HAL
open science

Estimation de la distribution de cotes de retenue par simulation stochastique pluie-débit. Cas d'un ouvrage fictif

P. Arnaud, E. Paquet, Y. Aubert, P. Royet, J.A. Fine, M. Lang

To cite this version:

P. Arnaud, E. Paquet, Y. Aubert, P. Royet, J.A. Fine, et al.. Estimation de la distribution de cotes de retenue par simulation stochastique pluie-débit. Cas d'un ouvrage fictif. 25ème Congrès de la Commission Internationales des Grands Barrages/ ICOLD 25th Congress, Jun 2015, Stavanger, Norvège. pp.615-632. hal-01320947

HAL Id: hal-01320947

https://hal.science/hal-01320947v1

Submitted on 24 May 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COMMISSION INTERNATIONALE
DES GRANDS BARRAGES

VINGT-CINQUIÈME CONGRÈS
DES GRANDS BARRAGES
Stavanger, Juin 2015

ESTIMATION DE LA DISTRIBUTION DE COTES DE RETENUE PAR SIMULATION STOCHASTIQUE PLUIE-DÉBIT. CAS D'UN OUVRAGE FICTIF (*)

Patrick ARNAUD
Engineer researcher – Irstea

Emmanuel PAQUET
Hydrologist – EDF

Yoann AUBERT
Engineer – Hydris

Paul ROYET
Engineer researcher – Irstea

Jean-Alain FINE
Engineer – Hydris

Michel LANG
Engineer researcher – Irstea

FRANCE

1. INTRODUCTION

La variable clé pour le calcul de la stabilité des barrages est la cote du plan d'eau. En particulier, l'ouvrage ne doit pas être déstabilisé ou submergé pendant une crue survenant lors de son exploitation. Pour le dimensionnement des organes évacuateurs de crues, l'étude de l'aléa « cote du plan d'eau atteinte lors d'une crue » nécessite de ce fait une bonne caractérisation de l'aléa

(*) *Reservoir level frequency estimation using stochastic approaches based on rainfall-runoff modelling: application to a fictive dam.*

hydrologique aux temps de retour considérés, associée à une modélisation du fonctionnement hydraulique de l'ouvrage.

La complexité des processus naturels liés aux crues ne permet généralement pas leur modélisation complète par des approches purement déterministes, notamment pour les événements extrêmes. Ces processus naturels sont assimilés à des processus aléatoires (d'où le terme d'aléas) que l'on cherche à modéliser par des approches statistiques ou physiques plus ou moins complexes.

L'observation des phénomènes hydrométéorologiques sur de longues périodes permet d'extraire des variables d'intérêt qui servent à caractériser ces phénomènes. Ces variables considérées comme des variables aléatoires, sont associées à une distribution de probabilité théorique permettant d'extrapoler vers des fréquences plus rares que celles observées, et d'estimer ainsi différents niveaux de l'aléa en fonction des enjeux. On parle alors d'approche probabiliste, par opposition aux approches maximalistes telles que les méthodes PMP : Probable Maximum Precipitation et PMF : Probable Maximum Flood qui déterminent les événements extrêmes par une maximisation des conditions climatiques et hydrologiques pouvant les générer [*Collier and Hardaker*, 1996; *Hansen*, 1987; *Hershfield*, 1961; *Koutsoyiannis*, 1999; *Myers*, 1967] ; la réponse des ouvrages face à ces événements « maximaux » est alors étudiée. Cependant ces méthodes maximalistes n'offrent pas la possibilité de graduer l'aléa, information nécessaire pour aborder une gestion socio-économique du risque [*Hubert*, 2005].

Les méthodes probabilistes proposent par contre de fournir une information fréquentielle sur le phénomène. Elles s'appuient sur différents modèles statistiques calés sur les observations (qui sont généralement associées à des fréquences « courantes ») et utilisées en extrapolation vers les fréquences rares à extrêmes. Ces modèles probabilistes sont multiples et peuvent être classés en deux familles :

- les modèles s'appuyant sur l'ajustement de lois de probabilité directement sur la ou les variables d'intérêt (volume de la crue, débit de pointe) ;
- les modèles dits stochastiques qui visent à introduire une composante aléatoire dans une modélisation déterministe. Dans ce cas des ajustements de lois de probabilité sont effectués sur les variables intermédiaires d'un modèle déterministe.

Un évacuateur de crue doit être dimensionné pour limiter le risque de défaillance de l'ouvrage lors d'une crue. Ce risque est tributaire de l'aléa hydrologique, mais aussi des caractéristiques de l'ouvrage, de sa gestion et de ses dysfonctionnements possibles. Une étude complète de la fiabilité d'un ouvrage, en lien avec sa nature et son environnement, est donc un sujet particulièrement complexe qui nécessite parfois des hypothèses simplificatrices.

Cet article présente un exemple d'application lié au dimensionnement d'un barrage écrêteur de crue fictif. Différentes approches plus ou moins complexes sont présentées, qui tiennent compte de l'aléa et du fonctionnement de l'ouvrage : des méthodes classiques basées sur la détermination de crues de projet et des méthodes plus innovantes basées sur la simulation stochastique d'événements de crues. Le risque de submersion ou de déstabilisation de l'ouvrage y est évalué, en fonction de la connaissance de l'aléa hydrologique auquel il est soumis mais aussi en fonction de caractéristiques de gestion et de défaillance propres à l'ouvrage, par l'application de deux méthodes par simulation développées en France : la méthode SCHADEX et la méthode SHYPRE. Ce travail résulte en partie d'un projet de recherche d'inter-comparaison de méthodes de prédétermination de crues, le projet ANR Extraflo [*Lang et al.*, 2014].

