

MODÉLISATION HYDRAULIQUE UNI-DIMENSIONNELLE DE LA PROPAGATION DES CRUES SUR LA SAÔNE ET LE DOUBS

*One-dimensional hydraulic modeling of flood propagation on the Saône and
Doubs rivers*

Auteurs : SIGAUD Jean-Michel^{1*}, PAYA Elodie¹, TIBERI-WADIER Anne-Laure¹,
CORSEZ Kevin¹, BERNARD Alexis¹, LAGANIER Elsa², DEVILLERS Patrice²

* *auteur correspondant*

¹Cerema, 25 avenue François Mitterrand, Cité des mobilités, 69500 BRON CEDEX

²DREAL Auvergne Rhône-Alpes, Service de Prévision des Crues Rhône amont-Saône,
5 place Jules Ferry, 69006 LYON

Résumé :

Le Service de Prévision des Crues Rhône amont-Saône, en charge de la surveillance et de la prévision des crues sur les bassins versants de la Saône et du Doubs, souhaite disposer d'un modèle hydraulique permettant de simuler la propagation des crues sur les axes Saône et Doubs. Il s'agit d'un modèle hydraulique 1D de type transitoire développé sous l'outil *Mascaret*^{®1} et exploité sous la POM (Plateforme Opérationnelle pour la Modélisation). Sa conception de type modulaire a été confiée au Cerema.

Malgré les simplifications apportées au modèle, justifiées en raison des contraintes techniques imposées par la POM et de la nécessité de disposer d'un outil puissant et robuste, les premiers résultats obtenus aux stations de contrôle paraissent pertinents en vue d'une exploitation opérationnelle pour la prévision des crues.

Mots-clefs : modélisation, hydraulique, unidimensionnel, propagation, crues, Saône, Doubs

Abstract :

The Flood Forecasting Service in charge of monitoring and forecasting floods in the Saône and Doubs watersheds, is looking for a hydraulic model to simulate flood propagation on the Saône and Doubs rivers. The model is a 1D transient hydraulic model developed using the *Mascaret*[®] tool and operated under the POM (Operational Platform for Modeling). Its modular conception was entrusted to Cerema.

Despite the simplifications made to the model, justified by the technical constraints imposed by the POM and the need for a powerful, robust tool, the initial results obtained at the monitoring stations appear to be relevant for operational use for flood forecasting.

Keywords: modeling, hydraulics, one-dimensional, propagation, floods, Saône, Doubs

¹ Présentation de Mascaret disponible sur le site :

<http://www.opentelemac.org/index.php/modules-list/138-mascaret-1-dimensionnal-free-surface-flow-modelling>

1. UN MODÈLE HYDRAULIQUE POUR AMÉLIORER LA PRÉVISION DES CRUES SUR LA SAÔNE ET LE DOUBS

Le Service de Prévision des Crues Rhône amont-Saône (SPC RaS) est en charge de la surveillance et de la prévision des crues sur 22 tronçons surveillés Vigicrues, dont la majorité sur les bassins versants de la Saône et du Doubs.

Pour assurer ses missions, le SPC RaS s’appuie jusqu’à présent sur plusieurs outils numériques pour la prévision des crues (modèle hydraulique sur le Rhône, modèles hydrologiques de type GRP pour les stations situées à l’amont, réglottes de Bachet, modèles de propagation statistiques de type relations linéaires ou relations linéaires avec accroissement pour les stations plus à l’aval), sans toutefois disposer de modèle hydraulique sur les axes Saône et Doubs.

Par l’intermédiaire du SCHAPI (Service Central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations), le SPC RaS a sollicité le Cerema pour l’élaboration d’un modèle hydraulique de propagation des crues de la Saône et du Doubs, permettant d’harmoniser les outils et d’améliorer la prévision des crues. Il s’agit à la fois d’augmenter les échéances de prévision (actuellement comprises entre 4h et 12h) et de mieux estimer les incertitudes associées.

Le modèle hydraulique, de type unidimensionnel (1D), fonctionne en régime transitoire. Il est développé sous *Mascaret*®, logiciel libre basé sur les équations de Barré de Saint-Venant. L’interface historique développée sous Fudaa a été remplacée en 2017 par un plugin *QGis* (Figure n°1). Le plugin rassemble au sein d’une même interface des outils puissants de pré et post-traitement. L’ergonomie du plugin, bien qu’encore en cours de développement et de consolidation, est particulièrement tournée vers la construction, le calage et l’exploitation de modèles de prévision de crues.

