

PRISE EN COMPTE DE LA COMPLEXITE HYDRAULIQUE ET HYDROLOGIQUE D'UN GRAND BASSIN VERSANT DANS L'ÉVALUATION DES CRUES

Taking into account the hydraulic and hydrology complexity of a large river basin in flood estimation

Thomas VIARD, Fanja RAZAFINDRAMISA

EDF CIH, 4 allée du lac de Tignes 73290 La Motte Servolex
thomas.viard@edf.fr ; fanja.razafindramisa@edf.fr

Emmanuel PAQUET, Nicolas ROUILLON

EDF DTG, Saint Martin Le Vinoux, France
emmanuel.paquet@edf.fr ; nicolas.rouillon@edf.fr

MOTS CLEFS

Hydraulique, hydrologie, sûreté, bassin versant, crues extrêmes, SCHADEx-SD, SHYDONHY, AutoMaT, Isère

KEY WORDS

Hydraulic, hydrology, safety, catchment, extreme flood, SCHADEx-SD, SHYDONHY, Automat, Isere river

RÉSUMÉ

La plupart des méthodes actuelles d'estimation du risque hydrologique souffre de limites sur les grands bassins versants français. En effet, elles ne tiennent pas compte de l'hétérogénéité hydro-climatique des différents affluents et de la présence d'influences hydrauliques (impact de grands barrages ou de systèmes d'endiguement).

La méthode présentée dans cet article est basée sur la simulation d'un grand nombre de scénarii hydrologiques (plusieurs centaines de milliers) à l'aide de modèles hydrologiques spatialisés et de modèles hydrauliques 1D à casiers pour dépasser ces limites. En effet, implanter la simulation hydraulique dans la chaîne de détermination des aléas extrêmes permet de représenter l'écrêtement des crues par les barrages amont et les plaines d'inondations amont et de fournir des hydrologies coordonnées sur les différents affluents.

L'Isère est utilisée comme exemple d'application. Son bassin versant a une superficie supérieure à 10 000 km² à sa confluence avec le Rhône et présente de nombreux affluents (Drac, Arc, Arly, Bourne...) aux comportements hydrologiques variés. D'un point de vue hydraulique, la plaine du Grésivaudan a été aménagée il y a une dizaine d'années pour limiter les conséquences des crues à Grenoble, et ainsi écrêter notablement les crues en amont de Grenoble, à l'instar de la plaine de Saint Gervais en aval de Grenoble.

La prise en compte de ces influences permet par exemple d'estimer au pont de Saint Gervais un débit de pointe de temps de retour 1 000 ans à 3 530 m³/s contre environ 5 000 m³/s avec une étude SCHADEx classique sans prise en compte de ces influences.

Dans les Etudes de Dangers, l'application de cette méthode permet d'améliorer l'évaluation du risque hydrologique pour les barrages avec une confluence dans la retenue ou les vallées avec de forts écrêtements par des barrages amont ou des systèmes d'endiguement, de prendre en comptes de manière réaliste les affluents aval dans les conséquences des événements redoutés centraux en crue, de probabiliser un risque annuel d'une retenue avec gestion saisonnière et d'analyser les risques avec plusieurs hydrogrammes pour plus de robustesse.

ABSTRACT

Most of methods used today to estimate hydrological risk are not adapted to large French catchments. These methods do not consider explicitly the hydro-climatic heterogeneity of tributaries nor the hydraulic influence of big dams and embankment systems.

A new method is described in this article. It consists of simulating a large number of hydrological scenarios (few hundred thousands) with a semi-distributed hydrological model and 1D hydraulic modelling with storage cells for flood plains (Mascaret software). Big dams and embankment systems are taken into account thanks to hydraulic modelling. It allows propagation of coordinated hydrological events too.

The French River Isere is presented as example. Catchment area is over 10 000 km² at its confluence with Rhône River. Many tributaries (Drac, Arc, Arly, Bourne...) have different hydro-climatological features. Two embankment systems have a major hydraulic impact on floods: the Gresivaudan embankment system upstream of Grenoble and the Saint Gervais flood plain downstream.

With this new method, the 1000 years return period peak flood at Saint Gervais is estimated at 3 530 m³/s. Without considering hydrological heterogeneity and embankment systems the estimation would be around 5 000 m³/s.

In risk analysis, this method allows to improve knowledge on flood risk for reservoir with confluence, for impact of upstream mitigation system (dams and dikes). It allows to take into account downstream tributaries in a realistic way for downstream consequences of dam incidents, to evaluate annual risk with seasonal levels in reservoir and to use different hydrograph shapes improving robustness of safety analysis.

1. CONTEXTE

La méthode hydrologique de référence à EDF pour l'évaluation des crues extrêmes est la méthode SCHADEX [1], applicable à des bassins versants de quelques km² à quelques milliers de km², de caractéristiques hydroclimatiques relativement homogènes, et non perturbée par des barrages ou systèmes d'endiguement complexifiant le fonctionnement hydraulique du bassin versant.