2. LE CAS D'APPLICATION

L'application présentée ici porte sur un aménagement fictif (mais dont le dimensionnement est réaliste). L'étude porte sur l'estimation de la cote extrême, et la sensibilité de cette estimation à différentes options.

Cet aménagement fictif se situe en France sur le fleuve côtier Le Tech, dans les Pyrénées orientales, au droit de la station hydrométrique de Reynès. Son bassin versant a une superficie de 477 km². L'aléa hydrométéorologique de ce bassin versant peut être étudié à partir de données limnimétriques enregistrées à la station hydrométrique de Reynès depuis 1970, et de cinq stations pluviométriques situées dans le bassin versant ou à proximité. Son régime hydrologique est de type méditerranéen avec une composante nivale. Les précipitations annuelles sont voisines de 1000 mm et les débits moyens maximaux annuels enregistrés sont de 740 m³/s en journalier et 1130 m³/s en horaire.

Les caractéristiques de l'aménagement ont été définies pour qu'il assure un rôle écrêteur de crue et occasionnellement de soutien d'étiage pendant les périodes les plus sèches. Le déversoir du barrage est situé à la cote 197 m NGF, soit 65 m plus haut que la base du barrage. Le barrage est caractérisé par la présence d'une vanne de fond située à la cote de 140 m NGF (Fig. 1). Cette vanne fournit un débit Q_v qui suit la loi de vidange $Q_v = \mu_v . S . \sqrt{H}$, avec μ_v le coefficient de débitance (valeur de 0,85), S la section et H la hauteur d'eau au dessus de la vanne. La section prend deux valeurs distinctes pendant l'année (6,4 m² pour les mois de septembre à janvier et 3,2 m² pour les mois de février à août) pour permettre un stockage saisonnier en vue du soutien d'étiage et de vider la retenue avant les crues d'automne.

La crête déversante est située à une cote de 197 m NGF. Le déversoir fournit un débit Q_d donné par la loi classique de seuil dénoyé, $Q_d = \mu_d .L_d.(2.g)^{0,5}.h^{1,5}$, avec μ_d le coefficient de débitance de surface (valeur prise à 0,4), L_d la longueur déversante (110 m) et h la hauteur du plan d'eau au dessus du déversoir. Il a été dimensionné de manière à déverser un débit voisin de la valeur millénale pour une cote de la retenue de près de 202,5 m NGF.

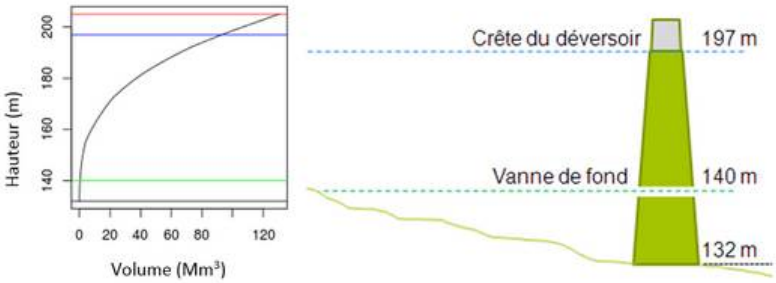

Fig. 1
Courbe Hauteur-Volume et caractéristiques du barrage.
Height-Volume curve and dam characteristics

La fonction de ce barrage est d'écrêter les crues, et accessoirement de soutenir les étiages. Le rôle d'écrêteur de crue est lié à sa grande capacité de stockage. À la cote du déversoir (197 m NGF), celle-ci est de 93 Mm³. Ce volume est supérieur au volume apporté par le débit moyen en 24 h de fréquence centennale. La courbe Hauteur-Volume est présentée sur la Fig. 1. Le rôle de soutien d'étiage est assuré par la vanne de fond qui permet de réguler les débits en sortie du barrage. Une règle de gestion de l'ouverture de cette vanne est possible en fonction de la saison. Des tests seront présentés en proposant des scénarios de gestion de cette vanne.

3. PRÉDÉTERMINATION DE L'ALÉA HYDROLOGIQUE

Deux méthodes, SCHADEX et SHYREG, permettant de prédéterminer l'aléa hydrologique par la simulation de nombreux scénarios de crues, sont mises en œuvre, ainsi que l'approche « classique » proposant une crue de projet unique.

3.1. MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE SCHADEX

SCHADEX est une méthode probabiliste d'estimation des crues extrêmes introduite en 2006 [*Paquet et al*., 2006]. Elle est depuis 2008 la méthode de référence pour l'estimation des crues de projets à EDF et a été appliquée dans des climatologies très variées sur plusieurs dizaines de bassins en France et à l'étranger [*Brigode*, 2013; *Garavaglia*, 2011]. Elle s'articule autour de trois composantes :

1. Un modèle probabiliste pour les pluies extrêmes qui s'appuie sur l'échantillonnage des observations suivant la situation météorologique générant les pluies [*Garavaglia et al*., 2011] ;
2. Une simulation pluie-débit stochastique dite « semi-continue », au pas de temps journalier [*Paquet et al*., 2013] ;
3. Un passage de la distribution des débits journaliers à celle des débits de pointe par un coefficient de forme.