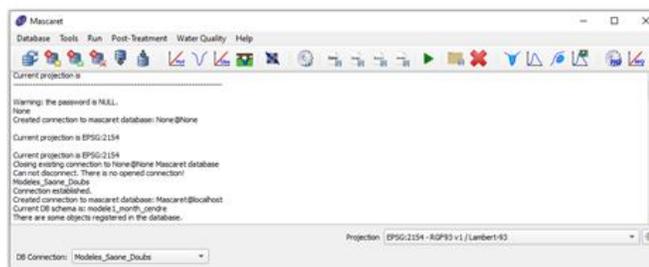


Figure 1: A gauche : fenêtre principale du plugin *Qgis Mascaret*® ; à droite : représentation graphique des modèles hydrauliques *Mascaret*® sous *QGis*

Mascaret® permet en outre de calculer les pertes de charge liées à la présence d’un ouvrage hydraulique. Plusieurs variétés de singularité hydraulique sont prises en charge par l’outil : ponts, seuils hydrauliques, ouvrages et seuils mobiles. L’outil gère également les casiers.

Il est particulièrement bien adapté à la comparaison des données entre simulations et observations issues des stations hydrométriques, en proposant notamment plusieurs outils de calculs de scores (critère de Nash-Sutcliffe, évaluation de l’erreur sur les volumes, écarts sur les pointes et décalages temporels, etc.).

2. UNE VASTE ÉQUIPE PROJET POUR UN LINÉAIRE DE MODÈLE AMBITIEUX

Le bassin Saône-Doubs, d’une superficie de 29 950 km², représente le tiers de l’ensemble du bassin du Rhône. Il constitue un territoire spécifique de par la lenteur de ses crues (excepté les secteurs les plus en amont), due à la morphologie de plaines et au régime pluvial océanique prédominant. Il comporte également des enjeux importants avec les agglomérations de Chalon-sur-Saône, Mâcon et Lyon concernées par les débordements de la Saône, et Besançon et Dole par ceux du Doubs.

Le modèle hydraulique développé par le Cerema couvre la Saône et le Doubs (hors affluents) sur un linéaire total d’environ 800 km, répartis comme suit :

- Axe Saône : 480 km de linéaire, depuis la station de Monthureux-sur-Saône (88) jusqu’à la confluence avec le Rhône (69),
- Axe Doubs : 320 km de linéaire, depuis la station de Glère (25) jusqu’à la confluence avec la Saône à Verdun-sur-le-Doubs (71).

Devant ce linéaire important, et en première approche, le parti pris a consisté à segmenter le modèle en 9 sous-modèles (11 sous-modèles initialement, 2 sous-modèles ayant été ensuite fusionnés), délimités à l’amont et à l’aval par des stations hydrométriques de référence issues du réseau Vigicrues (Figure n°2).

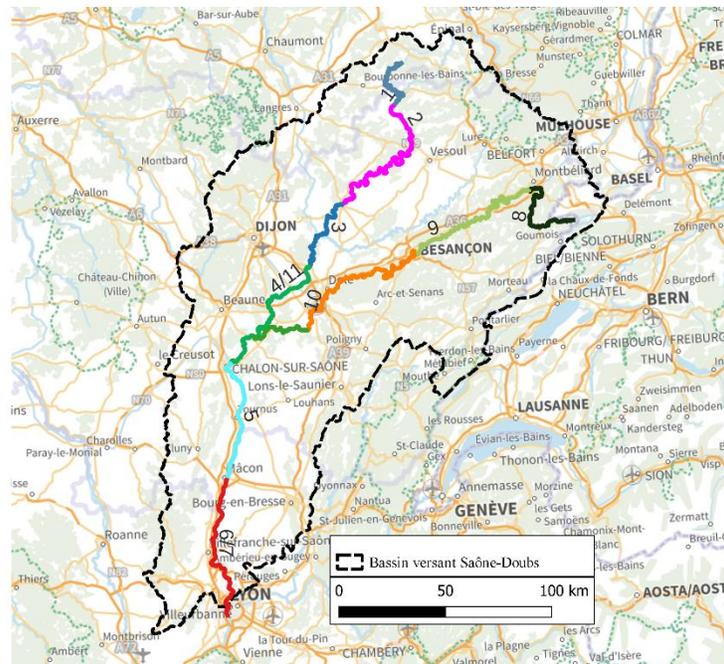


Figure 2: Cartographie du linéaire modélisé ; le modèle global est segmenté en 9 sous-modèles délimités par des stations hydrométriques de référence du réseau Vigicrues (les modèles 6/7 et 4/11 ayant été fusionnés pour une meilleure efficacité opérationnelle)

L’enchaînement des sous-modèles sous la Plateforme Opérationnelle pour la Modélisation (POM), outil du SCHAPI pour le pilotage des modèles de prévision de crues, permet ensuite de simuler en opérationnel la propagation des crues sur les tronçons souhaités. Cette solution modulaire a permis de confier le développement des sous-modèles à 7 équipes différentes du Cerema, mobilisant au total 13 modélisateurs. Le fonctionnement en équipe projet, ainsi que l’implication d’un nombre conséquent d’intervenants, ont été déterminants en :

- Favorisant les échanges techniques et les partages de pratiques, notamment dans le domaine du pré et post-traitement, des techniques de modélisation, ainsi que dans l’utilisation des bases de données hydrométriques et topographiques ;
- Impulsant une accélération du déploiement de l’utilisation de *Mascaret*® dans les différents services.

