE/HYDRAM)» der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne im Rahmen des Projektes *Consecru*. Das Projekt wurde vom Staatsrat des Kantons Wallis nach den katastrophalen Hochwasserereignissen im September 1993

im Oberwallis, besonders im Simplon-gebiet und im Saastal, eingeführt. Das IATE/HYDRAM wurde beauftragt, eine Methodologie zu entwickeln, die die Hochwasserganglinie entlang der Rhone zwischen Reckingen und Branson ebenso wie beim Auslauf der Vispa erzeugt. Die Hochwasserszenarien entsprechen «natürlichen» Bedingungen (das heißt ohne Beeinflussung durch Speicherwerkwerke) und wurden basierend auf einem auf die Ereignisse von 1987 und 1993 kalibrierten hydrologischen Modell produziert. Die Simulation der Niederschläge erfolgte nach einer lokalen Erzeugung des Regens mit dem stochastischen Niederschlagsmodell Neyman-Scott Rectangular Pulses Model (NSRPM) und einem Niederschlagsschema des Geographischen Institutes der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (GIETHZ). Das Niederschlagsschema entspricht einer mittleren Mengenverteilung der wirkungsvollsten Niederschlagsfelder, die südalpin zentrierte, ins Wallis übergreifende Ereignisse sind. Die Nebenbedingungen (Gletscherabflüsse, Schneegrenze) wurden ebenso in der Simulation beachtet. Die Methodologie wurde durch seine Eignung, die beobachteten statistischen Hochwasserverteilungen zu reproduzieren, bestätigt. Der Hauptvorteil der vorgestellten Methodologie gegenüber den statistischen Methoden ist die Gelegenheit, nicht nur Hochwasserprojektwerte, sondern auch komplett Abflussganglinien mit verschiedenen Wassermengen zu versorgen. Die Abflussganglinienszenarien, die durch die Methodologie erzeugt werden, bilden die Bemessungsgrundlagen für Projekte wie Überflutungsgefahren-Kartierung oder Schätzung der Abflussminderung unterhalb eines Speicherwerkwerkes. In dieser Hinsicht werden auch in diesem Beitrag die Ergebnisse einer Studie im Einzugsgebiet Vispa vorgestellt, wo sich die Frage stellte, was für Einflüsse der Speicher Mattmark und die Ableitung nach Grande-Dixence auf die Hochwässer der Vispa in Visp haben.

1. Introduction

L'estimation des crues de fréquence rare, voire extrême, fait trop souvent appel à des méthodes empiriques ou statistiques ne fournissant qu'une esti-

mation d'un débit de pointe uniquement alors que la connaissance de l'hydrogramme complet de crue est souvent indispensable. C'est le cas par exemple, des projets liés à la cartographie des dangers d'inondation dans le cadre de la 3^e correction du Rhône en Valais ou encore de ceux visant à estimer le potentiel des grands barrages à écrêter les crues. De plus, les méthodes statistiques (Bérood et Consuegra, 1995) appliquées aux débits observés à différents points du Rhône et de ses affluents principaux avant et après la construction des aménagements hydro-électriques ne sont pas toujours en mesure d'estimer de manière satisfaisante la fréquence d'apparition de crues rares comme celles d'août 1987 et de septembre 1993. Il est donc apparu nécessaire d'explorer des approches alternatives.

La modélisation hydrologique à caractère conceptuel et déterministe ouvre des perspectives intéressantes puisqu'à partir d'une phase de calibration permettant de quantifier les apports individuels des affluents principaux et de déterminer des paramètres représentatifs, on est en mesure d'extrapoler le comportement pour d'autres précipitations importantes, voire plus critiques que celles des épisodes d'août 1987 et de septembre 1993. Compte tenu des nombreuses sources d'incertitudes dans l'estimation des crues de projet et dans l'évaluation de leurs conséquences, cette étude part du principe qu'il n'est pas possible de considérer un seul et unique hydrogramme de projet dont toutes les caractéristiques ont un temps de retour identique. Tout comme il n'est pas raisonnable d'attribuer à un débit de pointe le temps de retour de la pluie qui le génère, il n'est pas non plus envisageable de transférer ce temps de retour au volume total de l'hydrogramme de crue. C'est pourquoi nous avons opté pour une méthodologie capable de fournir un large éventail d'hydrogrammes avec des propriétés statistiques communes mais avec des structures temporelles et spatiales différentes. Les ingénieurs pourront donc effectuer des études comparatives et mesurer la sensibilité de leur dimensionnement aux différentes combinaisons probables entre débit et volume de projet.

L'objectif principal de cette étude est donc de développer une méthodologie capable de produire des hydrogrammes de crue le long du Rhône et à l'exutoire de ses affluents principaux. Par ailleurs, la méthodologie doit être apte à fournir des estimations vraisemblables des débits de pointe jusqu'à des temps de retour de 100 ans ainsi que les intervalles de confiance correspondants.

2. Caractéristiques des bassins versants

Le périmètre d'étude couvre une surface d'environ 3750 km² (cf. tableau 1). La modélisation hydrologique de surfaces de cet ordre de grandeur n'est envisageable que sur la base d'un découpage en sous-bassins relativement grossier avec des unités de l'ordre de 50 km². Une valeur plus petite conduirait à un nombre de surfaces tributaires difficile à gérer et à paramétriser alors que des surfaces plus grandes ne permettraient pas d'isoler les apports à certains grands barrages comme celui de Mattmark. L'altitude élevée des bassins versants requiert la prise en considération de phénomènes comme les chutes de neige et les apports des glaciers. Le relief marqué du secteur d'étude demande également la détermination de la distribution spatiale des précipitations, puisque les pluies ponctuelles prises individuellement sont très peu représentatives des conditions moyennes prévalant sur l'ensemble du secteur d'étude.

3. Etude pluviométrique

Les crues importantes comme celles d'août 1987 et de septembre 1993 sont le résultat de fronts pluvieux débordant du sud des Alpes, accompagnés de précipitations intenses sur

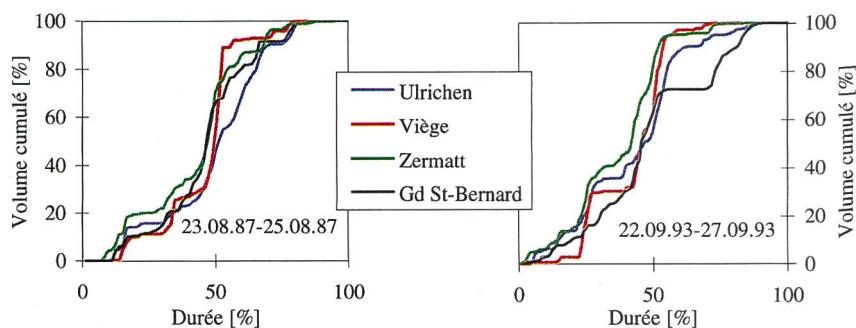


Figure 1. Structures des pluies mesurées aux stations pluviométriques d'Ulrichen, Viège, Zermatt et Grand-Saint Bernard pendant les événements d'août 1987 et de septembre 1993.

des durées de un à plusieurs jours. Pour des épisodes de ce type, les pluies se concentrent principalement sur les bassins de la rive gauche du Rhône, en particulier sur celui de la Viège. Les précipitations maximales sont localisées autour de l'axe Binn-Simplon. Le tableau 2 montre que cette situation météorologique, appelée «Binn-Simplon», se produit fréquemment. Elle est à l'origine des crues les plus importantes du Rhône en Valais et de la Viège. Ces dernières se produisent le plus souvent pendant les mois d'août et de septembre.

