

Outils d'aide à la gestion de crise : de la prévision de crue à l'établissement de cartes d'inondation pour la coordination des actions

D. ALLIAU¹, P. BALAYN D. OUF

Compagnie Nationale du Rhône, 2 rue André Bonin, 69316 Lyon Cedex 04 – d.alliau@cnr.tm.fr; p.balayn@cnr.tm.fr; d.ouf@cnr.tm.fr

RÉSUMÉ. – Dans le cadre des missions de la Compagnie Nationale du Rhône, pour la gestion des crises et la coordination des actions du Concessionnaire, un certain nombre d'acteurs sont amenés à prendre des décisions en concertation sur l'ensemble de la vallée. Les exploitants et les services d'appui centraux ont alors besoin de disposer en temps réel et en projection à quelques heures, d'informations spatiales fiables pour décider des actions à réaliser. L'une des principales difficultés rencontrées lors du processus de décision est l'intégration, aux résultats et aux analyses sous-jacentes, des incertitudes issues de la propagation de la prévision hydraulique. CNR Ingénierie a travaillé ces dernières années sur (1) le traitement statistique de résultats de calculs 1D (couplage Prométhée-Crue mettant en œuvre une méthode de Monte-Carlo, en partenariat avec l'IRSN) et (2) sur l'approche cartographique et géo-visualisation pour la représentation spatiale des incertitudes de modélisation hydraulique à la CNR (outils de post-traitement Géogama-Crue).

Mots-clés : gestion de crise, propagation d'incertitudes, prométhée, crue, système d'information géographique

Tools for crisis management: from flood forecasting to flood maps for coordination of operations

ABSTRACT. – As part of the missions of the Compagnie Nationale du Rhône, for crisis management and coordination of actions, numbers of actors are required to make decisions in consultation throughout the Rhône valley. Operators and central support services need to have real-time projection and spatial information to decide what action to perform. One of the main difficulties in the decision process is the integration results and analysis, with uncertainties from flood forecasting. CNR Engineering has worked in recent years on (1) the statistical treatment of results of 1D calculations (Prométhée - coupling with Crue implementing a Monte Carlo method, in partnership with the IRSN) and (2) the mapping approach and geo-visualization for the spatial representation of uncertainties hydraulic modeling (tools Géogama-Crue).

Key-words: crisis management, uncertainties, prométhée, flood, geographic information system

I. INTRODUCTION

Depuis la directive européenne de 1996 sur l'ouverture du marché de l'électricité, transposée en droit français en 2000, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) est devenue producteur indépendant d'électricité et, à ce titre, commercialise l'hydroélectricité produite par ses 18 aménagements répartis le long du Rhône.

Avec ce nouveau statut et les missions afférentes, il est devenu nécessaire pour la CNR d'anticiper l'évolution des débits le long du bassin versant, afin d'être en mesure :

- de valoriser au mieux son électricité sur le marché,
- de répondre à ses obligations de producteur vis-à-vis du système électrique (participation au maintien de l'équilibre du réseau de transport d'électricité),
- d'optimiser l'exploitation et la maintenance de ses ouvrages,
- de continuer à assurer la sûreté hydraulique du Rhône.

Dans ce cadre, afin d'établir des programmes de production et des prévisions de débits pour des horizons de

quelques heures à quelques jours, une chaîne de prévisions hydrométéorologiques complète, allant des précipitations jusqu'aux prévisions de niveaux et de débits (en période énergétique mais aussi en période de crise, notamment en crue), a été développée et mise progressivement en place par la Direction de l'Ingénierie de la CNR [Bompard *et al.*, 2008]. Cette chaîne de prévision fait appel à un ensemble d'outils informatiques reliés les uns aux autres (figure 1, objets en jaune), intégrant également l'expertise humaine.

Dans le cadre de la gestion des crues et de la coordination des actions CNR sur l'ensemble de la vallée du Rhône, un certain nombre d'acteurs sont amenés à prendre des décisions en concertation. Les exploitants et les services d'appui centraux ont besoin de disposer en temps réel et en projection à l'horizon de quelques heures, d'informations hydrauliques fiables, en fin de la chaîne de prévision, pour décider des actions à réaliser.

L'une des principales difficultés rencontrées lors du processus de décision est l'intégration, aux résultats et aux analyses sous-jacentes, des incertitudes issues de la propagation hydraulique. CNR Ingénierie a travaillé ces dernières années sur **(1) la propagation d'incertitudes** dans le modèle hydraulique Crue9 et **(2) sur l'approche cartographique et**