Cette utilisation collective des outils de développement a permis de mettre en évidence les points techniques problématiques du plugin *Mascaret*® de manière efficace, conduisant au fur et à mesure de l’avancée du projet à en améliorer très significativement les performances (par exemple : optimisation des temps de calcul, modélisation simplifiée des barrages mobiles et de certaines singularités hydrauliques, non prise en compte des canaux de navigation latéraux, prise en charge des débordements progressifs, interpolations inter-profils, etc.).

3. LES DONNEES MOBILISEES

3.1 Les stations hydrométriques

La base de données hydrométriques HydroPortail², alimentée et gérée par les unités hydrométriques des DREAL et le SCHAPI, a été doublement exploitée :

- D’une part, ces données servent à alimenter le modèle hydraulique en débits (hydrogrammes), qui sont injectés en condition limite amont sur la branche principale du modèle et en différents lieux du linéaire, permettant ainsi de prendre en compte la contribution des principaux affluents de la Saône et du Doubs ;
- D’autre part, ces données permettent de contrôler les résultats en certains points d’observation du modèle, facilitant ainsi le calage des différents sous-modèles à partir des données hydrométriques collectées lors des crues de la Saône et du Doubs.

Une première analyse critique des données des stations hydrométriques situées sur la Saône et le Doubs a permis de sélectionner les stations dites « de référence », sur lesquelles s’appuie le découpage en sous-modèles. Il s’agit de retenir les stations jugées fiables (en termes de qualité des mesures et de courbes de tarage) et disposant de chroniques historiques suffisamment longues pour couvrir les principales crues de la Saône et du Doubs. Les données des autres stations hydrométriques sont exploitées pour le contrôle des résultats (étapes de calage et de validation des modèles hydrauliques).

Quant au choix des stations hydrométriques des affluents, plusieurs critères ont été regardés :

- La part de contribution de l’affluent dans le débit global de la branche principale du modèle : seuls les principaux affluents de la Saône et du Doubs ont été retenus ;
- En cas de présence de plusieurs stations sur un même affluent, la station située la plus proche de la confluence a été privilégiée, afin de faciliter le calage des sous-modèles et limiter ainsi les biais associés au décalage temporel.

Concernant ce dernier point, la correction apportée aux hydrogrammes des stations hydrométriques des affluents est double :

$$Q_{\text{affluent_injecté}}(t) = A \cdot Q_{\text{affluent_station}}(t - \Delta t) \quad (1)$$

où $Q_{\text{affluent_injecté}}$ désigne l’hydrogramme de l’affluent injecté dans la branche principale du modèle, $Q_{\text{affluent_station}}$ l’hydrogramme de l’affluent mesuré à la station hydrométrique, A le coefficient de

² site Hydroportail : <https://hydro.eaufrance.fr/>

pondération permettant de compenser les différences de surface des sous-bassins versants et Δt le décalage temporel associé au linéaire de l’affluent compris entre la station et la confluence.

En première approche, A est estimé à partir de la formule de Myer, applicable pour des bassins versants proches et ayant des caractéristiques physiques semblables :

$$A = \frac{Q_{\text{affluent}_{\text{injecté}}}}{Q_{\text{affluent}_{\text{station}}}} = \left(\frac{S_{\text{BV}_{\text{affluent}_{\text{injecté}}}}}{S_{\text{BV}_{\text{affluent}_{\text{station}}}}} \right)^\alpha \quad (2)$$

où $S_{\text{BV}_{\text{affluent}_{\text{injecté}}}}$ désigne la superficie du sous-bassin versant de l’affluent dont l’exutoire est situé à la confluence avec l’axe Saône/ Doubs et $S_{\text{BV}_{\text{affluent}_{\text{station}}}}$ la superficie du sous-bassin versant de l’affluent dont l’exutoire est situé à la station, α est fixé à 0.8 (par analogie avec la méthode de CRUPEDIX).

Le coefficient A est ensuite ajusté lors de la phase de calage du modèle.

De façon comparable, Δt peut être estimé à partir du linéaire compris entre la station et la confluence avec l’axe Saône / Doubs et la vitesse de propagation estimée sur l’affluent. Cette valeur est ensuite ajustée lors du calage du modèle.