Par ailleurs, la figure 1 montre que la distribution temporelle des intensités horaires pendant les événements de type «Binn-Simplon» varie relativement peu dans l'espace. La production de scénarios de précipitations peut donc exploiter cette homogénéité apparente au niveau de la distribution temporelle des intensités des pluies et s'appuyer sur les enregistrements pluviométriques du Simplon, à partir desquels il faudra procéder à l'abattement des volumes précipités.

Un schéma d'abattement représentatif des situations «Binn-Simplon» a pu être identifié par le GIETHZ (cf. figure 2). Il correspond à une pluie

d'une durée équivalente à 48 heures. Les schémas d'abattement des événements de 1987 et 1993, également fournis par le GIETHZ sont des cas particuliers du schéma de la figure 2. Les précipitations étaient alors plus concentrées à l'est, dans la région de Mattmark et du Simplon avec un abattement nettement plus prononcé en direction de l'ouest (Zermatt) et du nord-ouest (Viège).

Pour produire des scénarios de précipitation à la station du Simplon, l'IATE/HYDRAM a utilisé le modèle à pulsations rectangulaires de Neyman-Scott, dit «NSRPM» (Cowpertwait, 1991, et Favre, Consuegra, Overney, 1997). NSRPM est calé de façon à reproduire les moyennes, les variances et les autocorrelations du processus pluviométrique et ceci à différents pas de temps. Le modèle NSRPM s'appuie sur une représentation conceptuelle de la pluie en averses séparées par des intervalles secs. Comme l'illustre la figure 3, une averse est constituée de plusieurs cellules rectangulaires définies par une origine temporelle, une durée et une intensité. Les cinq paramètres du modèle, qui s'expriment analytiquement à partir des moments de premier et second ordre et des autocorrelations entre deux pas de temps successifs, sont les suivants: le taux moyen d'occurrence des averses λ , l'intensité moyenne μ_x , la durée moyenne η des cellules, la position moyenne β des cellules et le nombre moyen de cellules μ_c . Il s'agit des espérances mathématiques des variables L, X, E, B et C respectivement. Ces cinq variables, qui suivent des distributions exponentielles, géométriques ou poissonnières, sont générées aléatoirement et de manière indépendante.

La station du Simplon ne dispose que de données journalières. Cette résolution temporelle est trop grossière pour modéliser les crues du Rhône, où un pas de temps horaire est

Tableau 1: Caractéristiques des bassins versants étudiés tirés des annuaires du Service Hydrologique et Géologique National (SHGN).

Bassin versant	Superficie	Glaciation	Altitude moyenne
Rhône à Branson	3750 km ²	15%	2250 m
Rhône à Sion	3350 km ²	20%	2300 m
Rhône à Brigue	915 km ²	25%	2400 m
Rhône à Reckingen	215 km ²	20%	2300 m
Viège à Viège	780 km ²	30%	2650 m

Tableau 2: Périodes d'apparition des débits de pointe maximaux annuels à Sion (Qp Sion) et situation météorologique associée. La classification des situations météorologiques a été élaborée par le GIETHZ.

Année	Mois	Qp Sion [m ³ /s]	Situation météorologique
1993	Septembre	830	Type Binn/Simplon
1987	Août	775	Type Binn/Simplon
1994	Septembre	540	Type Binn/Simplon
1986	Juillet	515	Type Sépey/Diablerets
1992	Juin	510	Type Binn/Simplon
1991	Septembre	480	Type mixte
1981	Septembre	470	Type Binn/Simplon

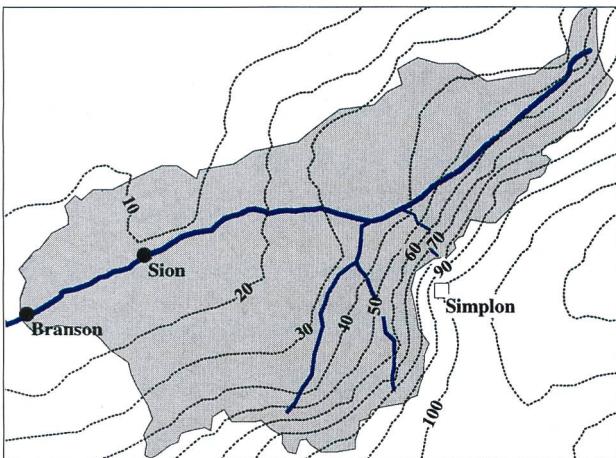


Figure 2. Bassin versant du Rhône à Branson et schéma d'abattement des situations «Binn/Simplon» pour des pluies de 48 heures. Les valeurs des isolignes (en pointillés) représentent l'abattement en % des pluies ponctuelles générées à la station de Simplon.

plus raisonnable. C'est par le biais d'une étude pluviométrique régionale effectuée en collaboration avec le GIETHZ (Niggli, Consuegra & Bérod, 1997) que les données horaires nécessaires au calage de NSRPM ont été obtenues. La figure 4 montre que NSRPM est en mesure de reproduire les distributions observées des précipitations maximales. Il est important de rappeler que les précipitations maximales observées n'ont pas été utilisées pour le calage de NSRPM. Il s'agit donc d'une véritable validation du générateur stochastique de pluies. Des exemples de hyéogrammes générés par NSRPM et susceptibles de produire des crues importantes sont présentés à la figure 5.

La figure 6 compare pour les mois d'août et septembre, les pluies maximales sur 48 heures aux stations de Zermatt et d'Oberwald (respectivement dans le bassin de la Viège et dans celui du Rhône à Brigue). Les valeurs synthétiques sont produites en couplant le générateur ponctuel avec le schéma d'abattement représentatif du GIETHZ. Compte tenu des incertitudes sur les valeurs observées, ces

résultats sont très satisfaisants. La démarche adoptée pour la génération de scénarios de précipitations sur le bassin versant du Rhône jusqu'à Branson se révèle donc tout à fait adaptée et vraisemblable puisqu'elle est en mesure de préserver la cohérence spatiale et temporelle des précipitations dans la région. A notre connaissance, il n'existe pas en Suisse d'études analogues et cette approche peut être considérée comme une première nationale.

4. Modélisation hydrologique

La recherche d'un outil hydrologique adapté aux conditions alpines a conduit au développement d'un code de calcul baptisé SOCONT (Bérod, 1995). Il s'agit d'un modèle avec un réservoir non linéaire pour la fonction de production et une approche inspirée des ondes cinématiques pour la fonction de transfert. Un schéma du modèle est donné à la figure 7. La pluie totale P est répartie en pluie nette P_{net} et en pluie infiltrée P_{inf} selon l'état de remplissage S du réservoir sol. Le réservoir sol est alimenté par P_{inf} et se

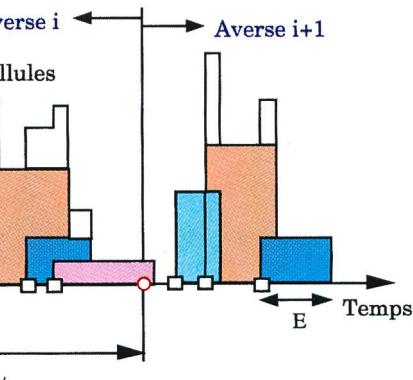


Figure 3. Représentation du processus pluviométrique par NSRPM (Favre, Consuegra et Overney, 1997).
L: Temps entre origines.
B: Position de la cellule.
E: Durée de la cellule.
C: Nombre de cellules.
X: Intensité de la cellule.

vide par évapotranspiration réelle ETR et par un débit de base Q_{base} . ETR est lié à l'évapotranspiration potentielle ETP et au stock S . Le débit de base ne dépend que de l'état de remplissage du réservoir sol.

