

Utilisation du modèle hydrodynamique 1D Mascaret pour la prévision des crues

Use of the 1D Mascaret hydrodynamic model for flood forecasting

Auteurs : LE PAPE Etienne¹, NICOLAS Matthieu², BERNARD Alexis³, DE LINARES Matthieu⁴, DAOU Mehdi Pierre⁴

¹ Service central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations (MTECT/DGPR/SRNH), 42 avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse, France

etienne.lepape@developpement-durable.gouv.fr

² DREAL Pays de la Loire, 5 rue Françoise Giroud 44200 Nantes, France

matthieu.nicolas@developpement-durable.gouv.fr

³ Cerema Ouest : 5 rue Jules Vallès, 22015 Saint-Brieuc, France

alexis.bernard@cerema.fr

⁴ Artelia, 6 rue de Lorraine, 38130 Echirolles, France, matthieu.delinares@arteliagroup.com,

mehdi-pierre.daou@arteliagroup.com

Résumé : Le code de modélisation hydraulique monodimensionnelle Mascaret, développé à partir des années 1990, s’est progressivement modernisé et est désormais maintenu dans le cadre du Consortium TELEMAT-MASCARET (cf. <http://opentelemat.org/index.php/terms-and-conditions>). Mascaret est aujourd’hui utilisé par de nombreux Services de Prévision des Crues (SPC) français pour simuler la propagation des crues en temps réel ou cartographier les inondations. Il participe ainsi aux outils d’expertise pour la prévision des crues et la cartographie des inondations en complément des modèles hydrologiques (qui permettent pour leur part de modéliser les bassins versants amont). Les nombreuses possibilités du logiciel Mascaret permettent de l’adapter à des contextes hydrauliques naturels ou anthropisés. L’interface utilisateur moderne qu’est le plugin QGIS Mascaret, basée sur un Système d’Information Géographique (SIG) libre et open source (cf. <https://www.qgis.org/fr/site>) ainsi que multi-événementielle, a rendu possible et surtout rapide la construction de modèles complexes indispensables dans certains contextes à la modélisation hydraulique de la propagation des crues. Une réelle dynamique de construction de nouveaux modèles Mascaret sur les rivières surveillées par l’état est en cours depuis les dernières années. Ces modèles sont utilisés dans le cadre d’enchaînements de modèles d’amont en aval des bassins versant et permettent d’améliorer la qualité des prévisions diffusées sur le site Vigicrues (cf. www.vigicrues.gouv.fr) et la pertinence de la vigilance crues.

Mots-clefs : modélisation hydraulique, temps réel, prévision des crues, cartographie des inondations

Abstract : The one-dimensional hydraulic modeling code Mascaret, developed since the 1990s, has been gradually modernized and is now maintained by the TELEMAT-MASCARET Consortium (cf. <http://opentelemat.org/index.php/terms-and-conditions>). Mascaret is currently used by many French flood forecasting services to simulate real-time

floods propagation or to map floods. It thus contributes to the expertise tools for flood forecasting and floods mapping complementing hydrological models (which are used to model upstream watersheds). The numerous capabilities of Mascaret software allow it to be adapted to natural or anthropogenic hydraulic contexts. The modern user interface that is the Mascaret QGIS plugin, based on a free and open source Geographic Information System (cf. <https://www.qgis.org/fr/site>) and multi-event system, has made possible and moreover fast the construction of complex models essential in certain contexts for the hydraulic modeling of the floods propagation. There has been a significant momentum in constructing new Mascaret models for rivers monitored by the state in recent years. These models are used as part of upstream-downstream model chains of catchment areas and contribute to improving the quality of forecasts published on the Vigicrues website (cf. www.vigicrues.gouv.fr) and the relevance of flood warnings.

Keywords : hydraulic modeling, real time, floods forecasting, floods mapping

1. Le code Mascaret

1.1 L'histoire du code

Le code de calcul Mascaret est hérité de l'expérience d'EDF² et du CEREMA³ en modélisation hydraulique. Il est libre et gratuit et géré dans le cadre du Consortium TELEMAC-MASCARET. Depuis de nombreuses années, les noyaux de calcul permettent d'aborder une variété importante de contextes (Goutal et al., 2020).

Le logiciel Mascaret est un code de modélisation hydraulique monodimensionnelle (1D) à surface libre, basé sur la résolution des équations de Barré de Saint-Venant. Il a été développé dans les années 1990, 2000 et 2010 au LNHE (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement - EDF R&D) ainsi qu'au CEREMA (y compris son interface graphique Fudaa-Mascaret).