¹. Auteur correspondant

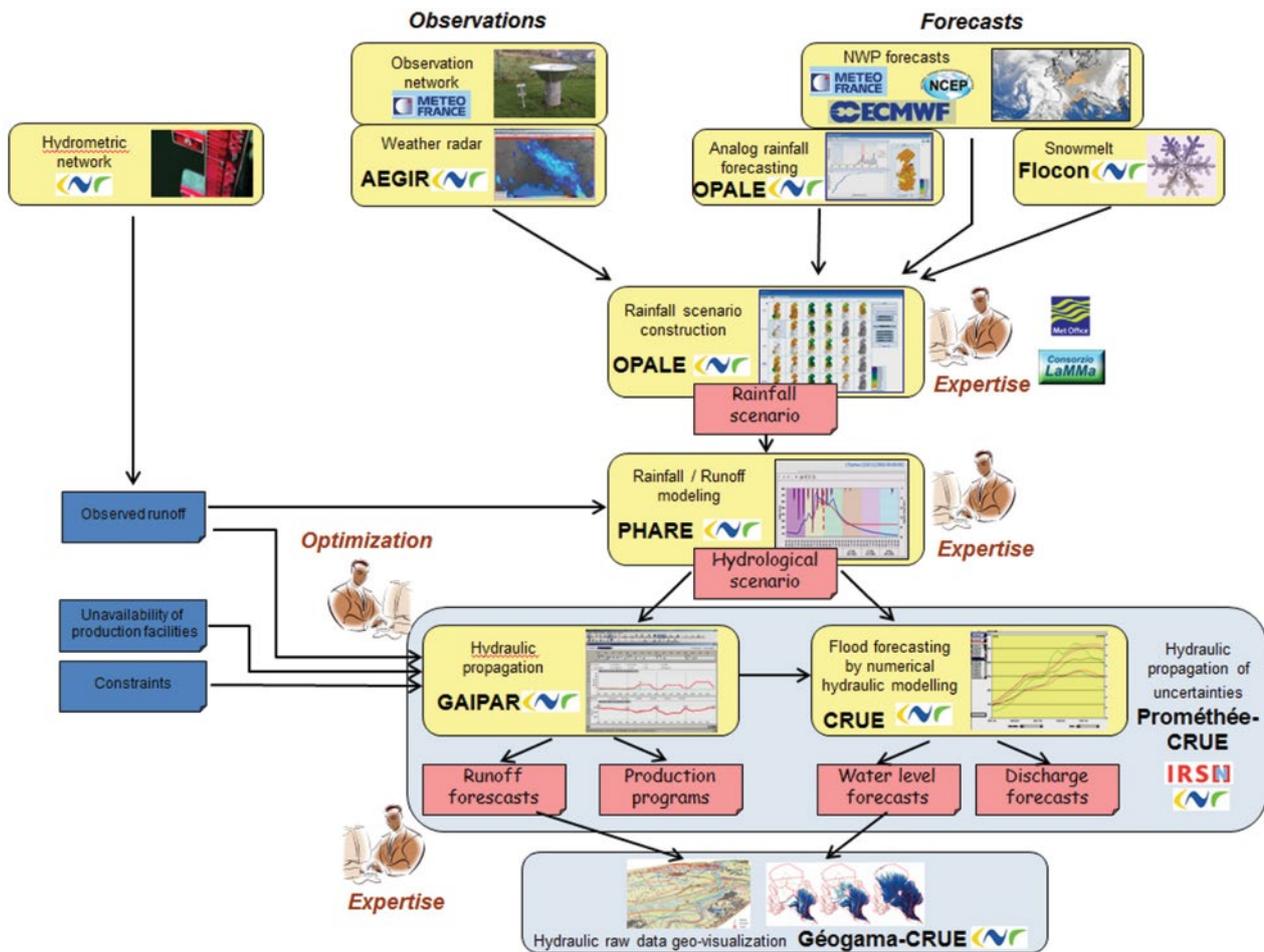


Figure 1 : Schéma de la chaîne de prévision hydrométéorologique en place à la CNR et perspectives d'évolution.

géo-visualisation pour la **représentation spatiale des incertitudes** de modélisation hydraulique à la CNR.

Le présent article propose d'explorer ces deux points particuliers au travers de cas d'études portées par la Direction de l'Ingénierie, objets en bleu clair sur la figure 1. Ces outils, bien qu'opérationnels indépendamment, ne sont pas encore déployés dans la chaîne opérationnelle.

II. PROPAGATION D'INCERTITUDES DANS LES MODÈLES HYDRAULIQUES 1D

Les modèles hydrauliques utilisés pour simuler les écoulements des crues du Rhône (via l'outil de calcul hydrodynamique Crue ou l'outil synthétique Gaipar) font appel à des conditions aux limites issues de la prévision hydrométéorologique. Compte tenu des incertitudes relatives à chacune des valeurs hydrologiques et à leur propagation dans un code hydraulique, quel est l'impact de leurs variations sur la cote atteinte au droit d'une zone à enjeux par exemple ? De même, peut-on déterminer un degré de confiance aux valeurs hydrauliques nominales calculées ? Il est proposé ici d'assister le prévisionniste par une approche stochastique.

II.1. Méthodologie

La démarche consiste à qualifier les sources d'incertitude du modèle (sur un ensemble de paramètres choisi parmi les

plus influents), à quantifier les plages et forme de distribution de ces paramètres variants, puis à les propager afin de disposer de résultats intégrant une quantification de ces incertitudes et clarifiant l'appréciation des marges associées (distribution de la variable d'intérêt).