La fonction de production adoptée a trois paramètres: la constante de récession en tarissement pur K exprimée en $[h^{-1}]$, la valeur maximale du stock d'eau dans le sol A exprimée en $[mm]$ et l'exposant x , dont la valeur a été fixée à 2, selon les recommandations d'études antérieures (Consuegra & Vez, 1996). La fonction de transfert utilisée est un réservoir non linéaire résultant de la combinaison d'une loi de frottement empirique (de type Manning-Stickler) et de l'équation de continuité. Le débit rapide (qui doit être ajouté au débit de base pour fournir le débit total) est exprimé par:

$$Q_{rapide} = \frac{W \cdot p^{1/2}}{n} \cdot P_{net}^{5/3}$$

Le bassin versant est schématisé par un plan de largeur W [en m], de pente p et de coefficient de rugosité de Manning n . En zone rurale, la détermination de la largeur et de la rugosité est problématique. Ainsi nous préférons formuler l'expression de la loi de vidange uniquement en fonction de la pente du sous-bassin et d'un paramètre à calibrer, β . Il faut remarquer que β n'est pas dépourvu d'unités. Ainsi, tout changement de schématisation entraînera une modification de la valeur de ce paramètre. Le débit rapide devient alors:

$$Q_{rapide} = \beta \cdot p^{1/2} \cdot P_{net}^{5/3}$$

Les aménagements hydro-électriques, construits dans les années 50, ont passablement modifié le régime hydrologique des bassins versants de

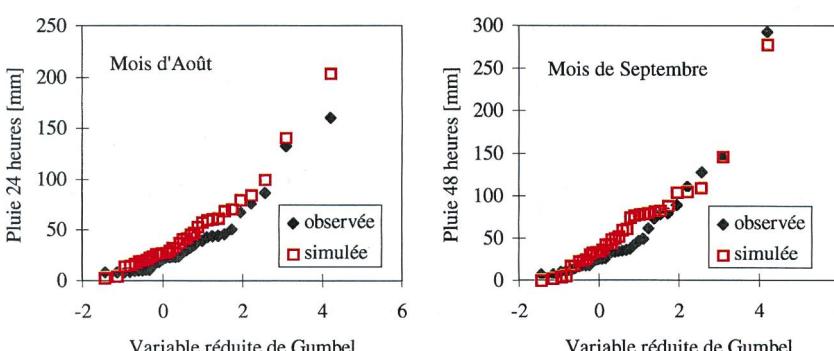


Figure 4. Comparaison des pluies maximales observées au Simplon et simulées par NSRPM (période: 1961–1994). Deux cas sont présentés ici: les maxima mensuels des pluies journalières pendant le mois d'août et les maxima mensuels des pluies 48 heures pendant le mois de septembre.

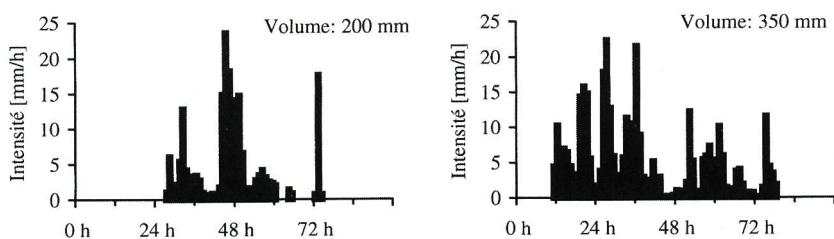


Figure 5. Exemples de hyetogrammes synthétiques générés par NSRPM.

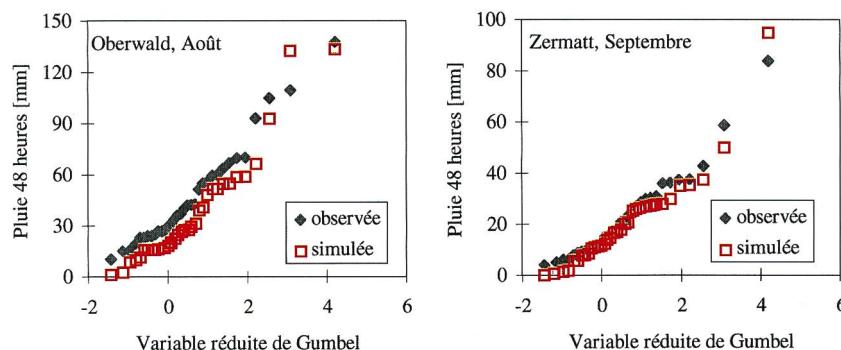


Figure 6. Pluies maximales sur 48 heures observées et simulées (génération par NSRPM à Simplon et abattement selon schéma «Binn-Simplon»). Deux cas sont présentés ici: les maxima mensuels à Oberwald pendant le mois d'août et les maxima mensuels à Zermatt pendant le mois de septembre.

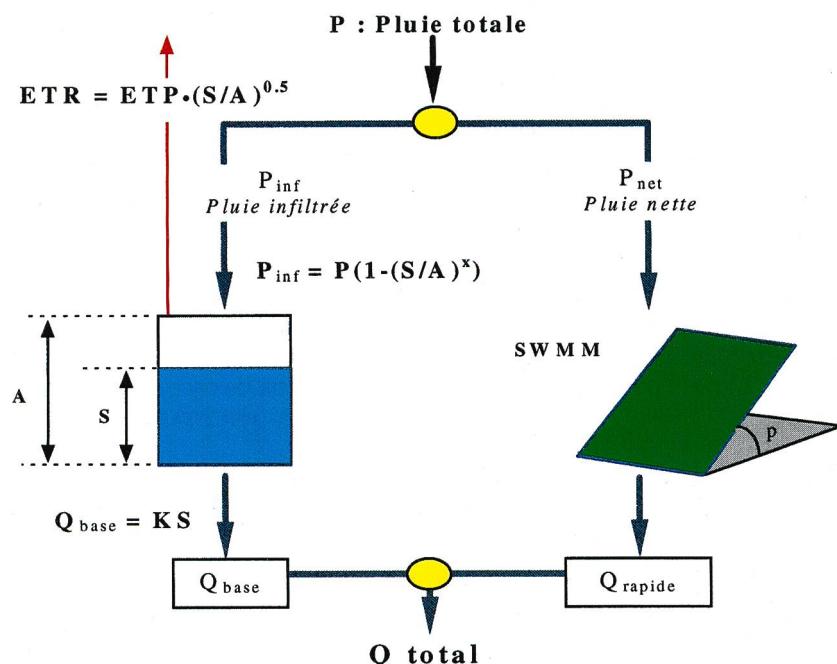


Figure 7. Représentation schématique du modèle SOCONT.
Surface: Sb. Manning: n. Largeur: W. Pente: p.

la région. Or c'est uniquement pour les événements majeurs d'août 1987 et de septembre 1993 que l'on retrouve un historique détaillé des dérivations et des apports des barrages (Biedermann *et al.*, 1996). La calibration du modèle hydrologique ne peut donc être effectuée que sur les hydrogrammes observés pendant ces deux événements uniquement. Par ailleurs, une part non négligeable du débit de base est constituée par de la fonte de glacier, surtout pour l'événement

d'août 1987. Compte tenu de la nature des équations du modèle hydrologique, la calibration ne peut être effectuée qu'à partir d'hydrogrammes observés débarrassés de leur composante glaciaire. Cette dernière peut être estimée à partir des débits spécifiques de base observés de la Massa à Blatten qui est un bassin essentiellement glaciaire avec un taux de glaciation de 70 %. Les distributions spatio-temporelles des précipitations d'août 1987 et de septembre 1993 sont celles

fournies par le GIETHZ. Les limites des chutes de neige, partageant les fractions liquides et solides des précipitations pendant ces deux événements, résultent d'une analyse régionale des gradients de température (Niggli, Consuegra, Bérod, 1997).