Au total, 15 stations sur la Saône, 10 stations sur le Doubs et 23 stations sur les affluents ont été exploitées pour le calage du modèle (Figure n°3). En opérationnel, tout ou partie de ces stations permettent d’alimenter en temps réel le modèle hydraulique exploité sous la POM, selon les enchaînements considérés par le SPC RaS.

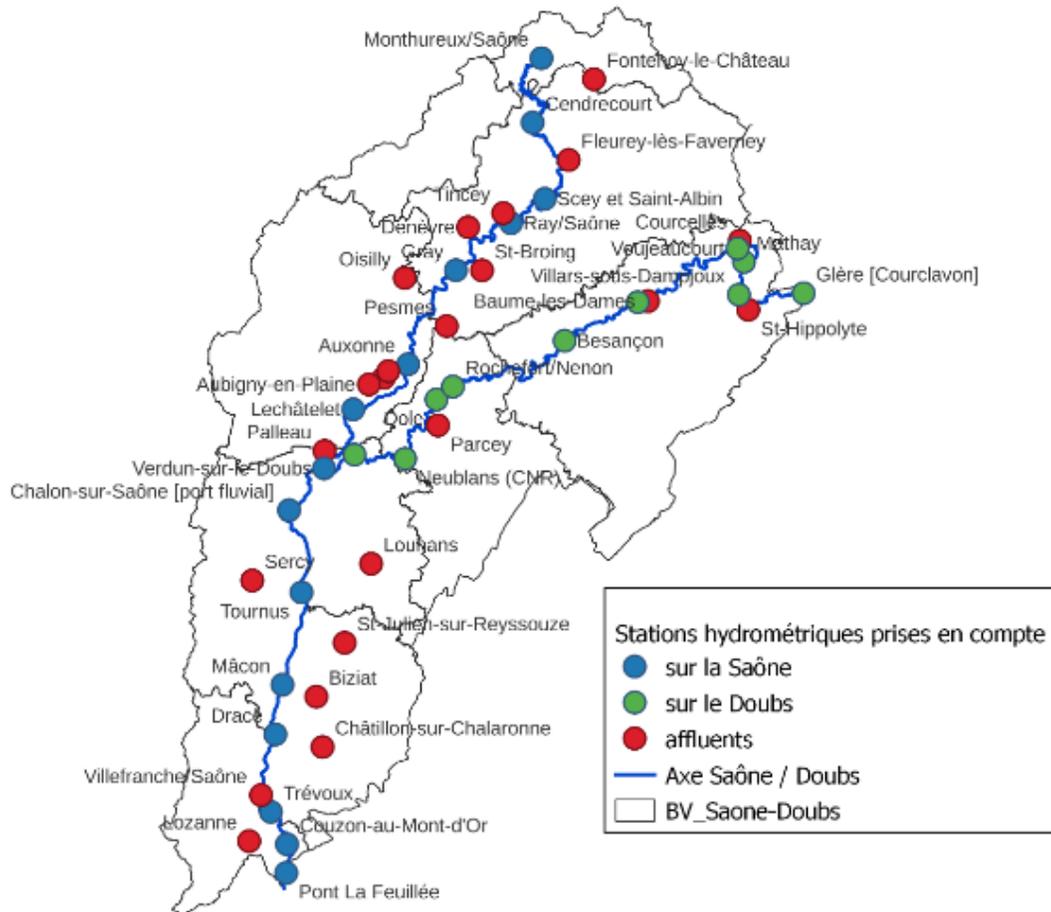


Figure 3: Stations hydrométriques exploitées pour le calage du modèle

3.2 Les données bathymétriques et topographiques

La construction des différents sous-modèles a mobilisé de grandes quantités de données bathymétriques et topographiques, d’origines diverses et de qualités très variées (bathymétrie VNF sous forme de levés continus de points, profils levés pour des études de PPRi, profils bathymétriques levés spécifiquement pour l’étude, RGE Alti® de l’IGN au pas de 1m et 5m, etc.). A raison d’une densité moyenne de 1 profil en travers tous les km hors singularité hydraulique, ce sont au total près d’un millier de profils en travers qui ont été exploités, en comptant les profils utilisés pour simuler les seuils hydrauliques, très nombreux sur la Saône et le Doubs.

Pour faciliter la manipulation de ces données particulièrement lourdes et hétérogènes, des solutions de traitement innovantes ont été imaginées pour certains sous-modèles, comme par exemple la construction d’un modèle topo-bathymétrique continu, obtenu en fusionnant les données du RGE Alti® (exploité pour la topographie du lit majeur) avec un modèle bathymétrique continu reconstitué par interpolation des profils en travers bathymétriques (Figure n°4). Pour ce faire, une attention particulière a été portée à la délimitation des berges du cours d’eau modélisé, comme l’illustre la Figure n°5 ci-dessous, où une vérification a été faite à la fois sur les données topographiques du LIDAR et sur les orthophotographies.