II.1.1. Couplage Prométhée-Crue

Des démarches de propagation d'incertitudes sont mises en œuvre à l'IRSN depuis plusieurs années, notamment sur des codes de calcul en neutronique. Pour cela, l'IRSN a développé l'outil Prométhée² qui facilite le paramétrage et le lancement des codes de calcul et propose des outils statistiques d'interprétation des résultats des calculs. Prométhée permet de lancer dans un environnement distribué un nombre considérable de calculs, dans la démarche de modélisation numérique des incertitudes basée sur une méthode de type Monte Carlo.

Le code de calcul hydrodynamique Crue, développé par la CNR, simule le comportement hydraulique d'une rivière ou d'un système de canaux. Il repose sur une intégration numérique des équations de Barré de Saint-Venant, appliquées le long de branches décrites par des profils en travers, et complétées par des équations de lois d'ouvrages. Le code de calcul permet de représenter des réseaux ramifiés et maillés à casiers, en régime permanent ou transitoire.

2. Site Internet de l'IRSN, outils scientifiques développés.

Le couplage Prométhée-Crue [Nguyen *et al.*, 2013] permet de réaliser des propagations d'incertitudes dans un modèle hydraulique, c'est-à-dire de faire varier plusieurs paramètres d'entrée et de réaliser un nombre important de calculs en parallèle.

II.1.2. Les paramètres variants (ou variable d'entrée)

La détermination des paramètres variants, le choix des bornes extrêmes ainsi que le choix des lois de distribution attribuées à ces paramètres est le travail amont à réaliser avant d'entreprendre les calculs de propagation d'incertitudes. Le choix des valeurs minimum et maximum est complexe pour deux raisons :

- Il est nécessaire de réaliser une analyse de sensibilité et non une analyse de scénarios alternatifs : l'encadrement de la valeur nominale doit être « restreint » et correspondre aux mêmes hypothèses ;
- Le choix des valeurs extrêmes doit être justifié au regard d'éléments d'expertise ou de mesures si elles existent : le coefficient de frottement théorique pourrait être relié à des analyses granulométriques par exemple.

Les paramètres variants, appliqués à un aménagement du Rhône, se répartissent en différentes classes (liste non exhaustive) :

- Paramètres influents fixés par le calage ou paramètre numérique : [K] coefficients de frottement de Strickler lié à la rugosité des fonds et des bords, [Cs] coefficients de débitance des seuils déversants latéraux, et [Cd] coefficient de débitance du barrage de retenue.
- Conditions aux limites : il est intéressant de disposer de résultats fonction des variations des conditions hydrologiques ou des configurations des ouvrages : [Qa] débits des affluents, [Qe] débit entrant dans l'aménagement, et [Qus] débit sortant à l'usine.

Les incertitudes sur le débit entrant ou sur la configuration des ouvrages seraient *in fine* des paramètres à intégrer par le prévisionniste.

II.1.3. Lois de distribution des paramètres variants

Les lois de distribution et les gammes de variation des paramètres sont ensuite définies. Ces choix reposent essentiellement sur les connaissances d'experts, le type de

données, les hypothèses de probabilité d'apparition des valeurs de chaque variable.

De façon générale, l'hypothèse est faite que les valeurs moyennes des distributions des paramètres variants sont centrées sur les valeurs nominales. Cette hypothèse est retenue car on considère que l'incertitude sur les paramètres d'entrée a la même probabilité d'être positive ou négative autour des valeurs nominales. Considérant les paramètres nominaux comme les valeurs moyennes des distributions, on fait donc l'hypothèse que la probabilité la plus importante est celle de se trouver sur ces valeurs nominales.

Concernant le choix des lois de distribution, les différentes études antécédentes montrent que, par manque de données ou de connaissances, les lois de distribution classiques, à savoir gaussiennes ou uniformes, sont généralement retenues.

II.1.4. Échantillonnage selon la méthode de Monte-Carlo (tir statistique)

La méthode de Monte-Carlo permet la simulation de tirages aléatoires des variables d'entrée des modèles, sur la base de distributions statistiques. L'expression « simulation de Monte-Carlo » recouvre une série de techniques destinées à résoudre des problèmes complexes toujours probabilistes par l'introduction d'échantillonnages aléatoires.

Un calcul est par conséquent l'addition de n simulations (avec 1 ou k paramètres variants).

II.1.5. La variable d'intérêt (ou variable de sortie)

Les variables d'intérêt, en sortie du modèle, peuvent être des débits ou des cotes maximales atteintes. D'autres variables d'intérêt peuvent être imaginées, comme le minimum atteint sur la revanche d'une digue, par exemple.

Les grandeurs calculées et analysées sont des couples de valeurs du type {variable d'intérêt ; paramètre(s) variant(s)}. Elles permettent de caractériser le comportement du « système hydraulique » étudié.