Pour la composante 1, concernant l'analyse de la pluie spatiale du bassin du Tech, quatre saisons ont été distinguées, avec une « saison à risque » identifiée du 15 septembre au 14 novembre. Au sein de chaque saison, les pluies sont échantillonnées suivant huit types de temps, puis des lois exponentielles sont ajustées sur les quantiles élevés de ces sous-échantillons et finalement recomposées à l'aide des fréquences relatives de chaque type de temps en une loi composite, dite MEWP (« Multi-Exponential Weather Pattern »). Au sens de cette loi, la pluie spatiale journalière millénale pour le bassin du Tech s'élève à 388 mm.

La composante 2 s'appuie sur le modèle global conceptuel MORDOR [*Garcon*, 1999] utilisé depuis plus de 15 ans à EDF pour les prévisions opérationnelles et les études hydrologiques. Plusieurs centaines d'épisodes pluvieux indépendants et tirés au hasard sont simulés dans les conditions hydrologiques de chaque journée d'une chronique climatologique (ici 1968-2008). Ce procédé permet de croiser exhaustivement les aléas de précipitation et de conditions hydrologiques (saturation des sols, stock de neige), et ainsi d'explorer une grande variété de scénarios hydrologiques générateurs de crues. Tous les débits journaliers ainsi générés sont stockés, triés et probabilisés (à partir de la probabilité de l'épisode pluvieux générateur décrit entre autres par la distribution MEWP), de manière à constituer une distribution complète de débits journaliers. Cette dernière est confrontée à la distribution empirique pour contrôler qu'aucun biais n'affecte le processus (*Fig. 3*).

Pour la composante 3, l'analyse des ratios débit de pointe/débit journalier (via un coefficient de forme $Kc = QX/QJX$ où QX est le débit de pointe et QJX est le débit moyen journalier) s'appuie sur une sélection d'hydrogrammes de crues significatives enregistrés au niveau de la station hydrométrique. Dans le cas du Tech, 48 crues ont été retenues. L'approche proposée ici utilise un modèle liant

la dynamique des crues vue au pas de temps journalier, représentée par $K_v = Q_j / moy(Q_{j-1}, Q_j, Q_{j+1})$ (où Q_Q = QJX est le débit journalier maximum de la crue), à celle du coefficient de forme Q_Q, sous la forme $(K_c - 1) = a.(K_v - 1)$. Appliqué aux événements simulés par SCHADEX, il permet d'introduire une certaine variabilité dans le ratio débit de pointe/débit moyen journalier.

Chacune des crues simulées en débits journaliers se voit affectée d'un coefficient de forme calculé par ce modèle afin de calculer la valeur en pointe. Ces débits de pointe sont ensuite triés et probabilisés de la même manière que les débits journaliers, et leur distribution est comparée à celle des observations (Fig. 3). Enfin, la méthode a été complétée par un générateur d'hydrogrammes pour alimenter la simulation hydraulique de l'aménagement [*Penot*, 2011]. Les débits journaliers générés par SCHADEX permettent de calculer, pour chaque crue, son coefficient Q_Q (introduit plus haut), d'où le coefficient de forme Q_Q, ainsi qu'un indicateur supplémentaire $VAP = Q_{j+1} / Q_{j-1}$. Chaque crue générée peut donc être positionnée dans l'espace (Q_Q, Q_Q, QQQ). Dans cet espace, on sélectionne environ 20% des 48 hydrogrammes observés les plus proches de la crue générée, pour finalement composer un hydrogramme synthétique par combinaison linéaire de ces hydrogrammes sélectionnés, avec des pondérations issues des distances à la crue cible dans l'espace (Q_Q, Q_Q, QQQ). L'approche complète de la méthode SCHADEX au cas présenté conduit aux distributions de débit (journalier et de pointe) présentées sur la Fig. 3.

3.2. MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE SHYPRE

SHYPRE (acronyme de Simulation d'Hydrogrammes pour la PREdétermination des crues) est une méthode de prédétermination des crues basée sur la génération d'un grand nombre d'hydrogrammes de crues de formes variées. Ces hydrogrammes sont issus de la combinaison d'un générateur stochastique de pluies horaires [*Arnaud and Lavabre*, 1999; *Cantet and Arnaud*, 2014; *Cernesson et al.*, 1996] couplé à une modélisation hydrologique simple fonctionnant au pas de temps horaire [*Arnaud and Lavabre*, 2002; *Aubert et al.*, 2014].

Le générateur de pluies horaires s'appuie sur l'analyse descriptive du signal de pluie, par le biais de variables aléatoires dites « descriptives » (nombre d'averses, durée sèche entre les averses, volume, durée, forme des averses, etc.) et leurs lois de probabilité associées. Par le biais de tirages aléatoires dans leur loi, ces variables sont générées, en tenant compte de leurs éventuelles dépendances, de façon à reconstruire des chroniques de pluies horaires sur de très longues périodes de simulation. La mise en œuvre du générateur de pluies sur le territoire national français est facilement réalisable suite à un travail de régionalisation de ses paramètres : trois paramètres saisonniers décrivant l'occurrence, la durée et l'intensité des pluies, ont été cartographiés à une résolution kilométrique et servent à mettre en œuvre le générateur de pluie.