Pour certains bassins versants, il a été nécessaire de développer une nouvelle méthode pour l'estimation des crues extrêmes afin de dépasser les limites¹ de la méthode SCHADEX et modéliser explicitement l'hydraulique des crues. Cet article présente les développements permettant aujourd'hui de traiter ces questions et leur application sur un cas concret :

- SCHADEX-SD (version Semi-Distribuée de SCHADEX) génère des centaines de milliers de scénarios hydrologiques au pas de temps journalier, tenant compte de la variabilité spatiale des processus hydrologiques générateurs de crues au sein d'un bassin versant ;
- SHYDONHY construit les hydrogrammes horaires à partir d'hydrogrammes journaliers sur les différents cours d'eau du bassin versant afin d'alimenter la modélisation hydraulique ;
- Melxor simule l'écrêtement de ces ensembles d'hydrogrammes à travers un ou plusieurs réservoirs en général capacitifs (non présenté dans cet article, a déjà fait l'objet d'un article CFBR [2]) ;
- AutoMaT traite les mêmes séries d'hydrogrammes à travers un modèle hydraulique 1D d'écoulement à surface libre (Mascaret), intégrant la modélisation des plaines inondables (casiers), de retenues peu capacitives et de la diffusion d'ondes de crue dans une vallée.

¹ L'hypothèse de répartition uniforme de la pluie sur tout le bassin versant, homogénéité hydroclimatique du bassin versant, non prise en compte des écrêtements par les barrages et les systèmes d'endiguement présents dans le bassin versant

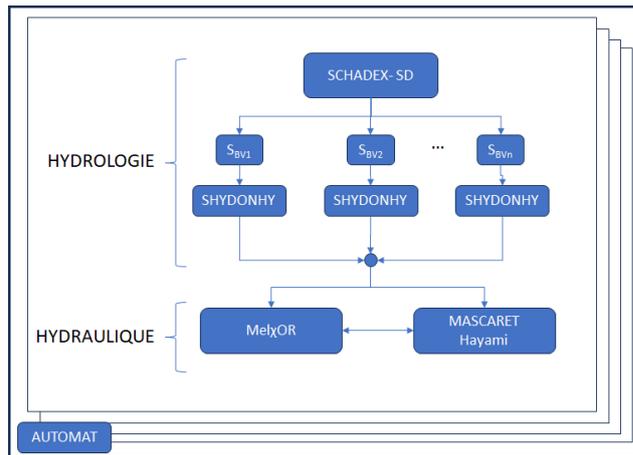


Figure 1. Principe d'évaluation des crues extrêmes

2. MODELISATION D'UN GRAND BASSIN VERSANT

2.1.Méthode SCHADEX-SD – Approche semi-distribuée

La méthode probabiliste SCHADEX a fait l'objet de nombreuses publications [1]. Cette méthode est basée sur un processus stochastique de simulation pluie-débit semi-continue. La méthode a été développée autour de deux modèles : la distribution MEWP (Multi-Exponential Weather Pattern) pour l'estimation des probabilités de précipitations, et le modèle hydrologique MORDOR-SD [3] développé à EDF-DTG. Le processus de simulation permet de calculer une distribution estimée des volumes de crue au pas de temps de l'étude, ainsi qu'une distribution des pics de crue basée sur un rapport pic-volume estimé à partir d'une collection d'hydrogrammes observés des crues significatives. Un large éventail d'événements pluvieux est simulé sur chaque état hydrologique possible du bassin, générant un ensemble exhaustif de croisements entre les précipitations et l'état hydrique du bassin. L'accumulation et la fonte de la neige sont également représentés.

Le modèle hydrologique MORDOR-SD, utilisé dans SCHADEX, est un modèle conceptuel global qui suppose que les processus hydrologiques, par exemple les précipitations et la saturation du sol, sont représentés de façon uniforme sur l'ensemble du bassin versant modélisé (avec cependant la distinction de plusieurs bandes d'altitude pour les processus liés à la neige). Cette homogénéité est discutable pour les grands bassins versants (supérieurs à plusieurs milliers de kilomètres carrés), ou dans les zones de climatologie très contrastée.

Pour éviter la mise en œuvre coûteuse d'un modèle entièrement distribué, une solution intermédiaire est appliquée ici, fournissant une meilleure représentation de la diversité hydro-climatique du bassin versant étudié, tout en conservant en même temps le cadre de simulation de SCHADEX. Le bassin versant est divisé en plusieurs sous-bassins contributifs homogènes, comprenant également tous les bassins versants en amont des réservoirs importants. Les modèles pluie-débit sont paramétrés individuellement pour chaque sous-bassin versant contributif, en utilisant les données de débit locales pour la calibration si elles sont disponibles. Une première simulation SCHADEX est effectuée à l'échelle globale (c'est-à-dire pour l'ensemble du bassin versant), ce qui permet d'attribuer une probabilité à chaque événement simulé, principalement sur la base de la pluviométrie globale sur la zone tirée au hasard pour l'événement [1]. Ensuite, les précipitations de chaque événement sont réparties dans les différents sous-bassins versants en utilisant les formes des champs de pluie calculés grâce à la réanalyse des précipitations SPAZM [4] sur une longue période observée, en utilisant des situations historiques comparables à l'évènement à simuler (en termes de saison et d'intensité). Les événements pluvieux simulés sont ainsi répartis sur le domaine de manière réaliste, garantissant que pour les crues simulées, les contributions de chaque sous-bassin versant sont pertinentes. Les séquences de débit

journalier correspondantes sont ensuite calculées à l'aide des modèles hydrologiques à l'exutoire de chaque sous-bassin versant.