La technique d'optimisation utilisée (dite des «surfaces de réponse») consiste à représenter dans l'espace des paramètres du modèle, les variations d'une erreur qu'il s'agit de minimiser. La fonction critère est celle des moindres carrés avec une valeur «seuil» en-dessous de laquelle l'erreur n'est pas calculée. En combinant pour chaque exutoire les deux surfaces de réponse obtenues (pour 1987 et 1993), on obtient une surface d'erreur globale indiquant approximativement la plage dans laquelle on trouve les optimums des paramètres (cf. tableau 3). Le paramètre K , dont la détermination en simulation événementielle ne nécessite pas une grande précision, a été estimé à $0,0025 \text{ h}^{-1}$ sur la base des courbes de récession de quelques hydrogrammes observés. Pour estimer les paramètres A et β , on procédera à la calibration de SOCONT uniquement à l'exutoire des principaux affluents contribuant aux crues extrêmes du Rhône, à savoir le Rhône à Brigue et la Viège à Viège. Dans la plupart des cas, le cumul des apports respectifs en période de crues équivaut en effet à environ 80 % du débit total à Branson. Les hydrogrammes mesurés à d'autres points de calcul seront ensuite utilisés pour améliorer les estimations locales du paramètre A . On garantit ainsi que les débits simulés sont cohérents dans l'espace et que leur somme hydrologique est compatible avec celle observée aux différents exutoires. Le tableau 3 montre que la fourchette de valeurs optimales est relativement large.

Les valeurs du paramètre A , issues de la calibration du modèle sur le Rhône à Brigue sont aptes à simuler les hydrogrammes observés à Sion et à Branson. Il est par contre nécessaire d'apporter un facteur correctif d'environ 0,7 à Reckingen pour obtenir des volumes ruisselés proches de ceux observés. En fixant la valeur de β à 20 000 (valeur raisonnable au vu des résultats du calage), les valeurs suivantes sont obtenues:

Tableau 4. Valeurs définitives du paramètre A (avec $\beta = 20 000$).

Bassin versant	Valeur de A [mm]
Rhône à Reckingen	140
Rhône à Brigue	200
Viège à Viège	130
Rhône à Sion	210
Rhône à Branson	220

Tableau 3. Gamme des paramètres optimaux pour le Rhône à Brigue et la Vièze à Vièze.

Bassin versant	Gamme des A optimaux [mm]	Gamme des β optimaux
Rhône à Brigue	190–250	10 000–35 000
Vièze à Vièze	80–130	5 000–25 000

vantes de A sont jugées acceptables sur tout le secteur d'étude.

La figure 8 illustre le résultat du calage pour le Rhône à Brigue et la Vièze à Vièze. Les simulations sont satisfaisantes avec le jeu de paramètres proposé au tableau 4. Il en va de même pour les autres bassins versants (Rhône à Reckingen, Sion et Branson).

5. Production de scénarios de crue

La méthodologie adoptée reprend l'ensemble des éléments décrits plus haut avec l'étude des précipitations et le calage du modèle hydrologique. La figure 9 illustre la démarche adoptée. Le modèle NSRPM est utilisé pour produire des hyéogrammes de projet à pas de temps horaire, qu'il faut ensuite abattre spatialement avec le schéma représentatif du GIETHZ. Pour distinguer les pluies liquides des pluies solides, on attribue à chaque épisode pluvieux, un isotherme (ou limite des chutes de neige) tiré aléatoirement d'une distribution empirique dérivée des observations pendant les mois d'août et de septembre. Pour initialiser le modèle hydrologique, on associe de manière aléatoire un débit de base initial à chaque hyéogramme généré. Tout comme pour les isothermes, cette attribution se fait selon une distribution empirique déduite des observations pendant la période qui nous occupe. Une approche équivalente est adoptée pour les apports d'origine glaciaire. A l'hyéogramme de crue produit par le modèle hydrologique, on ajoute une valeur aléatoire tirée d'une distribution empirique dérivée des enregistrements du glacier de la Massa à Blatten. L'apport glacier est bien évidemment modulé en fonction du taux de glaciation de chaque sous-bassin versant.

Une durée de génération de 120 ans a été choisie. Ce choix constitue un compromis raisonnable entre les objectifs recherchés (déterminer des hydrogrammes de projet jusqu'à des temps de retour d'environ 100 ans) et les incertitudes liées à la modélisation des pluies et des débits. Pour éviter les écueils inhérents à l'échantillonnage de type Monte-Carlo, 100 séries (de 120 ans chacune) ont été générées. Selon les applications illustrées dans la suite de cette communication, on affichera soit quelques échantillons

pris individuellement parmi les 100 générés, soit des valeurs médianes calculées à partir des 100 réalisations.

La méthodologie proposée a été validée sur la base de ses aptitudes à reproduire les statistiques des débits maximaux observés. En présence de non-stationnarités provoquées par les aménagements hydro-électriques (Rhône à Sion et à Branson et Vièze à Vièze), l'analyse ne portera que sur la période qui précède la construction de ces ouvrages. Les débits de pointe des événements d'août 1987 et de septembre 1993, reconstitués par l'Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE) en conditions dites «naturelles», sont également pris en considération à titre de «valeurs historiques» (Biedermann et al., 1996). Pour les séries du Rhône à Reckingen et à Brigue, peu influencées par les barrages, la comparaison portera sur toute la période de mesure.

L'aptitude de la méthodologie à produire des courbes «volumes – débits seuils» consistantes a également été vérifiée. Ces courbes sont obtenues en intégrant le volume de l'hyéogramme au-dessus d'un débit seuil continuellement atteint ou dépassé et peuvent être construites pour des hydrogrammes présentant des propriétés spécifiques, comme par exemple un débit de pointe centennal. On peut en déduire un volume de débordement au droit de sections de

cours d'eau dont la capacité maximale d'écoulement est assimilable à un débit «seuil». Il peut également s'agir de volumes de rétention nécessaires pour réduire les crues à des valeurs admissibles plus en aval. Il s'agit bien évidemment d'un calcul approximatif de rétention puisque le débit de sortie est considéré dans ce cas comme constant et donc indépendant de la charge hydraulique. Ces comparaisons n'ont été effectuées que sur des bassins versants sans influence majeure des aménagements hydro-électriques, à savoir le Rhône à Brigue (910 km²) et la Vièze de Saas à Mattmark (37 km²), en amont de la retenue.