Issu de l'étude [Alliau *et al.*, 2013], l'histogramme ci-après (figure 2) indique en vert les bornes de l'intervalle de confiance à 95 % autour de la moyenne expérimentale (dépendantes du nombre de tirs), et en rouge la valeur nominale. Ceci permet d'estimer si la correspondance

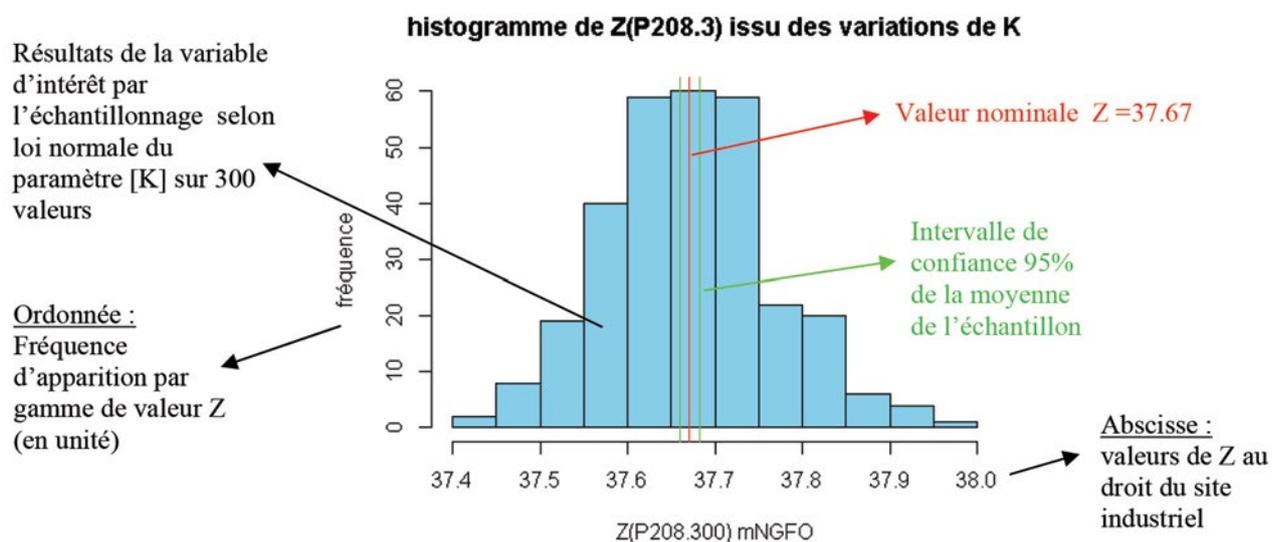


Figure 2 : Distribution de la variable d'intérêt Z selon échantillonnage ici du seul paramètre K selon une loi normale.

(ou non-correspondance) de la valeur nominale et de la moyenne de l'échantillon est statistiquement significative.

II.2. Enseignements issus des études CNR Ingénierie

S'agissant des premières applications opérationnelles hydrauliques d'envergure pour l'outil Prométhée-Crue à la CNR [Alliau *et al.*, 2013], le fonctionnement et les temps de traitement associés ont été jugés très performants vis-à-vis des linéaires de fleuve modélisés et de la complexité des organes hydrauliques 1D composant ce linéaire, qui plus est pour la représentation de phénomènes extrêmes avec contribution forte des lits majeurs.

Les analyses statistiques de propagation d'incertitudes sont encore en phase exploratoire [Nguyen *et al.*, 2013], notamment pour la hiérarchisation des paramètres, la détermination des paramètres d'entrée primordiaux à maîtriser, notamment pour diminuer la variabilité des sorties. Une intéressante perspective est d'étudier l'influence de la concomitance des hydrogrammes d'entrée avec ceux des affluents, afin d'étudier quantitativement leur contribution sur les cotes atteintes. Enfin, les dépendances entre les différents paramètres d'entrée (notamment par le biais du calage) sont encore à examiner.

Rappelons également que les récentes évolutions du référentiel technique français, dans le cadre de la sûreté nucléaire, impose d'évaluer la robustesse des études hydrauliques en analysant la prise en compte des incertitudes.

III. LE SIG, OUTIL D'AIDE À LA REPRÉSENTATION DE L'INCERTITUDE

Dans le cadre de la refonte du cœur de calcul Crue [Grimaldi *et al.*, 2012], la CNR a investi ces dernières années dans le développement d'outils hydrauliques : les logiciels d'étude Fudaa-Crue [Balayn *et al.*, 2014] et Géogama-Crue ont ainsi rejoint le panel des outils en production courant 2013.

Géogama-Crue est la composante spatiale à base géographique (ou Système d'Information Géographique, SIG) des modèles numériques Crue. Cet outil contient l'ensemble

des pré/post-traitements géographiques des informations hydrauliques (les profils en travers en sont un exemple). Il est ainsi possible de visualiser l'ensemble des variables hydrauliques calculées et les produits dérivés de l'analyse spatiale (surface inondée, hauteurs d'eau, temps de propagation des ondes) selon la dimension temporelle. La figure 3 permet par exemple de visualiser les résultats de calcul à différents pas de temps.