2.2.SHYDONHY - Génération d'hydrogrammes de crue

La méthode SHYDONHY [5], utilisée pour construire des hydrogrammes synthétiques pour chaque événement simulé, est basée sur une base de données issues de 1300 stations de jaugeage en France et en Suisse, couvrant une large gamme de taille de BV et de climatologie. Pour chaque station, en moyenne deux crues par an sont retenues par une méthode de sélection sup-seuil, constituant une base d'environ 69 000 hydrogrammes au total. Pour un bassin versant donné, certaines "stations donneuses" sont sélectionnées selon des critères de proximité dans l'espace, de taille et de production hydrologique. Ces stations fournissent des centaines d'hydrogrammes qui peuvent compléter ceux enregistrés localement sur le bassin versant d'intérêt ou les remplacer si aucun hydrogramme n'est disponible. Pour une séquence de débit journalier donnée (simulée grâce à SCHADEX-SD), un hydrogramme synthétique pertinent est généré en combinant les hydrogrammes appropriés de ce sous-ensemble.

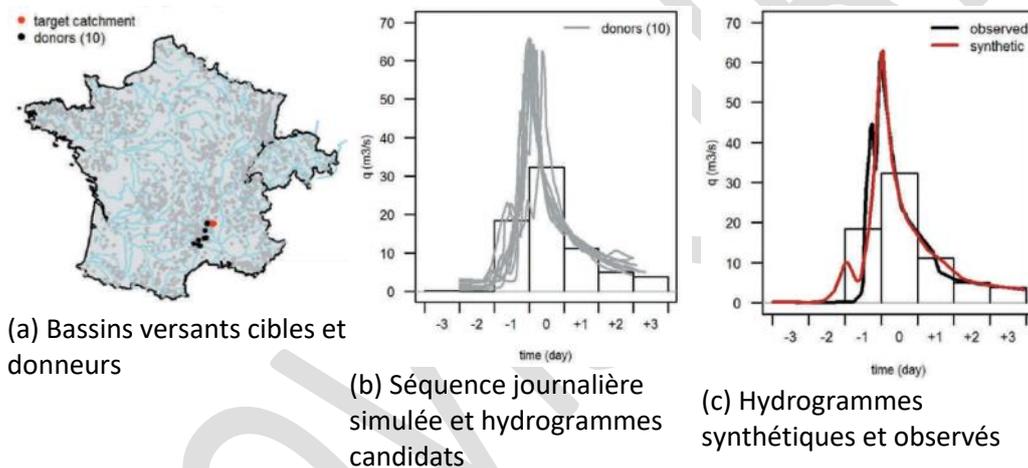


Figure 2. Exemple de génération d'un hydrogramme synthétique [5]

(a) Emplacement des centroïdes des bassins versants cibles et donateurs ; (b) séquence journalière simulée et hydrogrammes synthétiques et observés.

2.3.AutoMaT - modélisation des plaines inondables

AutoMaT, pour Automatic Mascaret Treatment, est une automatisation de simulation massive 1D à casiers. Mascaret est un logiciel open source de modélisation hydraulique (www.opentelemac.org) dédié aux écoulements unidimensionnels à surface libre, basé sur les équations de Saint Venant. Mascaret inclut, avec son noyau transitoire sous-critique, un module de stockage en plaine de crue afin de représenter un modèle quasi-2D.

AutoMaT fonctionne avec 2 sous-programmes

- Le premier sous-programme permet de simuler un scénario hydrologique. ce sous programme affecte les hydrogrammes générés par SHYDONHY à la rivière et à tous ses affluents et lance deux simulations Mascaret :

- Une simulation d'écoulement permanent pour générer des conditions initiales (niveaux d'eau et vitesses) avec la première valeur de l'hydrogramme de chaque affluent
- Une seconde, transitoire, simulant toute la crue.
- Si la simulation permanente plante, un débit initial très légèrement modifié (quelques m^3/s) est testé. Si la simulation transitoire plante, un pas de temps plus faible est testé. Si une des deux simulations continue de planter, un planimétrage légèrement modifié est testé.
- Le second sous-programme gère la simulation un grand nombre d'évènements. Il assure la parallélisation massive des simulations sur un cluster avec une répartition équitable des calculs sur chaque nœud du cluster.

Le modèle AutoMaT ne nécessite pas plus de données que celles nécessaires à la construction du modèle Mascaret de la rivière et des scénarios hydrologiques.

PROVISOIRE

3. APPLICATION DE LA METHODE A L'ISERE

3.1. Présentation du bassin versant

L'Isère est un affluent du Rhône prenant sa source sur la commune de Val d'Isère. Pour le présent article nous nous intéressons à l'Isère au pont de Saint Gervais, soit une superficie de 9 981 km². Ses principaux affluents, d'amont en aval, sont l'Arly, l'Arc et le Drac.