6. Statistiques des débits maximaux

Les débits de pointe observés pendant les mois d'août et de septembre sur l'ensemble des bassins versants cités plus haut ont fait l'objet d'une analyse fréquentielle. Les fréquences empiriques sont calculées selon la formule de Gringorten (Meylan & Musy, 1996) pour les séries sans valeurs historiques, et avec la formule de Hirsch (Hirsch, 1987) dans les autres cas. Ces formules de positionnement ont déjà été utilisées dans le cadre de Conse-cru (Bérod et Consuegra, 1995). 100 séries tronquées de débits maximaux simulés ont été constituées, chacune correspondant à une période de 120 ans. La formule de positionnement est également celle de Gringorten annualisée par la relation de Langbein-Takeuchi (Meylan & Musy, 1996). Pour un temps de retour donné, le débit retenu

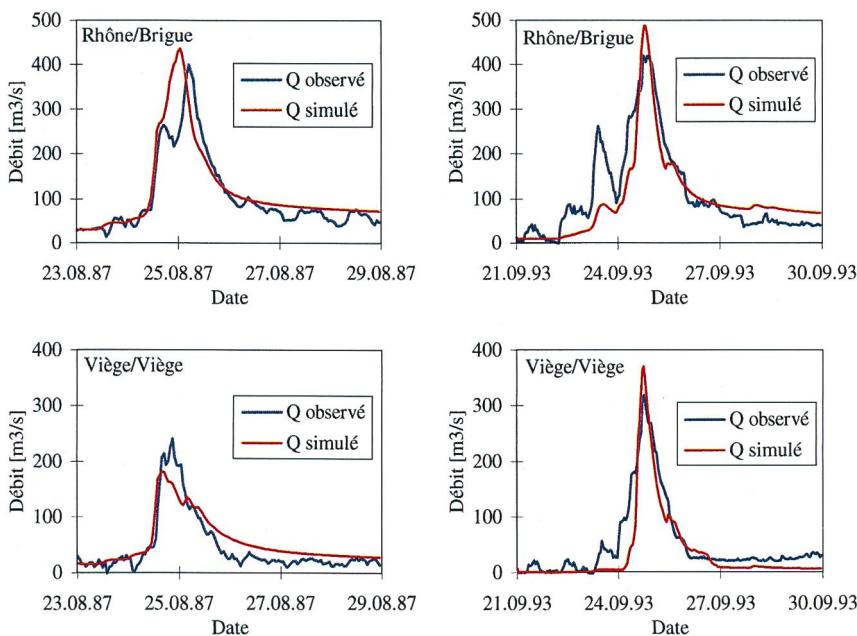


Figure 8. Hydrogrammes observés et simulés pour le Rhône à Brigue et pour la Vièze à Vièze. La comparaison se fait sur les hydrogrammes sans composante glaciaire.

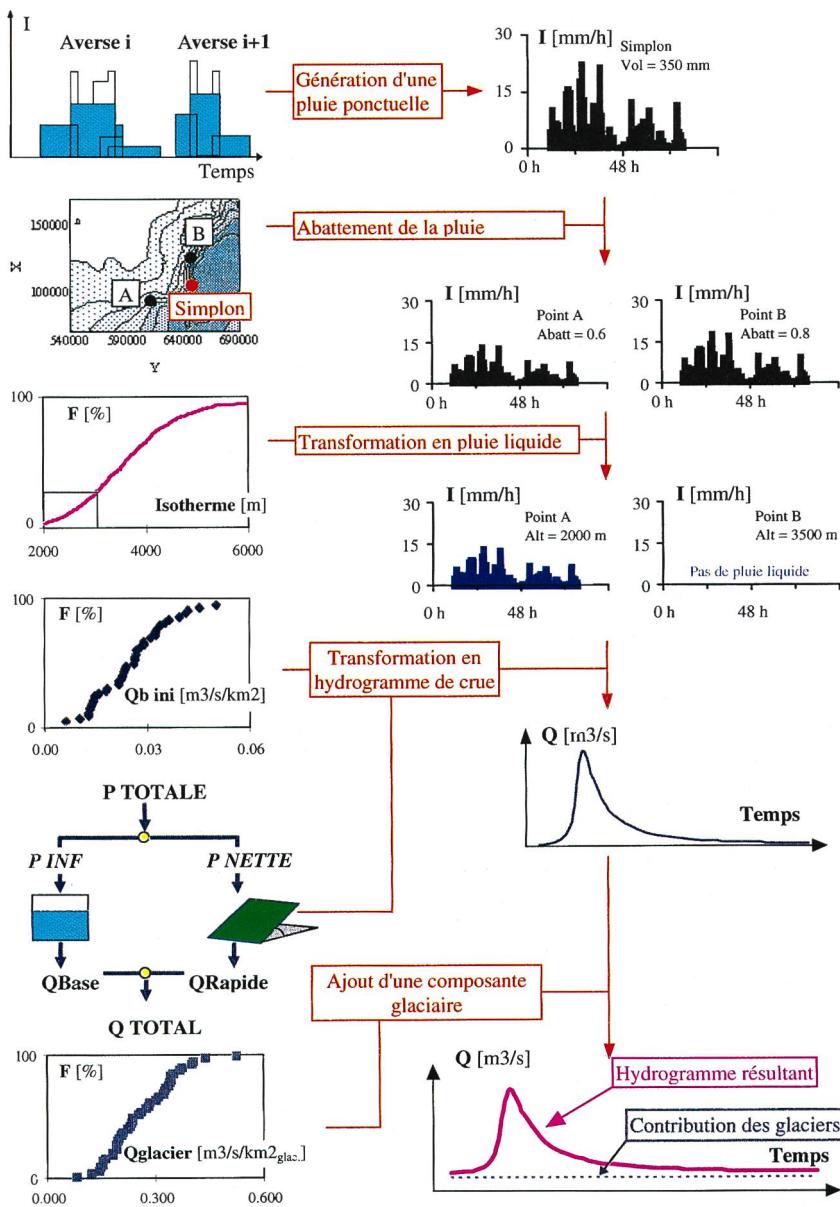


Figure 9. Démarche adoptée pour la production de scénarios de crue.

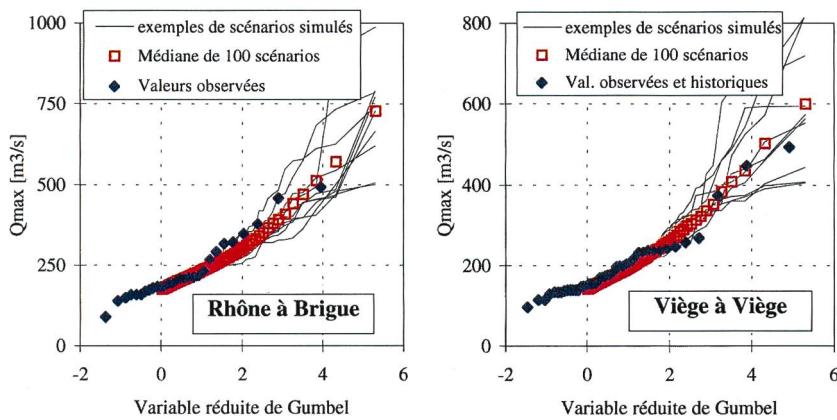


Figure 10. Comparaison des distributions statistiques des débits observés et simulés.

est égal à la médiane des 100 valeurs correspondantes. La figure 10 compare les statistiques observées et simulées pour le Rhône à Brigue et la Viège à Viège. Les distributions sta-

tistiques des maxima observés sont fidèlement reproduites. Il en va de même pour les autres bassins versants testés (Rhône à Reckingen, Sion et Branson).