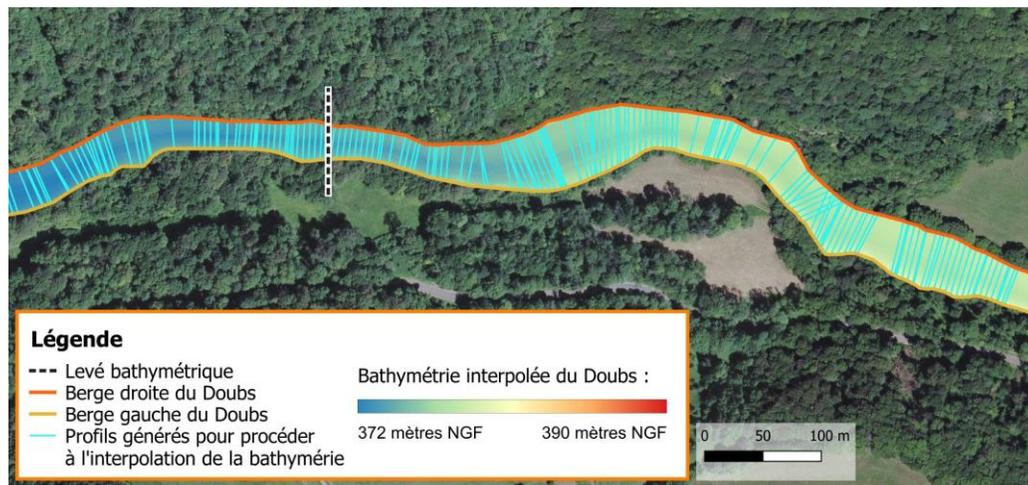


Figure 4: Interpolation des profils en travers en vue de constituer un modèle bathymétrique continu

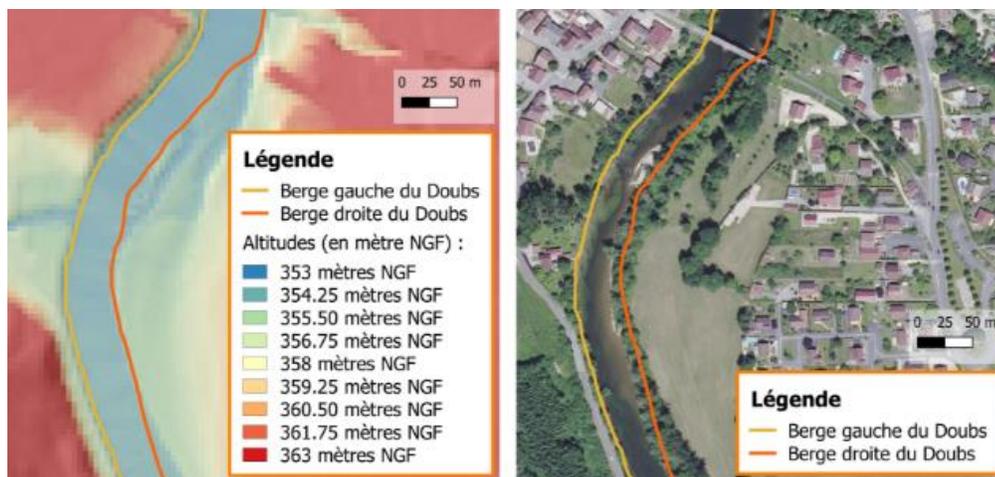


Figure 5: Construction des berges du Doubs à l'aide d'un levé LIDAR (à gauche) et d'orthophotographies (à droite)

4. LES DEFIS TECHNIQUES A RELEVER

Les principales difficultés rencontrées lors de l’élaboration des sous-modèles ont consisté à prendre en compte un fonctionnement hydraulique complexe, tout en répondant à la fois aux impératifs liés à la modélisation 1D (notamment la problématique de la représentation des écoulements en lit majeur) et au fonctionnement opérationnel (temps de calcul réduit, stabilité des calculs, impossibilité d’utiliser le module « barrages mobiles » dans la plateforme de pilotage des modèles du SCHAPI – POM au moment de la construction des modèles), le tout pour des modèles couvrant des faciès de rivières variés et dont les problématiques prépondérantes ne sont pas les mêmes. Sur les modèles amont, les incertitudes hydrologiques ont été prépondérantes. Sur des modèles situés plus à l’aval, ce sont des particularités hydrauliques avec des conséquences hydrométriques, notamment l’importance de phénomènes d’hystérésis, qui ont nécessité un soin particulier. Enfin, la présence de nombreux ouvrages hydrauliques (dont les barrages mobiles) nécessite de reproduire au mieux la physique des écoulements en toutes circonstances à partir d’un panel limité d’outils de modélisation, compatibles avec un modèle robuste et opérationnel.