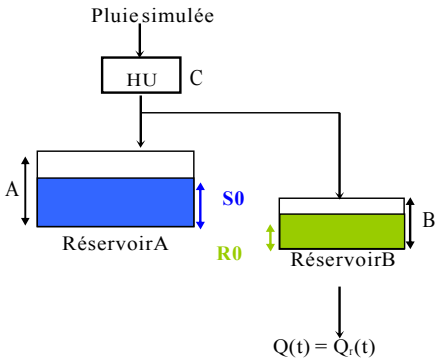

Fig. 2
Structure du modèle hydrologique GR utilisé dans SHYPRE
Hydrological model GR used in SHYPRE

Le modèle hydrologique utilisé dans la méthode SHYPRE est un modèle conceptuel composé de deux réservoirs (A et B) et d'un hydrogramme unitaire (Fig. 2). C'est un modèle événementiel qui nécessite d'initialiser le remplissage des deux réservoirs au début de chaque événement pluvieux. Certains paramètres ont été imposés à des valeurs régionales déterminées sur le territoire national français. C'est le cas de la taille du réservoir A (régionalisée en fonction du type d'aquifère, de l'altitude et de la pluviométrie locale [*Aubert*, 2012]) et du taux de remplissage du réservoir B qui est fixé à 30%. Les autres paramètres (le taux de remplissage initial du réservoir A, la capacité du second réservoir (B) et le temps de l'hydrogramme unitaire (C) sont optimisés de façon à ce que la méthode reproduise au mieux les quantiles de crues courants (de période de retour de 2 à 10 ans).Ces distributions de fréquence sont obtenues à partir d'une mise en fréquence des débits maximums extraits des crues simulées. Pour obtenir une stabilité de ces quantiles empiriques, on simule des périodes 100 fois plus longues que la période de retour maximale désirée. Par exemple, à partir d'une simulation de 1 000 000 d'années on extrait pour chaque crue simulée le débit maximum que l'on trie par ordre décroissant. Ceci nous permet d'obtenir une distribution de fréquence jusqu'à la valeur déca-millénale (valeur de rang 100). Les quantiles millénaux (respectivement centennaux et décennaux) seront obtenus par la valeur de rang 1000 (respectivement 10 000 et 100 000).

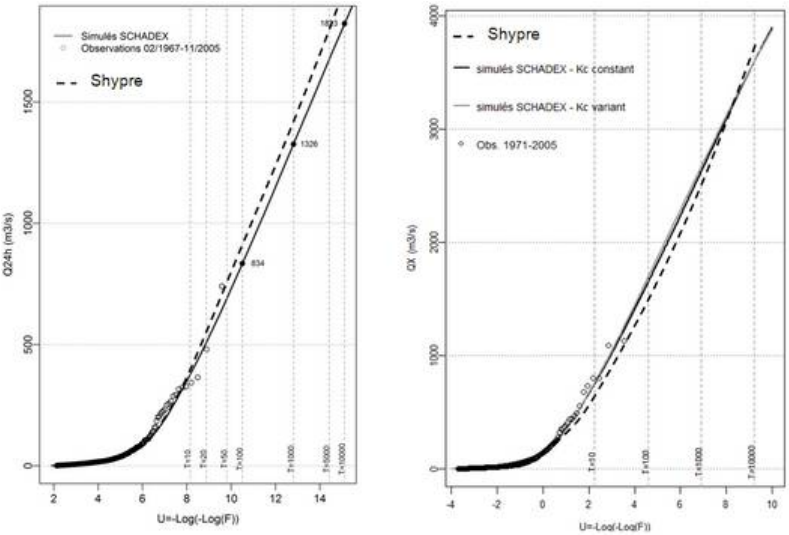

Fig. 3
Distributions des valeurs maximales de débit en 24 heures et de débit de pointe simulés par SCHADEX et par SHYPRE.
24 hrs-maximum flow values distribution and peak flow simulated by SCHADEX and SHYPRE

L'application complète de la méthode SHYPRE au cas présenté conduit aux distributions de débit (journalier et de pointe) présentées sur la *Fig. 3*.

Les deux méthodes présentées, dites par simulation, permettent de fournir une information complète sur l'aléa hydrologique. On dispose d'une multitude de scénarios de crue, statistiquement équivalents aux crues observées, qui permettent de tester le fonctionnement d'un ouvrage dans différentes configurations.

3.3. APPROCHE CLASSIQUE

L'approche dite « classique » correspond à l'approche par crue de projet unique. Une crue de projet est associée à une période de retour définie en fonction de l'ouvrage à dimensionner. Dans certains cas, la crue est associée à une seule caractéristique (généralement le débit de pointe) qui respecte une période de retour choisie. Des hypothèses sont alors faites sur la forme de la crue, qui ne garantissent pas le respect des autres caractéristiques de la crue. A

titre d'exemple, on testera trois formes de crues respectant toutes une valeur du débit de pointe millénal (estimé à 2500 m^3/s par les méthodes précédentes), mais présentant respectivement un biais de -30, 0 et +30% sur le volume millénal de la crue (estimé à 1400 m^3/s pour la durée 24 h). On se place dans ces cas dans la situation où le volume de la crue est inconnu (prédétermination de la valeur de pointe seule).