Il est encore nécessaire de vérifier que l'hypothèse d'une homogénéité spatiale des structures de pluies générées par NSRPM ne conduise pas à un biais à la confluence des sous-bassins versants. Il s'agit en effet de contrôler que le nombre et le degré des concomitances des apports provenant des sous-bassins versants contributifs ne sont pas surestimés. L'étude des débits mesurés à la station hydrométrique du Rhône à Baltschieder (1840 km^2), située légèrement en aval de la confluence du Rhône et de la Viège a permis de montrer que la méthodologie n'engendre pas des biais de ce type. En effet, la figure 11(a) montre que pour les principales crues des mois d'août et septembre, les débits de pointe du Rhône à Baltschieder sont généralement équivalents à la somme des débits de pointe des bassins du Rhône à Brigue et de la Viège à Viège (surface totale: 1690 km^2). Il y a donc concomitance des débits de pointe. De son côté la figure 11(b) montre que la statistique des débits de pointe observés à Baltschieder pendant les mois d'août et de septembre est fidèlement reproduite, alors que le modèle hydrologique n'a pas été calé à cet endroit.

A partir des 100 séries de débit de pointe générées, on peut non seulement définir un débit de projet pour un temps de retour donné mais également un intervalle de confiance correspondant. Ainsi, pour la Viège à Viège dans des conditions naturelles, la médiane des 100 valeurs de débit centennal est d'environ $500 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que les quantiles 10 % et 90 % sont de l'ordre de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ et $600 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement. Ainsi pour établir une carte d'inondation dans les environs de Viège, on peut sélectionner parmi les hydrogrammes générés, ceux dont le débit affiche un temps de retour proche de 100 ans (c'est-à-dire entre 400 et $600 \text{ m}^3/\text{s}$). On peut ensuite effectuer une analyse de sensibilité sur les impacts des submersions en fonction des différents volumes débordés. En produisant un large éventail d'hydrogrammes complets de crue, la méthodologie proposée permet de s'affranchir de l'embarras d'un choix à priori d'un débit et d'un hydrogramme de projet unique.

7. Volumes au-dessus de débits «seuils»

Sur l'ensemble des réalisations (100 séries de 120 ans chacune), les relations [volume-débits «seuil»] ont été déterminées pour des hydrogrammes dont le débit de pointe est analogue à

ceux des événements majeurs observés. La figure 12(a) compare les courbes [volumes-débits «seuil»] des hydrogrammes générés avec celles des crues d'août 1987 et de septembre 1993 pour le Rhône à Brigue. Même si la courbe [volumes-débits «seuil»] de la médiane des crues simulées est systématiquement en dessous des crues d'août 1987 et de septembre 1993, ce qui dénote du caractère exceptionnel de ces deux crues observées, la méthodologie proposée est en mesure de produire des scénarios de crue comparables aux épisodes majeurs observés dans la région.

Comme le montre la figure 12(b), cette aptitude se vérifie également pour le bassin versant de Mattmark juste à l'amont de la retenue. La comparaison s'effectue dans ce cas sur les hydrogrammes d'août 1987, de septembre 1993 et de septembre 1994. Là encore, il faut relever le caractère exceptionnel de la crue de septembre 1993, voire celle de septembre 1994. Comme le bassin versant de Mattmark ne dispose pas de station hydrométrique, les crues majeures ont été reconstituées par l'OFEE en fonction des débits sortants mesurés (déversement, turbinage, etc.) et des variations observées des hauteurs du plan d'eau.

8. Etude de cas: Influence du barrage de Mattmark sur les crues de la Viège à Viège

L'exemple présenté ci-dessous est tiré d'une étude effectuée par l'IATE/HYDRAM, toujours dans le cadre du projet Consecru (Niggli & Consuegra, 1997). Cette étude avait pour objectif principal d'étudier l'influence de la retenue de Mattmark sur les crues de la Viège à Viège, et plus particulièrement sur celles dont le débit de pointe présente un temps de retour d'environ 100 ans (entre 400 et 600 m³/s, cf. chapitre 6). Il s'agit donc de vérifier si le potentiel de stockage de la retenue, combiné éventuellement à la dérivation vers la Grande-Dixence, est en mesure d'écrêter des crues centennales en les laminant à une valeur inférieure à la capacité actuelle de la Viège à Viège, soit 330 m³/s. Les scénarios suivants ont été envisagés:

- Stockage intégral des apports de Mattmark par la retenue et turbinage pendant les crues d'un débit constant égal à 20 m³/s.
- Dérivation des écoulements de la Viège de Zermatt vers la Grande-

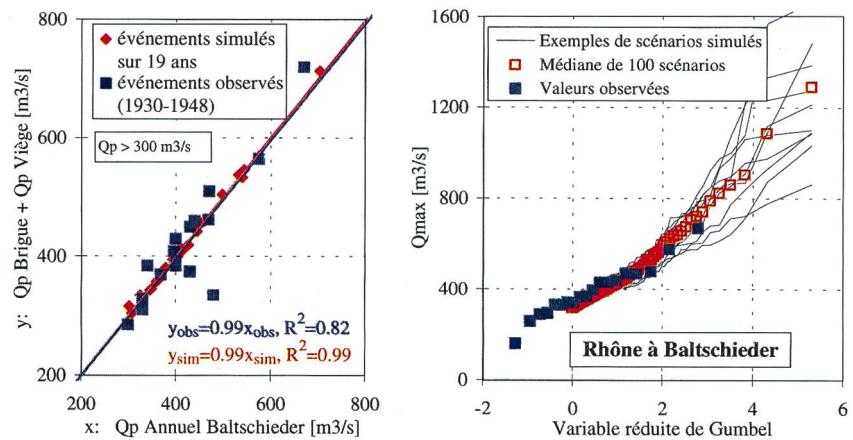


Figure 11. (a) Vérification de la concomitance pour un événement donné, des débits de pointe (Qp) du Rhône à Brigue et de la Viège à Viège et (b) Comparaison des distributions statistiques des débits observés et simulés pour le Rhône à Baltschieder.