4.1 La représentation des ouvrages hydrauliques

Entre la confluence avec le Doubs et Villefranche-sur-Saône, le lit majeur de la Saône est structuré par des digues agricoles qui forment une trentaine de casiers dont le remplissage lors des épisodes de crue est géré par des vannages. Lors des crues de janvier 2018 et janvier 2021 plusieurs digues ont connu des surverses ou ont cédé. Aujourd’hui, de nombreux ouvrages sont en déshérence et les règlements d’eau oubliés, rendant impossible leur prise en compte dans le modèle hydraulique. L’écêtement assuré par ces casiers étant modeste et limité à des gammes de débit relativement faibles, la dégradation de performance induite reste acceptable pour l’utilisation opérationnelle du modèle.

Par ailleurs, la Saône et le Doubs comportent de nombreux seuils hydrauliques et barrages mobiles qui permettent la navigation fluviale l’essentiel de l’année (hors épisodes de crue). Ces barrages et ces seuils se traduisent, dans le modèle topo-bathymétrique axé sur le cours d’eau naturel, par des chutes importantes de bathymétrie. Lorsque des profils en travers sont positionnés à proximité de ces chutes de bathymétrie (de façon à les encadrer et à les décrire finement), des pertes de charge importantes sont constatées, pouvant ainsi empêcher les simulations d’aboutir. L’intégration de ces ouvrages et autres singularités hydrauliques dans le modèle est essentielle pour reconstituer correctement les lignes d’eau en régime fluvial, et s’assurer que le modèle hydraulique reste stable lors des simulations de crues.



Figure 6: exemple de barrage mobile sur la Saône - le barrage de Couzon (source VNF)

À ce stade d’avancement de l’outil *Mascaret*®, la régulation hydraulique par les barrages mobiles n’a pas été intégrée, la POM ne prenant pas en charge cette fonctionnalité au moment de la construction des modèles. Ils ont donc été intégrés en tant que seuils fixes abaissés (identiques aux conditions de crues). Cette fonctionnalité devrait pouvoir être prise en compte lors des futures versions de la POM. Ce choix technique contraint, au même titre que la non-prise en compte des casiers agricoles, ne remet néanmoins pas en cause l’efficacité du modèle pour les gammes de crues qui intéressent le SPC en opérationnel, pour lesquelles ces barrages se comportent comme des seuils fixes.

4.2 Un phénomène d’hystérésis marqué au droit de certaines stations hydrométriques

Parmi les difficultés techniques rencontrées, le phénomène d’hystérésis impacte directement la qualité des données hydrométriques injectées dans les sous-modèles. La relation entre le débit Q et la hauteur d’eau h (courbe de tarage) peut alors être affectée en cas de crue, c’est-à-dire devenir non-univoque et prendre une forme de boucle (voir Figure n°7). Pour une même hauteur d’eau, le débit sera alors plus fort lors de la montée de crue que lors de la décrue. Le maximum de débit Q_{max} sera alors atteint avant le maximum de hauteur d’eau h_{max} [1].

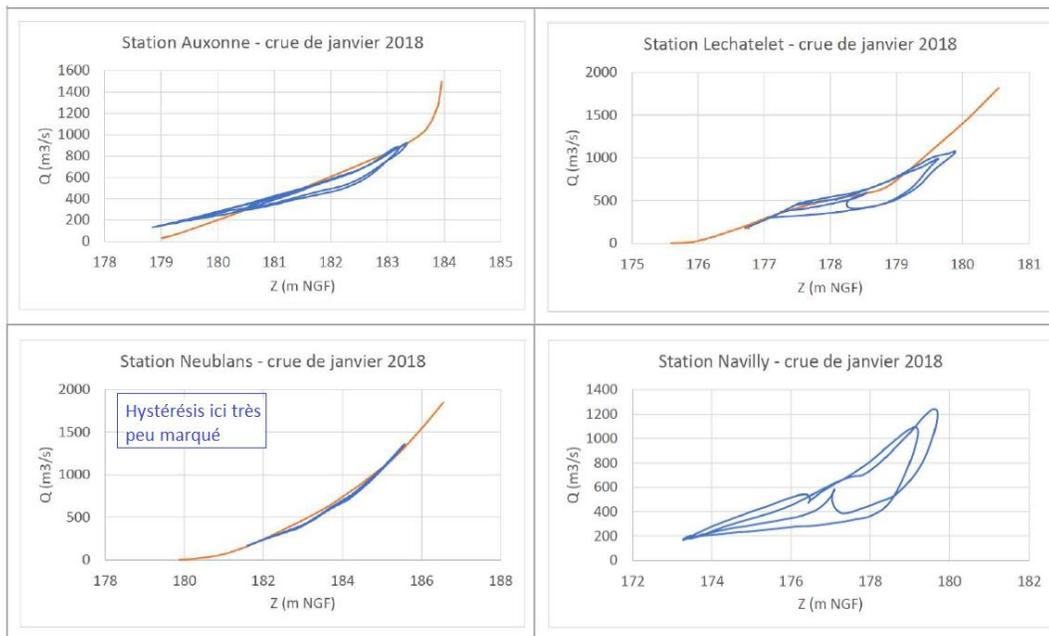


Figure 7 : Illustrations du phénomène d’hystérésis sur la crue de Janvier 2018 : en orange les courbes de tarage appliquées (validés par le SPC RaS) et en bleu les trajectoires reconstruites par les simulations