Le bassin versant a été découpé en 21 sous bassins versant représentant un ensemble hydrologique homogène « par morceaux » et cohérent :

- 8 sous-bassins versants regroupant les principaux affluents (Haute-Isère : 2, Arly :2, l'Arc : 3, le Drac : 1)
- 13 « bassins versants intermédiaires » (BVI) correspondant à des regroupements de petits affluents de l'Isère et de versants et thalwegs se jetant directement dans l'Isère (Combe de Savoie : 3, Grésivaudan :3, secteur grenoblois : 4, secteur aval Grenoble : 3).

Les paramètres des modèles hydrologiques de chaque sous bassin versant contributeur du domaine d'étude sont réglés, par calage sur des débits locaux s'ils sont disponibles, ou transposés de bassins voisins de caractéristiques hydrologiques proches.

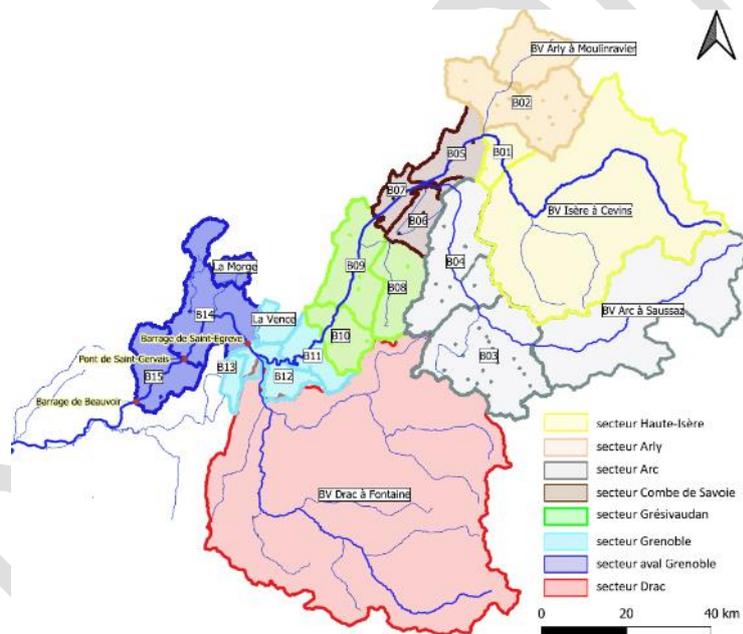


Figure 3. Découpage hydrologique du bassin versant de Saint-Gervais

3.2. Génération des scénarios hydrologiques

La méthode SCHADEX-SD est appliquée selon les étapes suivantes :

1. Une simulation SCHADEX classique est réalisée pour le domaine d'étude global à Saint Gervais. On constitue ainsi un jeu complet de scénarios hydrologiques d'environ 2 millions de crues, simulées au pas de temps journalier, dans toute la gamme d'intensités pluviométriques, et pour toutes les conditions hydrologiques préalables possibles.

2. Cette simulation est ensuite échantillonnée de manière à ne garder qu'un événement sur 10 environ, sans qu'aucun biais ne soit créé ni dans les distributions simulées, ni pour la saisonnalité des forts quantiles.

3. Pour chaque évènement des 200 000 crues sélectionnées, on calcule la répartition spatiale des 3 journées de l'épisode de pluie simulée par SCHADEX à l'étape précédente, sur chacun des 21 sous-bassins, au moyen du champ de pluie observé d'une journée dite « de désagrégation » judicieusement choisie² dans l'historique pluviométrique de la région. On utilise à cet effet le ratio pluie locale / pluie globale de cette journée pour calculer les pluies à simuler sur chacun des sous-bassins pour l'évènement en question. Les débits journaliers consécutifs à ces évènements pluvieux sont ensuite calculés grâce au modèle hydrologique des sous-bassins.

4. Pour chaque crue simulée, et à l'exutoire de chaque 21 sous-bassin, des hydrogrammes au pas de temps horaire sont générés au moyen de la méthode SHYDONHY : au sein d'une collection d'hydrogrammes issue de stations voisines (géographiquement et hydrologiquement), est retenu l'hydrogramme le plus adapté à la séquence de débit journalier autour de la pointe, et de coefficient de forme proche de celui de la crue simulée. Il est ensuite adapté à l'ensemble de la séquence pour produire un signal continu sur 192 heures (8 jours), encadrant largement la pointe proprement dite. À la sortie de ce procédé, on dispose donc, pour 200 000 évènements simulés, des séquences de débits journaliers et des hydrogrammes horaires correspondants à l'exutoire de chacun des 21 sous-bassins.