Bien que la CNR n'ait pas de mission réglementaire pour la gestion des zones d'expansion des crues, ces informations intéressent les exploitants pour la prévision et la coordination des actions à réaliser sur le territoire concédé du Rhône : il s'agira par exemple de programmer le déploiement des agents sur le terrain pour manœuvrer des ouvrages hydrauliques secondaires (siphons, vannes, stations de pompage), pour l'acquisition de relevés (laisses de crue) ou pour l'information éventuelle des Services de l'État et des collectivités par exemple.

Intrinsèquement, la modélisation Crue 1D [CNR, 2005] repose sur une représentation simplifiée de l'espace géométrique par des entités de modélisation de type profil en travers, ouvrages hydrauliques et casiers d'inondation. Cette modélisation numérique présente des sources de distorsion que l'on s'efforce habituellement de réduire par le biais d'analyses relatives ; c'est courant en contexte d'étude mais beaucoup plus délicat dans une situation réelle lors d'une crue :

- De façon générale, les modèles sont calés fidèlement (centimétrique à infra-décimétrique) aux observations et mesures courantes en lit actif (comprenant le lit mineur) ; en période de crue, et notamment en lit majeur, la réponse des modèles en niveau d'eau revêt une incertitude d'un ordre plus important (pluri-décimétriques) de par la qualité incertaine des données de calage et la discrétisation en entités hydrauliques cohérentes (casiers de plusieurs centaines de mètres).
- D'autre part, le croisement géographique entre une variable hydraulique calculée (cote ou niveau d'eau) et un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est soumis à la précision de ce dernier et à la pertinence du découpage en casiers choisi. Ainsi, l'application d'une cote unique à un casier de surface importante ou la variation de cotes entre casiers limitrophes sont des simplifications entachées d'erreur.

Dans ce contexte, l'adéquation entre la nécessité de disposer d'informations géographiques et les limites associées

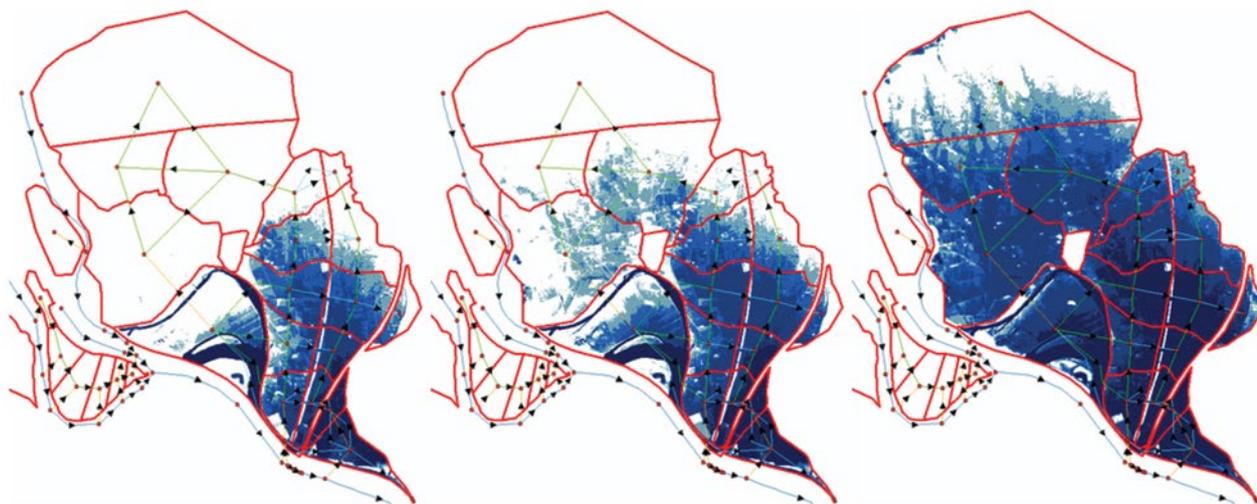


Figure 3 : Simulation du fonctionnement hydraulique d'une plaine d'inondation selon différents horizons temporels.

au type de modélisation, peut passer par la proposition d'informations de type statistiques, par exemple issues de Prométhée-Crue.

IV. ÉTUDE DE CAS : PRÉVISIONS HYDRAULIQUES SUR L'AMÉNAGEMENT DE BAIX – LE LOGIS NEUF

Afin d'étudier la faisabilité technique de déploiement des modules de propagation d'incertitudes et de représentation géographique, un modèle hydraulique de Baix – Le Logis Neuf a fait l'objet de simulations par Prométhée-Crue sur la base d'un scénario fictif de prévision hydrométéorologique (crue du 20 au 23/04/2009).

Du point de vue du fonctionnement général, rappelons qu'en crue, le siphon-déversoir de Printegarde s'amorce automatiquement dès que le Rhône atteint un niveau de 93,35 m NGFO au PK 126.800, correspondant à un débit du Rhône de 4700 m³/s environ. Son débit, de l'ordre de 20 m³/s, a pour effet de faire monter le niveau du petit Rhône, et d'avertir ainsi les habitants de la plaine de Printegarde qu'une inondation est possible.