Cet hystérésis, plus marqué sur les tronçons situés à l’aval, vient biaiser les débits cibles devant être injectés en entrée des modèles (déduits des hauteurs d’eau relevées aux stations) du fait d’une relation hauteur-débit non univoque, rendant alors impossible le calage des modèles à la fois en hauteur et débit, et sur l’ensemble du linéaire.

4.3 Une incertitude forte sur les données hydrologiques

Sur les tronçons amont du Doubs et de la Saône, les problèmes de sous-estimation des débits aux stations aval des modèles ont donné lieu à l’application de coefficients multiplicateurs significatifs sur certaines stations d’apport associées aux affluents. Il s’agit de compenser des débits insuffisants en entrée de modèle, soit parce que les stations disponibles pour les affluents ne jaugent pas l’ensemble des bassins-versants alimentant significativement le tronçon, soit parce que ces stations sous-estiment directement les débits en raison de courbes de tarage de mauvaise qualité dans leur partie haute, faute de jaugeages.

5. DES RÉSULTATS ENCOURAGEANTS ET DES AMÉLIORATIONS ENVISAGEABLES

5.1 Critères de calage et résultats obtenus

Les efforts de calage des modèles ont porté principalement sur les coefficients de rugosité des lits mineur (calage sur des crues non débordantes) et majeur (crues largement débordantes) et sur les facteurs de correction apportées aux hydrogrammes en entrée des modèles (branche principale et apports des affluents). Pour chaque modèle, une dizaine de crues ont été exploitées pour le calage ou la validation des résultats des simulations, selon les données hydrométriques disponibles aux stations.

Quatre indicateurs de performance des modèles ont été analysés lors des étapes récursives de calage, à l’aide du calcul des scores directement accessibles sous *Mascaret*® :

❶ **Critère de Nash-Sutcliffe** :
$$NS = 1 - \frac{MSE}{\sigma_x^2} \quad (3)$$

Il est appliqué sur toute la durée de l’événement, avec :

- MSE l’erreur quadratique moyenne sur les hauteurs (ou les débits),
- σ_x^2 la variance des valeurs observées sur les hauteurs (ou les débits).

Ce critère permet d’analyser la performance globale du modèle sur toute la chronique simulée, et doit tendre vers 1 dans le cas d’un modèle performant.

❷ **Erreur sur les volumes** :
$$\Delta Q = \int Q_{sim}(t)dt = \int Q_{obs}(t)dt \quad (4)$$

avec Q_{sim} (resp. Q_{obs}) les hydrogrammes des crues simulées (resp. observées), ce qui donne après discrétisation au pas de temps Δt :

$$\Delta Q \approx [\sum_{i=1}^n Q_{sim}(t) \cdot \Delta t] - [\sum_{i=1}^n Q_{obs}(t) \cdot \Delta t]. \quad (5)$$

Ce critère a été essentiellement regardé lorsqu’une correction significative des hydrogrammes en entrée de la branche principale des modèles était nécessaire.

❸ **Décalage temporel sur les pics de crue** :
$$\Delta t_{H_{max}} = t_{H_{sim,max}} - t_{H_{obs,max}} \quad (6)$$

avec $t_{H_{sim,max}}$ (resp. $t_{H_{obs,max}}$) l’instant d’arrivée du pic de crue simulée (resp. observée). A noter que ce décalage peut être calculé pour les débits si cette donnée est accessible à la station considérée.

❹ **Erreur en valeur sur les pics de crue** :
$$\Delta H = H_{sim,max} - H_{obs,max} \quad (7)$$

avec $H_{sim,max}$ (resp. $H_{obs,max}$) la hauteur maximale pour la crue simulée (resp. observée). Ce critère peut également être examiné du point de vue des débits.

Plusieurs tests et retours d’expérience ont finalement montré que les critères ❸ et ❹ étaient les plus pertinents lors du choix final des paramètres de calage en minimisant les écarts sur les pics de crue (en valeur et en décalage temporel). Par cette approche, des écarts plus importants peuvent apparaître lors des simulations avec des débits faibles à modérés (Figure n°8).