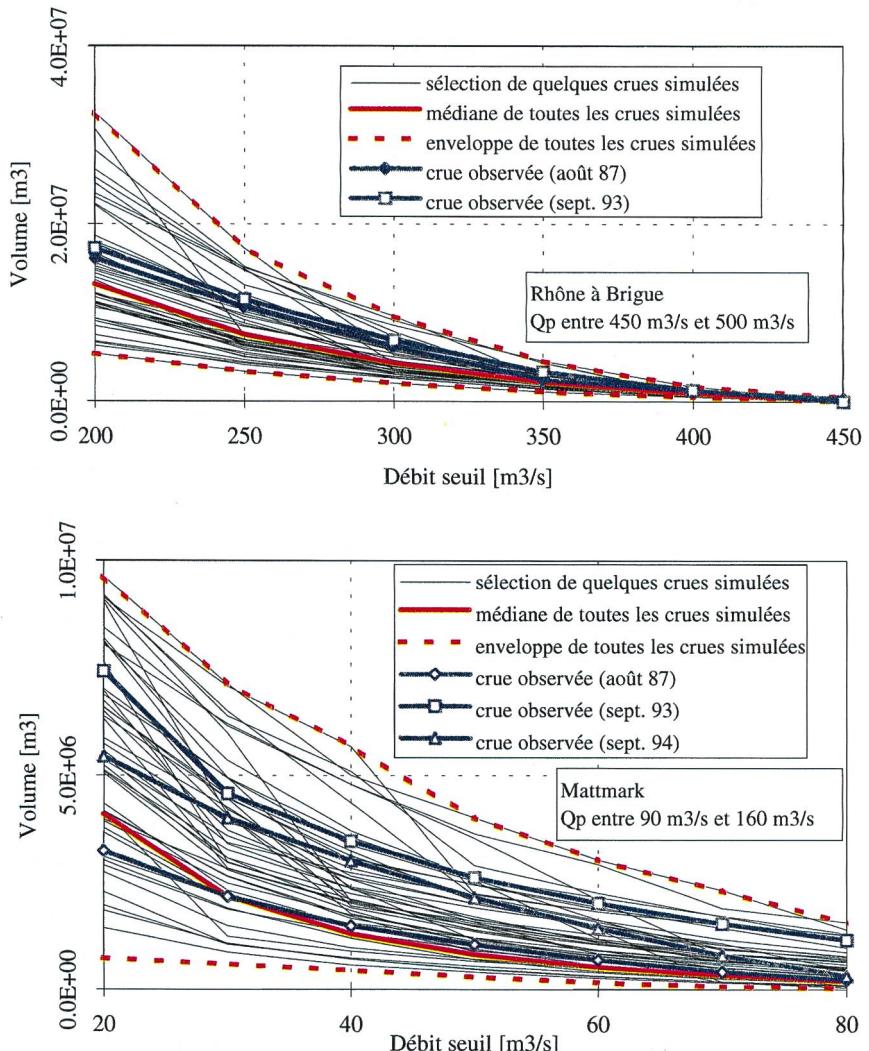


Figure 12: Volumes de crue au-dessus d'un débit «seuil» pour le Rhône à Brigue et la Viège de Saas à Mattmark. Comparaison des courbes générées avec celles correspondant aux épisodes majeurs observés.

Dixence jusqu'à concurrence de 50 m³/s.

Nous n'avons pas considéré la possibilité d'éliminer le turbinage, car nous avons jugé cette exigence beaucoup trop contraignante vis-à-vis

d'une exploitation normale des organes de la retenue de Mattmark. Le cumul des options a) et b) constitue donc un cas favorable pour le contrôle des crues à Viège. Les calculs partent du principe que la retenue ne déverse

pas, ce qui d'ailleurs a toujours été le cas jusqu'à maintenant, exception faite de l'épisode de septembre 1993. Lors de cette crue, la contribution de Mattmark fut cependant limitée. Ainsi, des 330 m³/s observés à Viège en 1993 (débit de pointe) seulement 25 m³/s sont imputables à Mattmark, même si le débit maximum déversé par le barrage était de 80 m³/s (Biedermann et al., 1996). La retenue produit en effet non seulement un écrêtage de la crue, mais également un décalage du débit de pointe dans le temps.

La figure 13 compare les débits maximaux annuels observés pendant la période «après barrage» avec ceux de 30 séries générées (chacune longue de 120 ans), en admettant que l'opération de la retenue de Mattmark peut être schématisée par le cumul des options a) et b). Les hypothèses concernant le turbinage et la dérivation vers la Grande-Dixence correspondent à une opération de gestion du barrage que l'on pourrait qualifier de «normale», même si les débits maximaux annuels observés ne correspondent pas toujours à ces consignes. Il s'agit essentiellement de vérifier que la méthodologie adoptée permet de reproduire dans des conditions «moyennes», les statistiques des débits maximaux observés depuis la mise en service de la retenue de Mattmark et la dérivation vers la Grande-Dixence. La figure 13 montre que c'est le cas. Il est intéressant de noter qu'en partant de ces conditions moyennes d'exploitation du barrage, la plupart des débits de projet de temps de retour 100 ans se situent dans la fourchette [300–500 m³/s]. Par rapport à l'état naturel, la réduction des crues

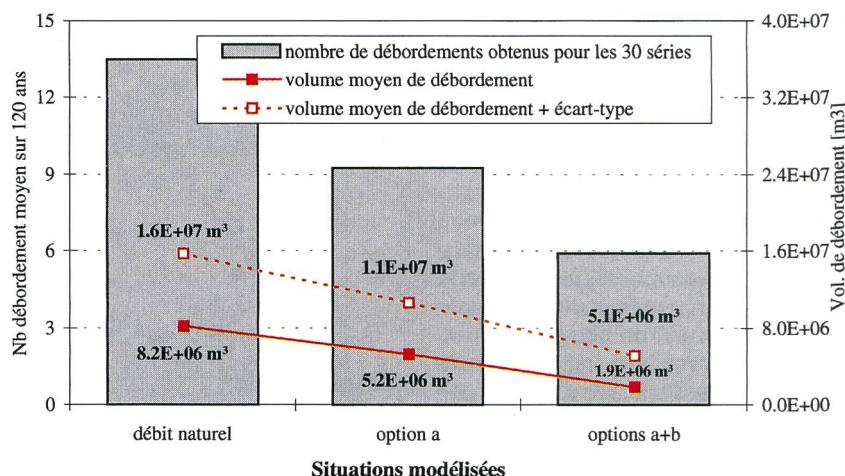


Figure 14. Nombre de dépassesments de la capacité de la Viège à Viège et volumes de débordement.

centennales à Viège serait donc d'environ 100 m³/s.

La figure 14 illustre l'impact des deux variantes étudiées sur le nombre moyen de dépassesments escomptés de la capacité à Viège sur une période de 120 ans ainsi que les volumes de débordement correspondants. Ceci permet, en d'autres termes, d'estimer la probabilité d'avoir une inondation à Viège accompagnée d'un indicateur de ces conséquences potentielles. C'est à ce niveau que l'effet des variantes est le plus perceptible puisque l'option d'un stockage intégral à Mattmark avec turbinage, associée à une dérivation vers la Grande-Dixence, est capable de réduire de moitié le nombre moyen de dépassesments de la capacité à Viège (de 13 à 6 dépassesments en moyenne tous les 120 ans). Les effets sur les volumes de débordement sont également importants puisque pour l'épisode le plus important gé-

néré dans les 30 séries, on passe de 35 millions de m³, dans les conditions «naturelles», à environ 12 millions de m³, dans le cas le plus favorable – cumul des options a) et b). Pour s'affranchir du biais introduit par la réduction des épisodes inondants associés à chacune des trois variantes, la figure 14 ne montre que les volumes débordés pour des crues ayant provoqué une inondation dans les trois cas. Ainsi pour la variante la plus favorable, le volume débordé moyen est de l'ordre de 2 millions de m³.

9. Conclusions

Pour mieux appréhender les différentes sources d'incertitudes dans les processus de modélisation et d'estimation des crues de fréquence rare, voire extrême, l'IATE/HYDRAM a mis au point une méthodologie permettant de produire des scénarios de crue correspondant à une fréquence d'apparition donnée.

Par rapport aux approches statistiques, la méthodologie proposée fournit une multitude d'hydrogrammes de crue et non pas une estimation unique d'un débit maximum. Il en résulte la possibilité d'étudier des problématiques faisant intervenir directement la notion de volume, fort utile à la cartographie des zones inondables ou encore les conséquences d'un écrêtage des crues par les barrages ou par les lits majeurs des cours d'eau. L'étude de cas de la retenue de Mattmark illustre bien la nécessité et la pertinence d'une telle méthodologie dans le cadre des aménagements liés à la 3^e correction du Rhône.