Dans un second temps, si la connaissance de l'aléa est disponible pour toutes les durées de débit (pointe et volumes), on peut construire une crue de projet dite « mono-fréquence » définie par des caractéristiques ayant toutes la même période de retour. Il est alors difficile d'associer une période de retour à une telle crue, même si on lui associe en pratique la période de retour des caractéristiques qui la composent. A titre d'exemple, trois formes de crues sont testées, ayant toutes exactement les mêmes caractéristiques en termes de débits (pointe et volumes) mais caractérisées par un débit de pointe situé au début, au milieu et en fin de crue (notées « Monofréquence »).

Notons que dans cette approche classique, nous faisons l'hypothèse importante que la conséquence d'une crue de projet (soit la cote atteinte suite au passage de cette crue) aura la même période de retour que celle de la crue considérée.

4. SIMULATION DES COTES

4.1. PROCÉDURE

La cote de la retenue, atteinte après une crue, est obtenue par un calcul hydraulique simplement réalisé par un bilan de l'eau de l'aménagement à pas de temps fin (30 secondes) en considérant l'hydrogramme entrant (crue de projet ou l'ensemble des crues générées par les méthodes SHYPRE et SCHADEX), la courbe de capacité de la retenue et les lois de comportement des organes évacuateurs (définies par leur débitance et leur fonctionnement hydraulique).

Dans le cas de l'approche « classique », la crue de projet est associée à une période de retour. On fait alors l'hypothèse que la cote atteinte par la retenue aura la même période de retour que la crue de projet.

Pour les deux méthodes par simulation, chacun des hydrogrammes de crue générés a été simulé hydrauliquement, puis les cotes maximales atteintes sont stockées puis triées de manière à constituer des distributions de fréquence complètes. Ces distributions peuvent ensuite être confrontées aux séries de cotes maximales annuelles simulées « en continu » à l'aide des chroniques hydrologiques observées (ou cotes « pseudo-observées ») à partir des

chroniques de débits observées sur la période 1968-2008. Cela permet de vérifier l'adéquation de la distribution des cotes simulées sur les fréquences courantes. Cette simulation « en continu » réalisée avec les débits observés permet aussi de fournir des informations sur la diversité et la saisonnalité des conditions initiales de remplissage de la retenue.

Notons que dans la méthode SCHADEX, les crues simulées sont « datées », la cote initiale de la retenue est donc celle du jour dans les conditions hydrologiques duquel la crue est générée.

Dans le cas de SHYPRE, qui est une simulation événementielle calée sur deux saisons de 6 mois (hiver : de décembre à mai et été : de juin à novembre), un fonctionnement mensuel a été testé en suivant les étapes suivantes :

- tirage aléatoire du mois étudié, qui est fonction de l'occurrence des évènements par mois ;
- tirage aléatoire de la cote du plan d'eau initiale pour le mois considéré (les lois de probabilité mensuelles de la cote initiale du plan d'eau sont modélisées par des fonctions polynomiales calées sur les distributions empiriques des cotes « pseudo-observées » avant l'arrivée d'une crue) ;
- détermination du coefficient de débitance imposé pour le mois étudié ;
- simulation d'un évènement pluvieux et d'un hydrogramme de crue ;
- laminage hydraulique de l'hydrogramme dans la retenue et stockage de la cote maximale atteinte.

4.2. COMPARAISON DES DEUX MÉTHODES PAR SIMULATION

Dans un premier temps une comparaison est faite entre les deux méthodes par simulation. Les distributions de cotes simulées par ces deux méthodes sont présentées dans la Figure 4.

On observe que malgré une mise en œuvre très différente, les méthodes donnent des résultats très proches et en adéquation avec la distribution empirique des cotes issues d'une modélisation en continu du fonctionnement de la retenue. Ces approches permettent de fournir une information relativement exhaustive sur le fonctionnement de l'ouvrage soumis à l'aléa, comme par exemple la distribution de fréquence des débits sortant de l'ouvrage (débits laminés), la période de retour associée à l'atteinte de la cote de déversement (15 ans dans le cas présenté), etc.

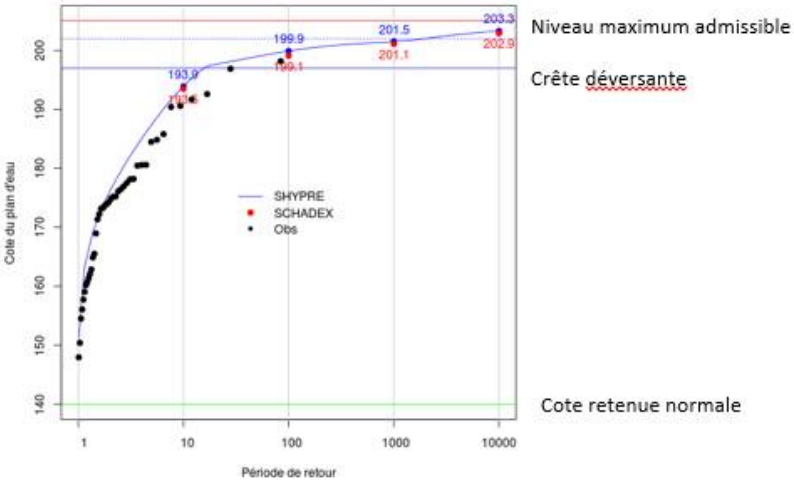

Figure 4
Distributions des cotes simulées par SHYPRE et SCHADEX.
Distribution of heights calculated by SHYPRE and SCHADEX.