La prévision hydraulique effectuée sur l'évènement fictif du 22/04/2009 indique des premiers déversements vers 4 800 m³/s dans le lit mineur du Vieux Rhône. La plaine s'inonde pendant une durée de 18h (figure 4) jusqu'à une cote maximale de 95,3 m NGFO au droit du lieu-dit des Petits Robins (figure 6).

Ces informations, pour un calcul nominal, permettent de comprendre la dynamique générale et d'apprécier les grandeurs hydrauliques dans les plaines d'inondation. En revanche, il est impossible pour le prévisionniste d'apprécier l'impact de l'incertitude sur le débit entrant dans le modèle (issu d'une prévision hydrométéo) et les cotes calculées dans les casiers, étant donné que la réponse du modèle n'est

a priori pas linéaire (la croissance du débit dans le Vieux Rhône n'est pas directement corrélée à la cote du casier). Si l'on combine l'incertitude liée aux estimations hydrologiques des différents affluents, alimenter la cellule de crise avec des informations pertinentes et certaines est complexe.

La figure 5 présente l'hydrogramme nominal et la distribution de résultats par propagation d'incertitude sur le débit entrant dans l'aménagement au barrage de Charmes sur Rhône (plage de variation maximale de +/- 5 %, distribution selon une loi normale). Les résultats de type $Q = f(t)$ sont disponibles au droit du siphon-déversoir de Printegarde. La réponse du modèle présente une distribution relativement asymétrique autour de la valeur nominale en raison du fonctionnement par déversement.

La figure 6 propose un traitement cartographique de l'information statistique issue de Prométhée-Crue : la surface d'inondation calculée à partir du MNT sous-jacent est fournie pour la valeur nominale et également pour les bornes maximales des simulations réalisées (min., max.). L'IC95 % est également spatialisé.

Dans notre cas de prévision hydraulique fictive, la distribution de résultats (cote d'eau par casier) induit une dispersion non négligeable des superficies inondées. Entre les intervalles IC95 % (lignes jaunes), il est possible de mesurer des écarts de la limite de zone inondée de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres, fonction de la morphologie du terrain naturel.

V. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION

Au-delà de l'appui à la robustesse des analyses hydrauliques, la propagation d'incertitudes et sa représentation SIG, sont des éléments essentiels pour l'information en temps de crise (ici, seule la crise de type crue a été développée) et la coordination nécessaire des actions qui en découlent.

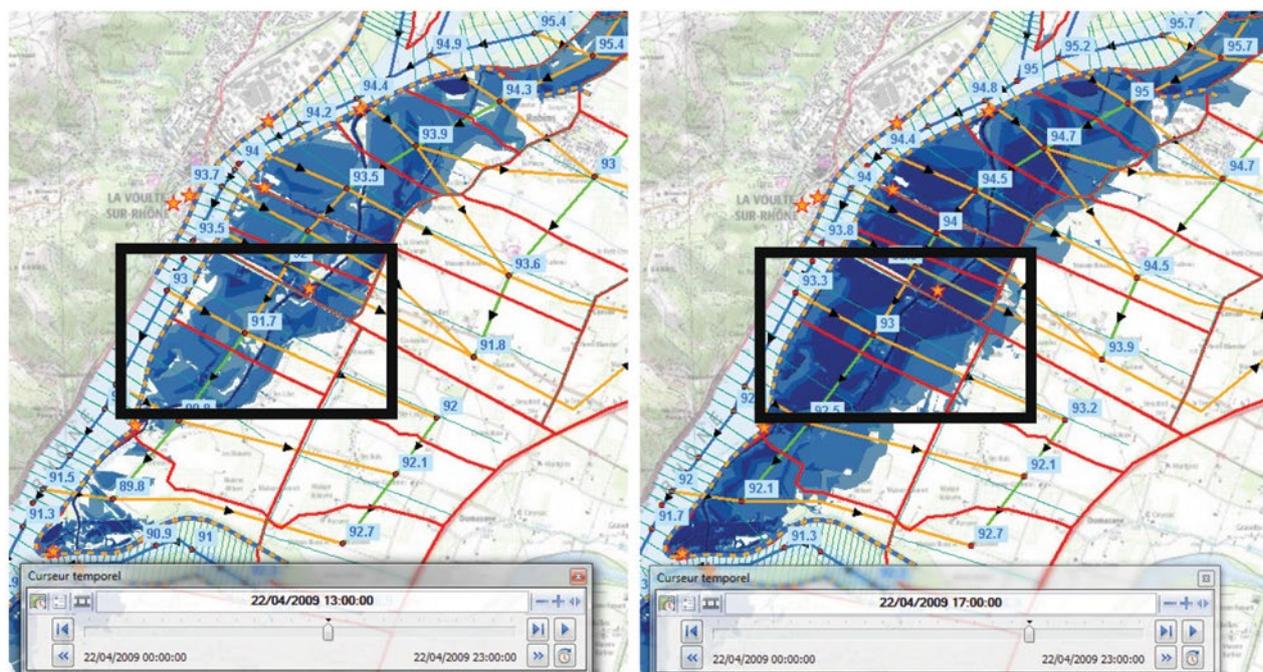


Figure 4 : Simulation dynamique du fonctionnement hydraulique de la plaine de Printegarde pour l'évènement fictif du 22/04/2009.