3.3. Construction du modèle hydraulique

Pour représenter le fonctionnement hydraulique de l'Isère, AutoMaT et un outil simplifié de propagation/diffusion de crue dans un lit mineur – Hayami [6] – ont été utilisés :

- L'outil AutoMaT embarque un modèle Mascaret à casiers de l'Isère d'Albertville à sa confluence avec le Rhône (185 km) et le Drac du seuil de la Rivoire à sa confluence avec l'Isère (22 km)
- 5 modèles Hayami permettent de propager des hydrogrammes de l'exutoire de sous-bassins vers leur confluence avec l'Isère
 - Isère amont : l'Isère de Cevins à Albertville
 - Arc amont : l'Arc de Saussaz à St Jean de Maurienne
 - Arc aval : l'Arc de St Jean de Maurienne (Hayami Arc amont + B03) à sa confluence avec l'Isère
 - Arly : l'Arly de Ugine à sa confluence avec l'Isère
 - Morge : la Morge de Voiron à sa confluence avec l'Isère

² La journée de désagrégation est choisie parmi les journées de même type de temps (méditerranéen, océanique, retour d'est...) et de même classe d'intensité (3 classes d'intensité existent)

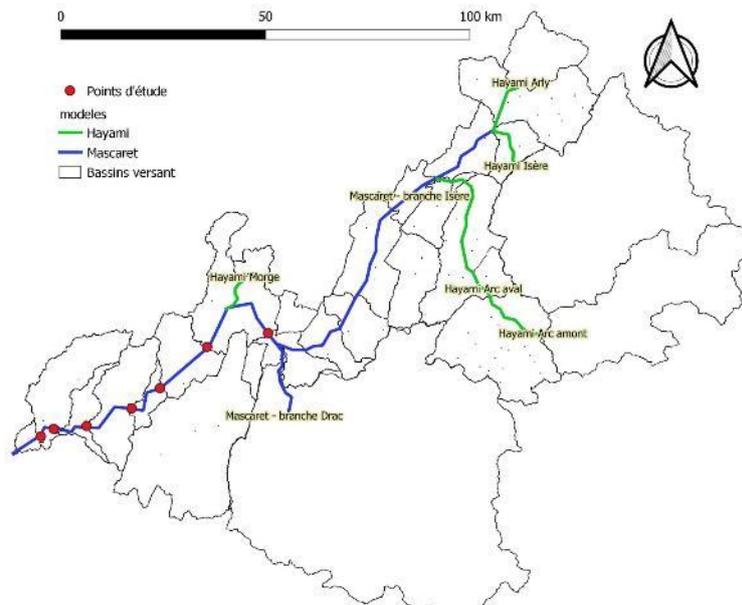


Figure 4. Schéma hydraulique de l'Isère

Le modèle Mascaret a été réalisé avec la version 3.5 de Fudaa-Mascaret (noyau 8.1.0). Le noyau fluvial non-permanent, permettant d'utiliser des casiers, a été utilisé. Aucune rupture de barrage ou de grosses infrastructures n'a été prise en compte.

Le modèle a été construit à partir des données RGE Alti de l'IGN pour le lit majeur de l'Isère et du Drac. Pour le lit mineur, différentes sources bathymétriques de 2004 à 2021 ont été utilisées. Les données utilisées correspondent aux bathymétries les plus récentes et pertinentes disponibles, à l'exception du tronçon entre Pontcharra et Grenoble dont la bathymétrie retenue pour la modélisation correspond à celle de l'année 2000 (Niveau ciblé par les aménagements récents du Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère – SYMBHI – dans le secteur).

114 casiers (347 liaisons) et de nombreuses zones de stockage sont inclus dans le modèle pour tenir compte du laminage naturel de l'Isère. On peut distinguer 4 secteurs :

- La Combe de Savoie, d'Albertville à Pontcharra, secteur géré par de Syndicat Mixte de l'Isère et de l'Arc en Combe de Savoie (SISARC), de nombreuses zones d'expansion de crue sont présentes mais la vallée reste relativement étroite ;
- Le Grésivaudan, de Pontcharra à Grenoble, secteur géré par le SYMBHI qui a fait l'objet de nombreux travaux pour la mise en place de 16 casiers d'inondation contrôlée (CIC) pour protéger Grenoble pour les crues de temps de retour entre 30 et 200 ans de l'Isère en amont de la confluence avec le Drac. La vallée est large et optimisée pour l'écrêtement des crues ;
- La plaine de St Gervais, de Grenoble à St Gervais, où le lit majeur est très endigué et le lit mineur canalisé. La vallée est très large. Le laminage y est faible pour les crues courantes mais très conséquent pour les crues de débits supérieurs au débit de dimensionnement des ouvrages de protection des crues ;
- La basse Isère, de St Gervais à Valence, où la rivière passe dans des gorges avec peu de zones d'expansion de crue.

Les barrages de St Egrève, Beauvoir, St Hilaire, Pizançon, La Vanelle et Beaumont Monteux sont inclus dans le modèle. Ils sont modélisés par des lois de tarage imposant un maintien à retenue normale jusqu'à saturation des évacuateurs de crues (excepté le barrage de St Egrève) puis ouvertures

maximales de ces évacuateurs et enfin éventuellement surverses et contournements évalués à l'aide des plans des barrages et la topographie environnante.

Le cas de la retenue de St Egrève est particulier. Le choix a été fait dans AutoMaT de modéliser le barrage de St Egrève de manière simplifiée à travers une courbe de tarage maintenant la cote 202 m NGF jusqu'à un débit de 2700 m³/s puis la mise en transparence du barrage, permettant une prise en compte partielle de la loi d'abaissement évitant des surverses « prématurées » sur des digues amont. Le faible volume de la retenue par rapport au volume des crues étudiées permet d'écarter le risque d'un laminage de la retenue non conforme au cadre règlementaire en démarrant la crue à une cote inférieure à RN.