4.3. COMPARAISON AVEC L'APPROCHE CLASSIQUE

Pour comparer les résultats de la méthode par simulation SHYPRE avec l'approche dite « classique » par crue de projet unique, nous nous plaçons dans les conditions de la règlementation française : cote de la retenue avant la crue égale à la cote de la retenue d'exploitation normale (cote RN). Pour notre application, cette cote est celle de la vanne de fond située à 140 m NGF.

Les calculs ont été réalisés pour des crues de projet de différentes périodes de retour et ont conduit aux résultats présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1
Comparaison des cotes extrêmes obtenues par les différentes méthodes testées (cote initiale = RN).

Méthode	Période de retour (an)			
	10	100	1000	10000
SHYPRE (mNGF)	192	199	201,2	203,2
Crue de projet Classique :				
• Volume -30%	182,1	197,5	199,6	201,7
• Volume « correct »	187,3	198,6	200,8	202,5
• Volume + 30%	195,1	199,9	201,8	203,6
Crue de projet Monofréquence :				
• pointe avant	187,3	198,6	200,8	202,5
• pointe centrée	186,9	199,2	201,3	203,3
• pointe après	186,9	199,2	201,4	203,3

Les écarts entre approche par simulation et approche classique sont donc notables pour certaines hypothèses que l'on fait pour l'estimation de la crue de projet unique. On voit que les incertitudes sur l'estimation du volume des crues peuvent avoir un fort impact sur la cote atteinte. Dans une moindre mesure, la forme de la crue de projet a aussi un rôle non négligeable.

Ces résultats sont bien évidemment dépendants du type d'ouvrage et de sa fonction. Cependant, on s'aperçoit que, suivant les hypothèses associées à la construction d'une crue de projet, les conséquences peuvent être importantes dans le dimensionnement de l'ouvrage.

4.4. TESTS COMPLÉMENTAIRES

Les méthodes par simulation présentent l'intérêt de modéliser l'ensemble des configurations possibles de l'aléa résultant d'un ensemble de configurations possibles de fonctionnement de l'ouvrage. Dans cette partie on teste des configurations supplémentaires, par l'approche SHYPRE uniquement, relatives à :

1 **Une modification de l'usage du barrage** : pour pouvoir assurer un soutien d'étiage plus fort, on suppose que la cote initiale est variable en fonction de la saison : RN = 140 m NGF entre les mois de septembre à avril et RN = 160 m NGF entre mai et aout.
2 **Une défaillance de certains organes** : la défaillance de l'ouvrage peut être modélisée par une baisse de la débitance des organes évacuateurs. Nous testons ici une défaillance ayant une probabilité annuelle d'apparition supposée de 0,001 et correspondant à une débitance nulle pour la vanne de fond (vanne bloquée) et une débitance réduite de moitié

pour le déversoir (présence d'embâcles). Cette défaillance a été associée à un processus :

a. indépendant de l'événement de crues (défaillance aléatoire) ;
b. ou fortement conditionné par l'événement de crues : la probabilité de défaillance est maximale pour les crues les plus fortes (défaillance conditionnée).

Les résultats sont présentés sur les graphiques de la Fig. *5*. Concernant l'hypothèse sur la cote initiale, on observe surtout une influence sur les cotes associées aux faibles périodes de retour. Bien que cette hypothèse ne remette pas en cause la cote millénale, elle montre des différences dans la fréquence de mise en service du déversoir. Par exemple, le déversoir est mis en fonctionnement deux fois plus fréquemment si on prend en compte la variabilité mensuelle de la cote initiale (Rini = f(mois)) par rapport à une cote initiale systématiquement prise à la valeur de 140 m NGF.

Pour l'hypothèse de défaillance, on observe qu'une défaillance aléatoire (de fréquence 1/1000) n'a pas d'impact notable sur la distribution des cotes maximales de la retenue. Par contre, la défaillance conditionnée conduit à des résultats sensibles ayant un impact direct sur le dimensionnement de l'ouvrage. Notons que cette hypothèse de défaillance dépendant de la gravité de l'aléa est réaliste : en cas de très fortes crues, les apports du bassin versant sont souvent chargés de troncs d'arbre ou autres objets flottants (voitures, débris etc.) pouvant générer des embâcles au droit de certains évacuateurs de crues.

Ces résultats montrent l'intérêt de l'approche par simulation qui permet de quantifier l'impact de ces hypothèses de façon précise.