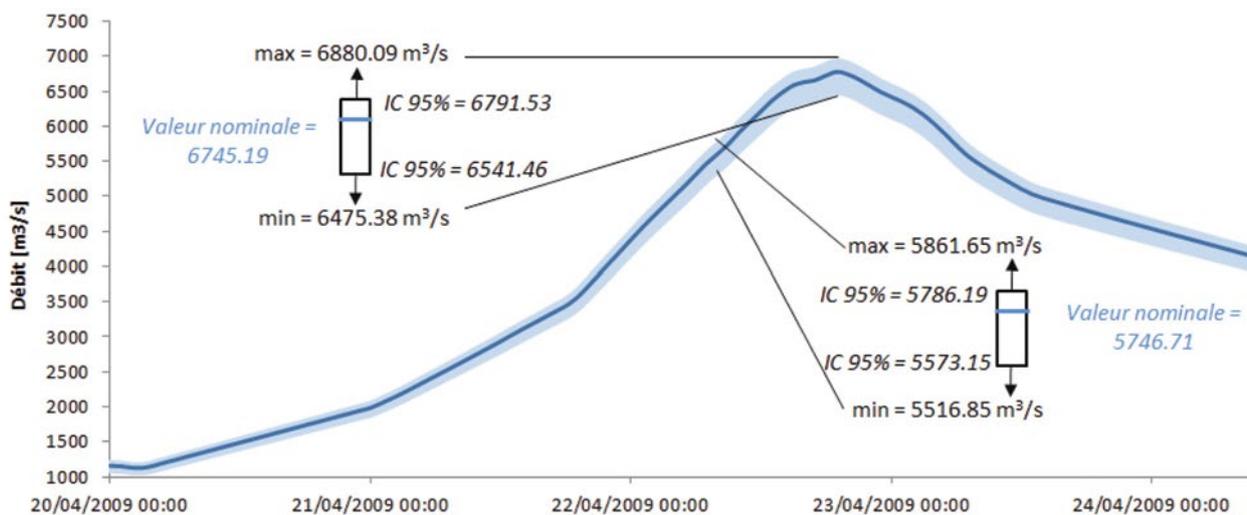


Figure 5 : Hydrogramme nominal et distribution statistique au droit du déversoir de Printegarde pour l'évènement fictif du 22/04/2009.