Le calage du modèle a été réalisé pour le lit mineur sur des crues différentes en fonction des secteurs (Combe de Savoie, Grésivaudan, Drac...) : 2015, 2000, 2001, 1999, 1990 et 1993 (crues de 200 à 1 400 m³/s – principalement autour de 850 m³/s). Ce calage s'est effectué en régime permanent, avec dans la mesure du possible des données bathymétriques correspondant aux années étudiées. Pour les casiers, les crues de projet du SYMBHI de période de retour 30 et 200 ans pour l'Isère en amont de Grenoble ont été utilisés en transitoire pour valider le fonctionnement des casiers. L'objectif n'a pas été de reproduire parfaitement les niveaux atteints mais de respecter le laminage et les temps de propagation pour retrouver les hydrogrammes en aval des secteurs d'écêtement. En effet, l'objectif de ce modèle est de construire une distribution des débits de pointe et non de connaître les niveaux précis atteints.

Suite au calage, une phase d'optimisation du modèle a permis de minimiser les temps de calculs et de connaître les paramètres qu'il est possible d'ajuster (planimétrie, pas de temps et débit initial) et leur gamme de validité pour améliorer la stabilité numérique des calculs sans influencer sur les résultats.

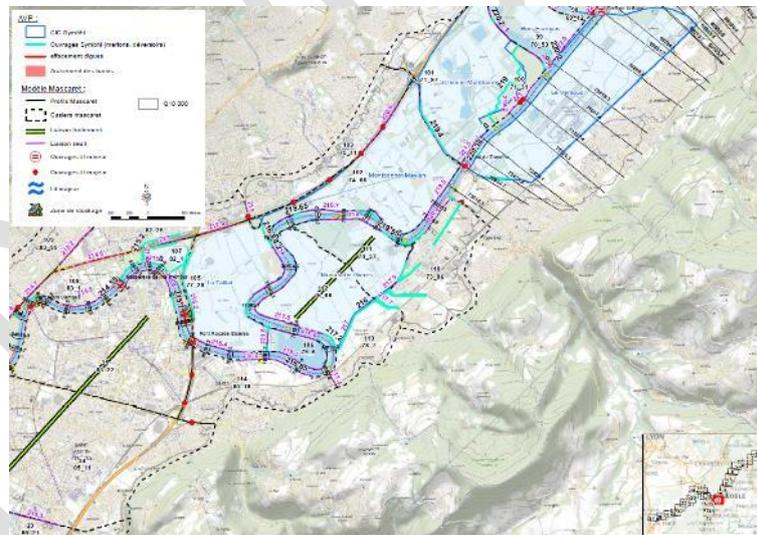


Figure 5. Schéma topologique de l'Isère servant à la construction du modèle Mascaret

3.4. Analyse des résultats

Les 200 000 scénarios hydrologiques générés, composés chacun d'un hydrogramme pour chacun des 21 sous bassins versants, ont été simulés dans le modèle Mascaret à l'aide de l'outil AutoMaT (environ une semaine de calculs sur 3 500 processeurs). Les débits de pointe obtenus à Saint Gervais ont été classés par ordre croissant puis les probabilités de chaque événement sont cumulées pour calculer la distribution de fréquences au non dépassement, ce qui permet d'extraire les valeurs à différents temps de retour (*figure 5*). Ainsi le débit de pointe de temps de retour 1 000 ans à Saint Gervais est de 3 530 m³/s. Avec une étude SCHADEX classique, le débit évalué serait plutôt autour de 5 000 m³/s.