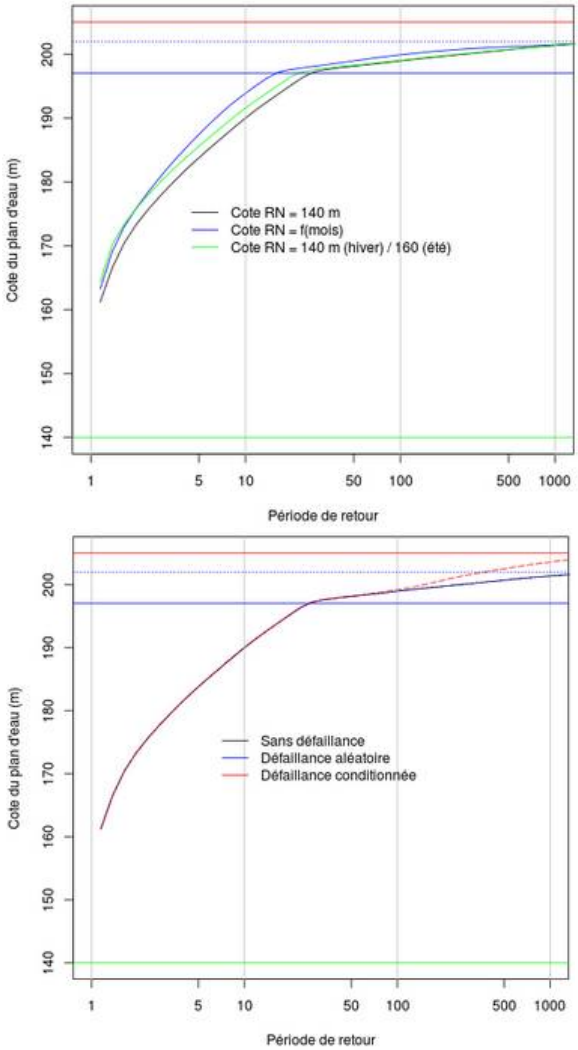

Fig. 5
Distributions des cotes de la retenue fournies par la méthode SHYPRE suivant différentes hypothèses de cotes initiales et suivant différentes hypothèses de défaillance de l'ouvrage.
Distribution of reservoir heights given by the SHYPRE method, according to various assumptions of initial heights and various assumptions of structure failure.

5. CONCLUSION

Cette étude présente la mise en œuvre de deux méthodes par simulation d'hydrogrammes de crues permettant d'estimer la distribution de fréquence des cotes d'eau atteintes dans une retenue. Ces méthodes permettent également d'avoir une approche plus exhaustive des configurations auxquelles sont soumis les barrages. Elles permettent ainsi de tester de multiples configurations probables et de fournir une aide à la décision quant au dimensionnement ou à la gestion de l'ouvrage, dans le respect d'éventuelles contraintes réglementaires.

Les résultats concernant ces deux méthodes par simulation montrent des convergences pour les fréquences d'occurrence extrêmes, à la fois sur l'estimation de l'aléa hydrologique mais aussi sur l'estimation de la distribution des cotes. Ces distributions de cote simulées, pour les deux approches, montrent une bonne cohérence par rapport aux observations. Ce point est important car les deux méthodes ne se calent à aucun moment sur les cotes maxima annuelles observées.

La comparaison avec l'approche classique (hydrogramme de référence et hypothèse sur la cote initiale) montre l'intérêt de l'approche par simulation qui fournit des scénarios diversifiés et évite que les valeurs de projet ne dépendent trop d'hypothèses lourdes de l'hydrologue (hydrogramme de référence) et du concepteur (cote initiale).

Les résultats présentés sont évidemment très liés au contexte hydrologique du bassin, au type d'organe hydraulique testé et aux caractéristiques de l'aménagement étudié, et ne sauraient être généralisés. L'étude met cependant en évidence les avantages d'une approche par simulation (hydrologique et hydraulique) de la cote extrême atteinte en crue :

- elle s'attache à décrire la variable clé qui conditionne la sécurité du barrage : la cote de la retenue, ce qui permet de « résumer » efficacement et rigoureusement le problème complexe de la caractérisation du temps de retour d'un scénario hydrologique basé sur plusieurs variables plus ou moins dépendantes ;
- elle explore une grande diversité de scénarios hydrologiques, avec de multiples variables prises en compte (saison, pluie, saturation du bassin, dynamique de la crue, cote initiale, défaillance des ouvrages d'évacuation…), ce qui permet de tester le plus complètement possible des options de conception et de gestion de l'ouvrage.

RÉFÉRENCES

[1] Arnaud, P., and J. Lavabre (1999), Nouvelle approche de la prédétermination des pluies extrêmes., in *Compte Rendu à l'Académie des Sciences, Sciences de la Terre et des planètes, Géosciences de surface, hydrologie-hydrogéologie*, edited by A. d. Sciences, pp. 615-620.

[2] Arnaud, P., and J. Lavabre (2002), Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation., *Water Resources Research*, *38*(6).

[3] Aubert, Y. (2012), Estimation des valeurs extrêmes de débit par la méthode SHYREG : réflexions sur l'équifinalité dans la modélisation de la transformation pluie en débit, thesis, 317 pp, Université Paris VI, Paris.

[4] Aubert, Y., P. Arnaud, P. Ribstein, and J.-A. Fine (2014), La méthode SHYREG débit - application sur 1605 bassins versants en France Métropolitaine, *in press Hydrological Sciences Journal.*, 1-14.

[5] Brigode, P. (2013), Changement climatique et risque hydrologique: évaluation de la méthode SCHADEX en contexte non-stationnaire, 318 pp, Université Paris VI.

[6] Cantet, P., and P. Arnaud (2014), Extreme rainfall analysis by a stochastic model: impact of the copula choice on the sub-daily rainfall generation, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 1-14.

[7] Cernesson, F., J. Lavabre, and J.-M. Masson (1996), Stochastic model for generating hourly hyetographs. , Atmospheric Research, n° 42, 149-161.

[8] Collier, C. G., and P. J. Hardaker (1996), Estimating probable maximum precipitation using a storm model approach., *Journal of Hydrology*, *183*(3-4), 277-306.

[9] Garavaglia, F. (2011), Méthode SCHADEX de prédétermination des crues extrêmes, 416 pp, Université de Grenoble.