Par rapport aux approches basées sur une modélisation hydrologique à partir d'une pluie de projet, l'utilisation d'un générateur stochastique de précipitations couplé à un schéma d'abat-

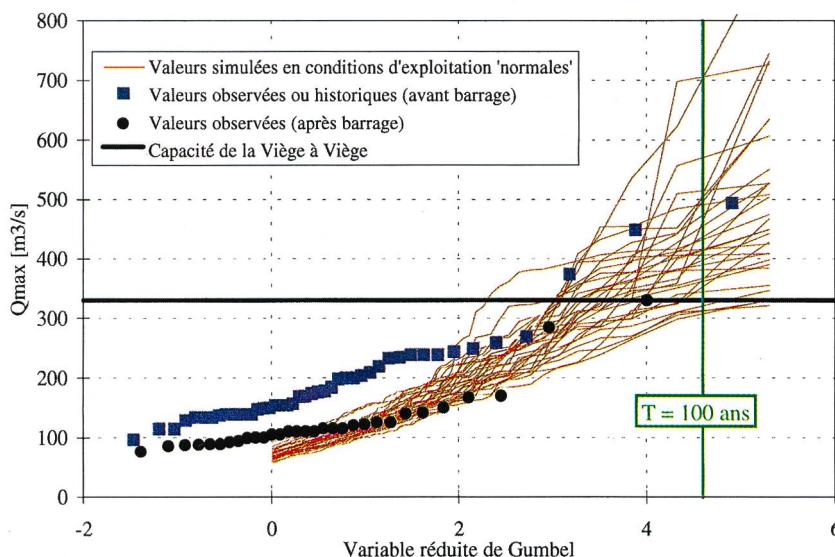


Figure 13. Scénarios de crue générés en admettant un stockage intégral à Mattmark, un turbinage de 20 m³/s et une dérivation de 50 m³/s vers la Grande Dixence.

tement des pluies ouvre également des perspectives intéressantes en matière de dimensionnement. En effet, en lieu et place d'un seul et unique hydrogramme de projet, on génère de nombreuses situations de crues différentes, à partir desquelles on peut procéder à une analyse de sensibilité plus poussée. Ainsi, la cartographie des zones inondables peut utiliser divers hydrogrammes de crues qui ont une (ou plusieurs) caractéristique(s) commune(s), comme par exemple un débit de pointe de temps de retour 100 ans, mais qui présentent des volumes par dessus un débit-seuil (capacité limite du cours d'eau) très différents. Il est donc possible de quantifier la sensibilité des étendues et des profondeurs des submersions par rapport aux incertitudes liée à l'estimation de la crue de projet.

Puisqu'elle exploite des caractéristiques propres à une région donnée de la Suisse, la paramétrisation du générateur stochastique de pluie et du modèle hydrologique n'est pas extrapolable à une autre région d'étude. Nous pensons néanmoins que la méthodologie est parfaitement généralisable aussi bien au niveau des principes de modélisation qu'à celui de la démarche à suivre. Le problème principal reste celui de la caractérisation de la pluviométrie, plus particulièrement celui de la définition d'un (ou plusieurs) schéma(s) d'abattement(s) spatio-temporel(s) représentatif(s) des situations météorologiques critiques.

Même si le chemin à parcourir est encore parsemé d'embûches, gageons sur le fait que les ingénieurs

s'appuieront de plus en plus sur ces nouvelles technologies au détriment d'approches plus classiques qui ne fournissent pas tous les éléments nécessaires pour répondre aux exigences actuelles en matière d'aménagement des cours d'eau.

Références

- D. Bérod, 1995. Modélisation à base quasi-physique de la crue extrême des petits bassins versants alpins, Document IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
- D. Bérod, 1994. Contribution à l'estimation des crues à l'aide de méthodes déterministes, Thèse EPFL N° 1319, Lausanne.
- D. Bérod et D. Consuegra, 1995. Etude Consecru, Traitements statistiques des séries de débits, Rapport IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
- Biedermann et al., 1996. Protection contre les crues dans le canton du Valais, eau, énergie, air, Tiré à part 10, Baden.
- D. Consuegra et E. Vez, 1996. AMIE: Analyse et modélisation intégrées du cheminement des eaux en zones habitées, modélisation hydrologique, Application au bassin versant de la Haute Broye, IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
- P. S. Cowpertwait, 1991. Further Developments of the Neyman-Scott Clustered Point Process for Modelling Rainfall, Water Resources Research, 27(7), pp 1431-1438.
- A.-C. Favre, D. Consuegra et O. Overney, 1997. A theoretical Framework to Assess Impacts of Precipitation Scenarios, Document IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
- R. M. Hirsch, 1987. Probability plotting position formulas for flood records with historical information, Journal of Hydrology, 96, pp 185-199.
- P. Meylan et A. Musy, 1997. Hydrologie fréquentielle, IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
- M. Niggli, D. Consuegra et D. Bérod, 1997. Etude Consecru, Bases hydrologiques de dimensionnement, Modélisation des crues du Rhône en Valais, Rapport IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
- M. Niggli et D. Consuegra, 1997. Etude Consecru, Bases hydrologiques de dimensionnement, Influence du barrage de Mattmark sur les crues de la Viége à Viége, Rapport IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
- Service hydrologique et géologique national (SHGN), 1922-1994. Annuaire hydrologique de la Suisse, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne.

Remerciements

Cette étude a été financièrement soutenue par le Service des routes du canton de Valais et l'Office fédéral de l'économie des eaux. Il faut également souligner la contribution du Dr Dominique Bérod pour le développement du modèle hydrologique qui résulte des considérations élaborées dans sa thèse de Doctorat (Bérod, 1994). Mentionnons encore la précieuse collaboration avec le Dr Dietmar Grebner, le Dr Mario Rohrer et M. Thomas Roesch de l'Institut de géographie de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich pour la définition du schéma d'abattement spatial des précipitations représentatif des situations météorologiques critiques.

Adresse des auteurs: Dr David Consuegra, Markus Niggli, Ing. dipl. EPFL, et Prof. André Musy, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Institut d'aménagement des terres et des eaux, CH-1015 Lausanne.

Rechenreinigungsanlage Wasserkraftwerk Haag

Drei Jahre im Einsatz

Die Isar-Amperwerke AG besitzt sieben Wasserkraftwerke an Isar, Amper, Loisach und Partnach. Eines der sieben ist das Wasserkraftwerk in Haag an der Amper. Es wurde in den Jahren 1922/23 erbaut und mit zwei Francisturbinen ausgestattet, die eine Leistung von insgesamt 3,6 Megawatt erbrachten. 1989 entschloss sich die Isar-Amperwerke AG, das Wasserkraftwerk Haag zu modernisieren, wobei sie u.a. die zwei Francisturbinen durch eine Kaplan-Rohrturbine ersetzte und einen Kettenreiniger installierte. Das renovierte Kraftwerk ging im Frühjahr 1991 wieder in Betrieb.

Beschreibung der zuvor eingesetzten Rechenreinigungsanlage

1990 wurde im Rahmen der Kraftwerkssanierung eine Kettenreinigungsanlage installiert sowie auf der linken Seite, in Flussrichtung gesehen, ein Portaldrehkran.

Die grosse Hublänge des Kettenreinigers von 14,40 m verlangte nach einer extrem langen Dimensionierung der Führungsteile. Des weiteren waren die mechanisch bewegten Teile ständig dem Geschwemmsel ausgesetzt sowie im Winter der Eisbildung, wodurch sie oftmals blockierten. Ein störungsfreier Betrieb der Anlage erwies sich somit als nicht möglich. Bedingt durch die Wassertiefe mussten sogar Taucher eingesetzt werden, um die Maschine wieder gangbar zu machen.

Durch den geringen Ausgriff der Harke und die Zwangsführung in den Seitenführungen an den Flügelmauern wurde nur ein mässiger Reinigungserfolg erzielt. Bei erhöhtem Treibgut- bzw. Geschwemmselanfall musste das Bedienungspersonal kombiniert mit Polypgreifer und Kettenreiniger für einen störungsfreien Betrieb der Turbine sorgen. Der Drehkran mit handgesteuertem Polypgreifer diente dabei zur Bergung des Treibguts an der Wasser-