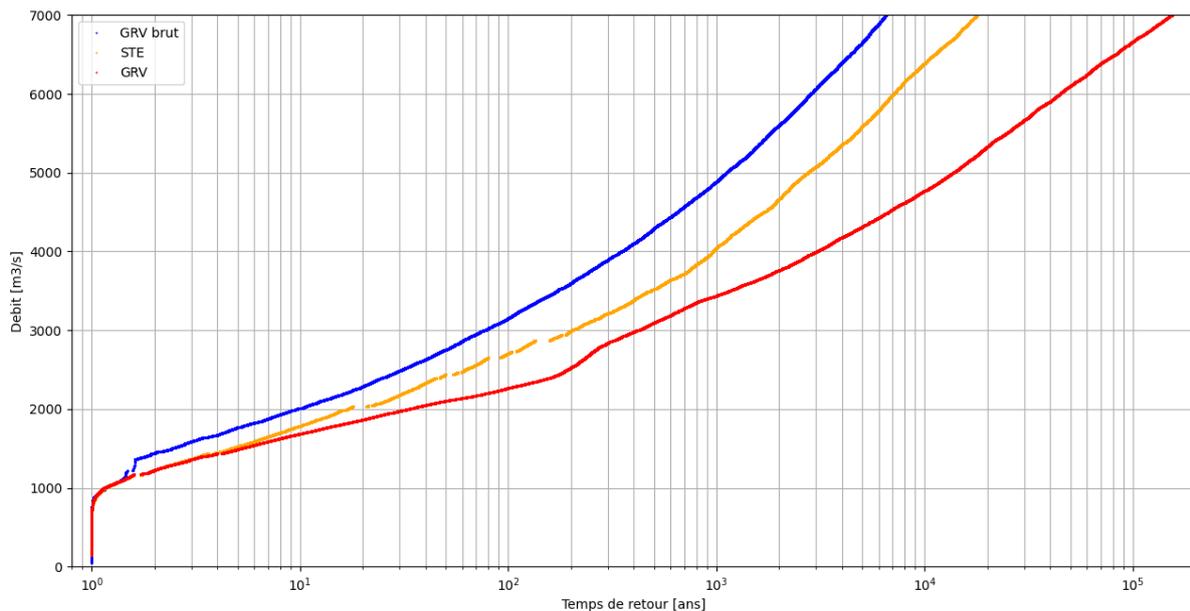


Figure 6. Distribution des débits à St Gervais avec un SCHADEX classique (en bleu) et une prise en compte de l'hydraulique : débit à l'amont (en orange) et à l'aval (en rouge) de la plaine de St Gervais pour le bassin maître de St Gervais

Avec cette méthode, une période de retour peut être analysée de manière plus fine pour comprendre ce qui peut amener à un tel événement. Pour la période de retour 1 000 ans, 4 scénarios « exemples » ont ainsi été extraits et analysés de manière fine (contribution de chaque affluent, fonctionnement des systèmes d'endiguement...) mettant en avant une certaine diversité des crues de cette période de retour (*figure 7*) et tous les scénarios de temps de retour 1 000 ans +/- 100 ans ont été regardés de manière globale à travers des « boîtes à moustaches » (contributions minimale et maximale, premier et troisième quartile et médiane – *figure 8*).

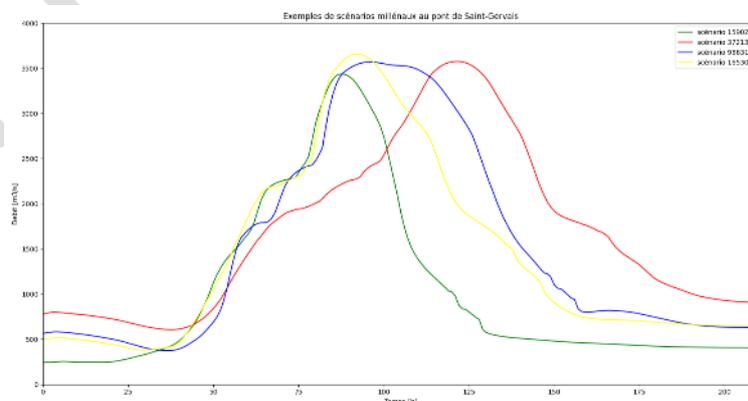


Figure 7. Exemples de scénarios « millénaux »

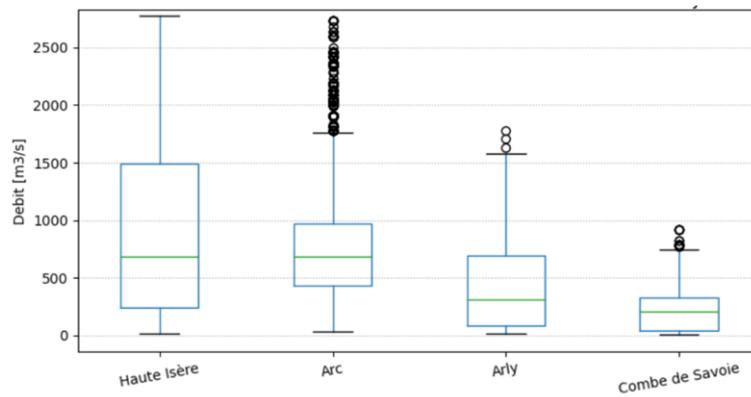


Figure 8. Analyse des contributions de sous bassins en débit pour une crue de temps de retour 1 000 ans à St Egrève

Cette analyse permet par exemple de voir le rôle actif des CIC de la plaine du Grésivaudan permettant l'écrêtement des crues pour les scénarios dont les apports de l'Isère en médiane entre « l'amont Grésivaudan » et « l'aval Grésivaudan » baissent, malgré les apports du bassin versant intermédiaire (« BVI Grésivaudan »). Ainsi, le Drac est le plus fort contributeur, représentant plus de 60% de la pointe de crue à Saint-Gervais, pour la moitié des scénarios, malgré une taille de bassin versant plus faible que l'Isère à leur confluence, soulignant aussi le rôle des CIC de la plaine du Grésivaudan écrétant les crues de l'Isère à Grenoble. En effet, une contribution plus forte de l'Isère nécessite une quantité de pluie plus forte et donc une probabilité globale du scénario plus faible du fait des CIC.