[10] Garavaglia, F., M. Lang, E. Paquet, J. Gailhard, R. Garcon, and B. Renard (2011), Reliability and robustness of rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling, *Hydrology and Earth System Sciences*, *15*(2), 519-532.

[11] Garcon, R. (1999), Modèle global pluie-débit pour la prévision et la prédétermination des crues, *La Houille Blanche*, *7-8*, 88-95.

[12] Hansen, E. M. (1987), Probable maximum precipitation for design floods in the United States, *Journal of Hydrology*, *96*(1987), 267-278.

[13] Hershfield, D. M. (1961), Estimating the Probable Maximum Precipitation., *Proc. American Society of Civil Engineers, Journal Hydraulics Division*, *87*, 99-106.

[14] Hubert, P. (2005), La prédétermination des crues, *Comptes Rendus Geoscience*, *337*(1–2), 219-227.

[15] Koutsoyiannis, D. (1999), A probabilistic view of hershfield's method for estimating probable maximum precipitation., *Water Resources Research*, *35*(4), 1313-1322.

[16] Lang, M., et al. (2014), Résultats du projet ExtraFlo (ANR 2009-2013) sur l'estimation des pluies et crues extrêmes, La Houille Blanche, 2, 5-13.

[17] Myers, V. A. (1967), Estimation of extreme precipitation for spillway design floods., *Tech. Mem. WBTM HYDRO-5, U.S. Weather Bur., Washington, D.C.*, 29 pages.

[18] Organde, D., P. Arnaud, J.-A. Fine, C. Fouchier, N. Folton, and J. Lavabre (2013), Régionalisation d'une méthode de prédétermination de crue sur l'ensemble du territoire français : la méthode SHYREG, *Revue des Sciences de l'Eau*, *26*(1), 65-78.

[19] Paquet, E., J. Gailhard, and R. Garçon (2006), Evolution de la méthode du Gradex : approche par type de temps et modélisation hydrologique, *La houille blanche*, *5*(2006).

[20] Paquet, E., F. Garavaglia, R. Garçon, and J. Gailhard (2013), The SCHADEX method: A semi-continuous rainfall–runoff simulation for extreme flood estimation, *Journal of Hydrology*, *495*(0), 23-37.

[21] Penot, D. (2011), Génération de scénarios hydologiques de référence pour les crues de projet calculées par la méthode SCHADEX, *Rapport de projet de fin d'études, Grenoble INP-ENS3*.

RÉSUMÉ

Les méthodes d'estimation de crues extrêmes basées sur la simulation stochastique génèrent un grand nombre de crues de dynamique variable. En couplant ces méthodes à une simulation hydraulique de l'aménagement étudié, on produit une distribution des cotes maximales atteintes dans la retenue, à partir de laquelle on extrait une cote de projet. Cet article présente deux méthodes de simulation développées en France, SHYPRE et SCHADEX, appliquées à un barrage virtuel situé sur le Tech (477 km², Pyrénées-Orientales) et couplées à une simulation hydraulique de l'aménagement, afin d'établir les distributions de cotes maximales atteintes jusqu'à une période de retour 10 000 ans. Ces deux approches sont comparées à une approche plus classique basée sur la détermination d'une crue de projet unique.

Les résultats montrent que les deux méthodes par simulation conduisent à des estimations de débit et de cotes assez convergentes, en dépit d'importantes différences méthodologiques. La comparaison à l'approche classique montre que les résultats de cette dernière sont fortement tributaires des hypothèses que l'on peut faire sur l'estimation de la crue de projet.

Les méthodes par simulation permettent d'avoir une approche plus exhaustive des configurations auxquelles sont soumis les barrages. Elles permettent ainsi de tester de multiples configurations probables et de fournir une aide à la décision quant au dimensionnement ou à la gestion de l'ouvrage.

SUMMARY

The impact of hydrological hazard on the reliability of hydraulic structures is difficult to take into account from the complexity of the phenomenon. A common dam design practice toward flood risk is to simulate the reservoir level reached for a design hydrograph. However, the most critical hydrological scenarios are highly variable from one catchment to another, and depend on the characteristics of the dam, the reservoir, the spillways, etc. These scenarios are characterised by multiple variables (peak, volume, initial level, etc.), thus making complex the estimation of their return period.

The extreme floods estimation methods based on stochastic rainfall-runoff simulation generate a large number of floods with various dynamics. By coupling these methods with the hydraulic simulation of a dam, the distribution of maximum reservoir levels can be computed, from which design values can be extracted.

Two simulation methods, SHYPRE and SCHADEX, have been applied to a virtual dam located on the Tech catchment (477 km², France) and coupled with the hydraulic simulation of the dam, allowing to compute the distribution of the reservoir levels up to the 10 000 years return period. Several variables were analyzed to study the involved processes: peak flow, 24 and 72h flow, flood hydrographs, initial reservoir levels.

These two approaches produce neighbouring estimates of extreme flood and reservoir quantiles, despite significant methodological differences. Design reservoir levels were finally compared to the traditional approach consisting of simulating the abatement of a design hydrograph.

The advantage of these simulation methods is that they allow direct study of the structure response frequency distribution. The structure response depends on the dam functioning, its management and its probability of failure, which can be easily modelled. We can then study in an integrated manner, all operating scenarios of structure coupled to possible flood scenarios.