Les résultats de calage des sous-modèles montrent globalement une bonne reconstitution des limnigrammes observés aux stations hydrométriques (Figure n°8), tant pour les valeurs maximales de cote à l’échelle (écarts généralement de l’ordre de la dizaine de cms) que pour les décalages temporels (décalages généralement limités à 24h, ces écarts étant à relativiser compte-tenu de la durée importante de la crue).

Il est à noter que le sous-modèle le plus à l’aval (intégrant la confluence Saône / Rhône) présente un biais important, car l’influence du Rhône n’a pas été prise en compte à ce stade du développement.

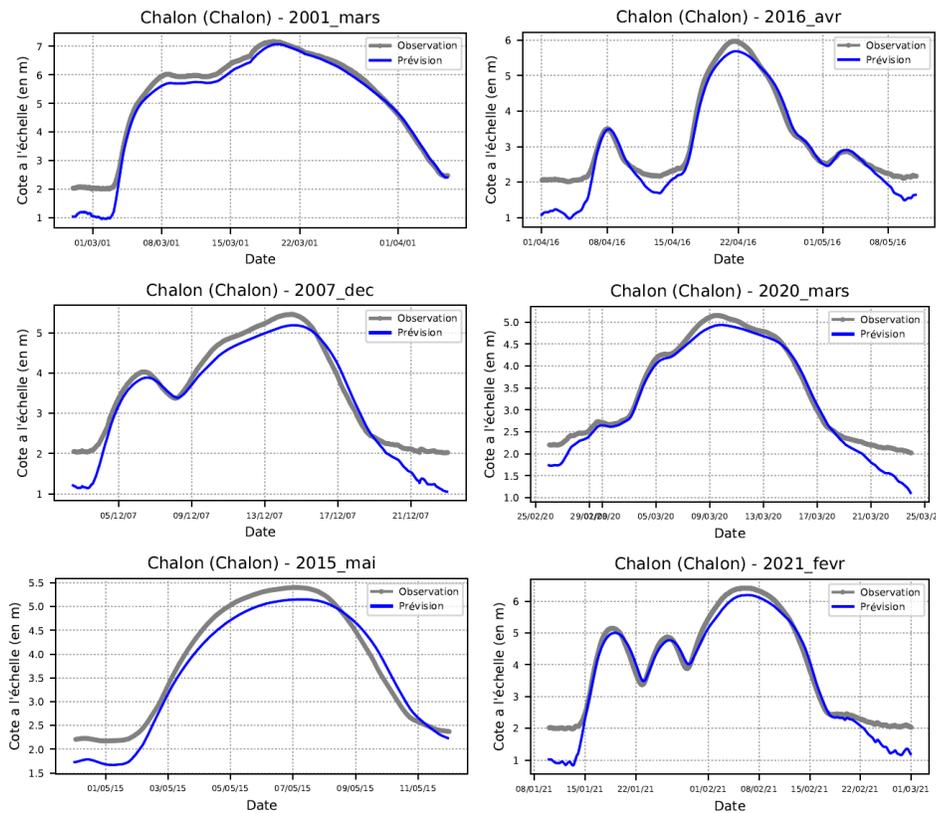


Figure 8: Limnigrammes observés (en gris) et calculés (en bleu) à la station hydrométrique de Chalon-sur-Saône par le modèle n°5, crues de Mars 2001, Décembre 2007, Mai 2015, Avril 2016, Mars 2020 et Février 2021

Les performances du modèle en opérationnel et notamment l'échéance de prévision pouvant être atteinte en conditions réelles (avec injection de prévisions aux entrées du modèle) avec un niveau d'incertitude acceptable restent à évaluer en conditions de crue par le SPC.

5.2 Perspectives d'amélioration

Une meilleure performance de la chaîne globale de prévision obtenue par les différents modèles doit passer par une réflexion sur l'hydrologie générale. Pour disposer d'un modèle simulant parfaitement les limnigrammes au droit des stations hydrométriques, il conviendrait d'injecter un hydrogramme prenant en compte l'effet d'hystérésis, et donc non issu d'une courbe de tarage univoque.

Par ailleurs, l'intégration des barrages mobiles dans les sous-modèles pourrait permettre une meilleure reconstitution des limnigrammes pour les débits intermédiaires, les pics de crue étant modélisés avec un barrage abaissé, ce qui est fidèle à la réalité.

Enfin, le prolongement du modèle à l'aval, intégrant le Rhône, permettrait de valider les résultats sur les stations situées à l'amont immédiat de l'agglomération lyonnaise.

6. REFERENCES

- [1] E. Perret, M. Lang, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard. HYDROM A1 : Analyse exploratoire des stations hydrométriques susceptibles d'être concernées par un effet d'hystérésis sur la courbe de tarage. [Rapport de recherche] Irstea. 2018, pp.27. hal-02608481