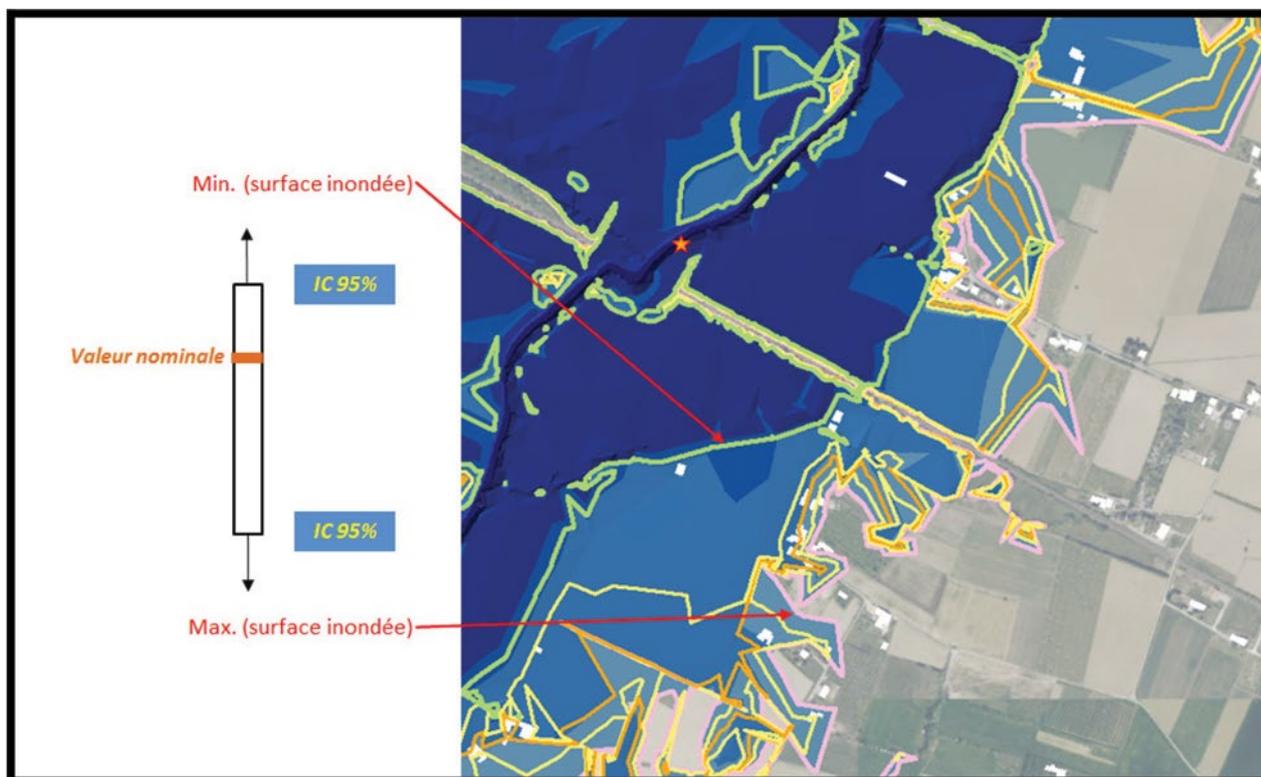


Figure 6 : Pointe de crue au droit du lieu-dit Petits Robin pour l'évènement fictif du 22/04/2009.

L'intégration de ces modules à la chaîne de prévision de la CNR reste à réaliser pour l'opérationnel. Elle nécessitera notamment de prendre en compte de manière générique les complexités inhérentes à la propagation d'incertitude en modélisation hydraulique : définition d'une plage de variation pertinente, combinaison de paramètres variants, dépendances de paramètres, contraintes calculatoires, robustesse des outils de traitement spatial, etc.

La spatialisation des résultats hydrauliques est immédiatement utile pour la clarté de la communication et le partage

d'informations non ambiguës entre les acteurs concernés par une crise : l'outil est donc forcément centralisé et c'est le support d'échange privilégié. En outre, le choix d'un environnement SIG ouvre la possibilité très riche de croiser les prévisions hydrauliques (et leur interprétation probabiliste) avec les plans d'action à réaliser lors de la survenue de certaines conditions hydrauliques. L'échéance prévue et la probabilité estimée de survenue de ces conditions permettent de préparer les alertes, de pré-positionner les équipes sur le terrain et constituent donc une précieuse aide à la décision.

Par ailleurs, le SIG constituerait également le lieu idéal pour représenter de manière spatiale le déroulement effectif des actions du plan.

VI. CONCLUSIONS

Dans le cadre de ses missions, la CNR met en œuvre une chaîne opérationnelle de prévisions qui embrasse la météorologie, l'hydrologie et l'hydraulique. En période énergétique, elle permet la prévision et l'optimisation de la production, et hors de cette période, elle constitue un support de décision. S'appuyant sur des expériences d'une part dans la propagation d'incertitudes en modélisation hydraulique et d'autre part dans la représentation SIG de résultats hydrauliques, une évolution de la chaîne de prévision est envisagée. Elle vise à améliorer l'aide à la décision en période de crise, par exemple en crue. Le résultat est une cartographie des prévisions hydrauliques, interprétable de manière probabiliste. Les sources d'incertitude sont les entrants hydrologiques et la configuration des ouvrages, mais aussi la structure du modèle hydraulique, son calage et le traitement géographique des résultats.

Dans un contexte opérationnel, la cartographie de résultats hydrauliques doit, sous peine d'occulter ces incertitudes, être mise en perspective par une présentation statistique des résultats. Cela ouvre alors la possibilité d'une chaîne d'outils riche, véritable aide à la décision en temps de crise.

VII. REFERENCES

- ALLIAU, DE SAINT SEINE, LANG, SAUQUET, RENARD (2015) — Étude du risque d'inondation d'un site industriel par des crues extrêmes : de l'évaluation des valeurs extrêmes aux incertitudes hydrologiques et hydrauliques. *La Houille Blanche*. **2** 67-74
- BALAYN, BATTISTA, DENIGER (2014) — Fudaa-Crue & Crue 10: Overview In New Concepts And Tools For Hydraulic Modeling. *Congrès SHF: Simhydro2014, Nice, 11-13 Juin 2014*.
- BOMPART, BONTRON, CELIE, HAOND (2008) — Une Chaîne Opérationnelle De Prévision Hydrometeorologique Pour Les Besoins De La Production Hydroelectrique De La Cnr. *Congrès SHF : « Prévisions hydrométéorologiques », Lyon, 18-19 novembre 2008*.
- CENTRE D'ETUDE DE L'EQUIPEMENT MEDITERRANEE (2001) — *Recensement et quantification des sources d'incertitudes externes - étude de sensibilité des modélisations 1D*. 67 p.
- COMPAGNIE NATIONALE DU RHONE (2005) — *Crue9 Logiciel de modélisation filaire des écoulements à surface libre*.
- FAHSI A., SOULAÏMANI A. ET TCHAMEN G.W. (2011) — Propagation des incertitudes en modélisation hydraulique des rivières. *La Houille Blanche*. **6** 42-48
- GRIMALDI, BALAYN (CNR) (2012) — La modélisation hydraulique au service de l'exploitation du Rhône. *Congrès SHF Simhydro 2012 : « New Trends In Simulation », Sophia Antipolis, 12-14 Septembre 2012*.
- NGUYEN, RICHET, BALAYN, BARDET (2015) — Propagation d'incertitudes dans les modèles hydrauliques. *La Houille Blanche*. **5** 55-62