On observe aussi le rôle de la plaine d'inondation entre le barrage de Saint-Egrève (« Total STE ») et le pont de Saint-Gervais permettant l'écrêtement des crues. La pointe de crue de l'Isère au pont de Saint-Gervais est écrêtée, malgré l'apport significatif du bassin intermédiaire pour plus de 25 % des scénarios (3^{ème} quantile à plusieurs centaines de m³/s). La figure 9 illustre sur un échantillon de scénarios l'écrêtement de cette plaine (pour les scénarios sous la droite rouge, les débits à Saint Gervais en aval sont plus faibles que les débits à Saint Egrève malgré des apports du BVI). Pour une crue de temps de retour 1 000 ans, la plaine de Saint Gervais écrête ainsi environ 500 m³/s (la figure 5 montre, en probabilité à Saint Gervais un débit millénal passant d'environ 4 000 m³/s à 3 530 m³/s, ce qu'on retrouve sur la figure 9, les scénarios de 4 000 m³/s à St Egrève fournissent des débits entre 3 200 et 3 700 m³/s à Saint Gervais).

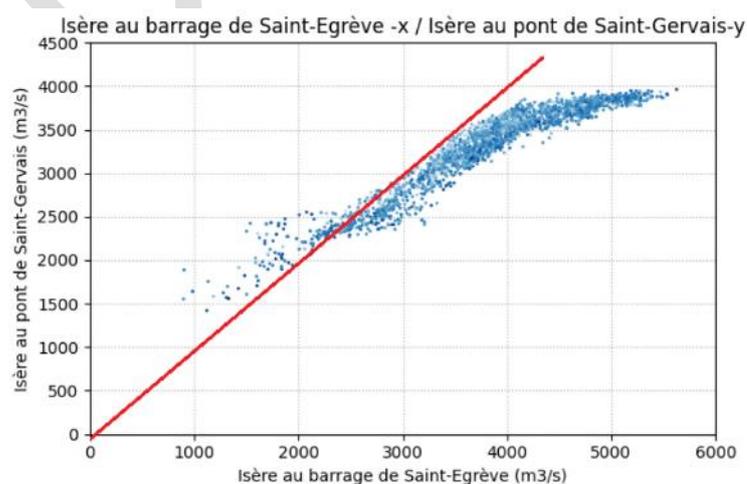


Figure 9. Analyse de l'influence de la plaine de Saint-Gervais

4. CONCLUSION

La méthode complexe présentée dans cet article permet de répondre aux limites des méthodes hydrologiques classiques vis-à-vis de l'hétérogénéité hydro-climatique et de l'influence hydraulique

(écrêttements amont par les barrages et les systèmes d'endiguements). Elle permet ainsi d'avoir une vision plus précise et réaliste du risque de crue extrême sur toute la rivière.

L'application de cette méthode tient compte d'une expertise globale, alliant différents domaines techniques (hydrologie, hydraulique, informatique et statistiques), accompagnée de moyens de calcul appropriés. Cette méthode est applicable à tout grand bassin versant complexe hydrologiquement ou hydrauliquement.

Cette méthode, bien que nécessitant plusieurs centaines d'heures de plus qu'une étude SCHADEX classique et des moyens de calcul conséquents, permet de :

- mieux comprendre le fonctionnement hydrologique global de la vallée et la coordination possible des aléas sur différents sous bassins,
- quantifier l'effet des grandes influences hydrauliques sur les crues extrêmes du bassin versant,
- intégrer toute la complexité hydrologique sans la résumer à un hydrogramme de projet unique forcément réducteur.

Dans le cadre des EDD, cette méthode améliore l'analyse de plusieurs façons :

- En cas de confluence en amont immédiat d'un barrage, les probabilités de répartitions de débits entre chaque affluent peuvent être établis pour affiner l'analyse de risque ;
- Les apports de débits pour une période de retour sont fournis avec l'influence précise des barrages amont et des systèmes d'endiguement, évitant parfois de forts conservatismes ;
- Dans les analyses des conséquences aval, les probabilités de débits des différents affluents aval pour un débit donné du cours d'eau principal peuvent être exploitées
- Plusieurs hydrogrammes peuvent être générés pour une même période de retour améliorant la robustesse de l'analyse vis-à-vis du risque hydrologique
- Des probabilités annuelles de cotes atteintes avec gestion saisonnière d'une retenue peuvent être établies

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Paquet, E., Garavaglia, F., Garçon, R., & Gailhard, J. (2013). The SCHADEX method: A semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation. *Journal of Hydrology*, 495, 23-37
- [2] Lassus, C., Vermeulen, J., Viard, T., Paquet, E., Rouillon, N. (2017). Outil d'estimation de la distribution complète des cotes de retenue atteintes en crue pour un barrage capacitif. In Colloque "Hydraulique des barrages et des digues". Chambéry : CFBR-SHF - 29,30 novembre 2017, 103-114
- [3] Garavaglia, F., Lay, M. L., Gottardi, F., Garçon, R., Gailhard, J., Paquet, E., & Mathevet, T. (2017). Impact of model structure on flow simulation and hydrological realism: from a lumped to a semi-distributed approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8), 3937-3952
- [4] Gottardi, F., Obled, C., Gailhard, J., & Paquet, E. (2012). Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains. *Journal of Hydrology*, 432, 154-167
- [5] Paquet, E. (2019) Synthetic hydrograph generation by hydrological donors, *Hydrological Sciences Journal*, 64:5, 570-586
- [6] Hayami, S. (1951). On the Propagation of Flood Waves. *Bulletins - Disaster prevention research institute, Kyoto University*, 1: 1-16