Depuis 2015, Artelia⁴ gère la maintenance du code Mascaret dans le cadre du Consortium TELEMAC-MASCARET et intègre les développements des contributeurs. Le code Mascaret a été intégré au code Telemac⁵ (même s'il reste fonctionnellement indépendant de Telemac).

1.2 Les caractéristiques du code

MASCARET est composé de trois noyaux de calcul hydrodynamique de base monofilaire, auxquels on peut coupler le module CASIER, et permet des calculs en régime

- Fluvial et Transcritique permanent,
- Fluvial non permanent,
- Transcritique non permanent.

2 Entreprise publique « Électricité De France »

3 Établissement public « Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement ». Site web : <https://www.cerema.fr/fr>

4 Entreprise d'ingénierie indépendante

5 cf. <http://opentelemac.org/index.php/presentation>

Le module CASIER permet de prendre en compte les zones inondables isolées du lit majeur par un ensemble de casiers interconnectés et reliés à la rivière par différentes lois d’échange représentant les zones d’échange et les obstacles naturels de l’écoulement.

Parmi les originalités et forces de Mascaret par rapport à d’autres codes d’hydraulique monodimensionnels, on peut mentionner la composition des lits qui comprend systématiquement un lit mineur, mais peut aussi inclure des lits majeurs (capacitifs et contributifs à l’écoulement) et des zones de stockage (uniquement capacitives) dont les mises en eaux peuvent se faire de manière progressive. De plus, le code prend en charge des profils complexes qui ne sont pas limités en nombre de points descriptifs.

L’interface utilisateur historique Fudaa-Mascaret permet de construire un modèle Mascaret non géo-référencé (casiers possibles). Elle permet de définir un unique jeu de conditions limites d’entrée à la fois.

Des travaux ont été menés par le Cerfacs⁶ depuis les années 2010 sur le couplage de Mascaret avec Telemac 2D en longitudinal ou en latéral et l’assimilation de données (Ricci et al., 2011 ; Habert et al., 2016 ; Barthélémy et al., 2017 ; Tiberi-Wadier et al., 2021)

Les modules qualité d’eau et transport sédimentaire / évolution du fond sont utilisables et nécessitent la définition de certains éléments non détaillés ici.⁷

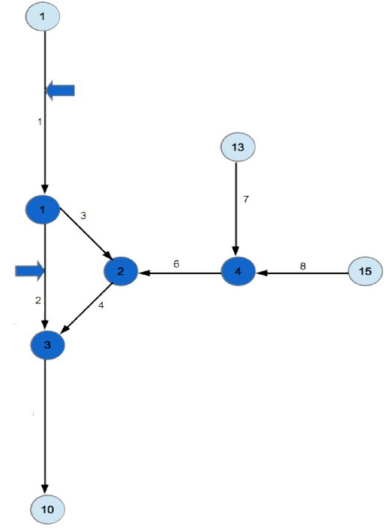


Figure 1: Exemple de visualisation schématique globale d'un modèle Mascaret dans Fudaa-Mascaret

2. Le plugin QGis Mascaret

Une nouvelle interface de construction et d’étude a été développée, d’abord par la DREAL⁸ Pays de la Loire sous forme d’un prototype de plugin QGis, puis diffusée par ARTELIA sous forme du plugin officiel de QGis “Mascaret”⁹. Différents travaux menés par les prestataires retenus dans le cadre des accords cadres pilotés par le Schapi¹⁰ ont permis d’améliorer le plugin QGis Mascaret ces dernières années. De son côté, le Cerema a effectué des développements en particulier sur les fonctionnalités liées aux « casiers » et participe aux retours utilisateurs qui permettent ensuite de consolider le plugin Mascaret.

2.1 Une interface SIG

L’utilisation de Mascaret sur un secteur hydrographique nécessite la construction d’un « modèle » au sens métier de l’hydraulicien. Pour cela le plugin QGis Mascaret permet désormais de construire un modèle Mascaret géoréférencé grâce à une interface conviviale basée sur un SIG.

⁶ Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique. Site web : <https://cerfacs.fr>

⁷ cf. documentation sous https://github.com/Artelia/Mascaret/wiki/qualite_d_eau#411-Qualit%C3%A9-eau

⁸ Directions Régionales de l’Environnement, de l’Aménagement et du Logement

⁹ cf. documentation sous <https://github.com/Artelia/Mascaret/wiki>

¹⁰ Service Central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations du MTECT (Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires)

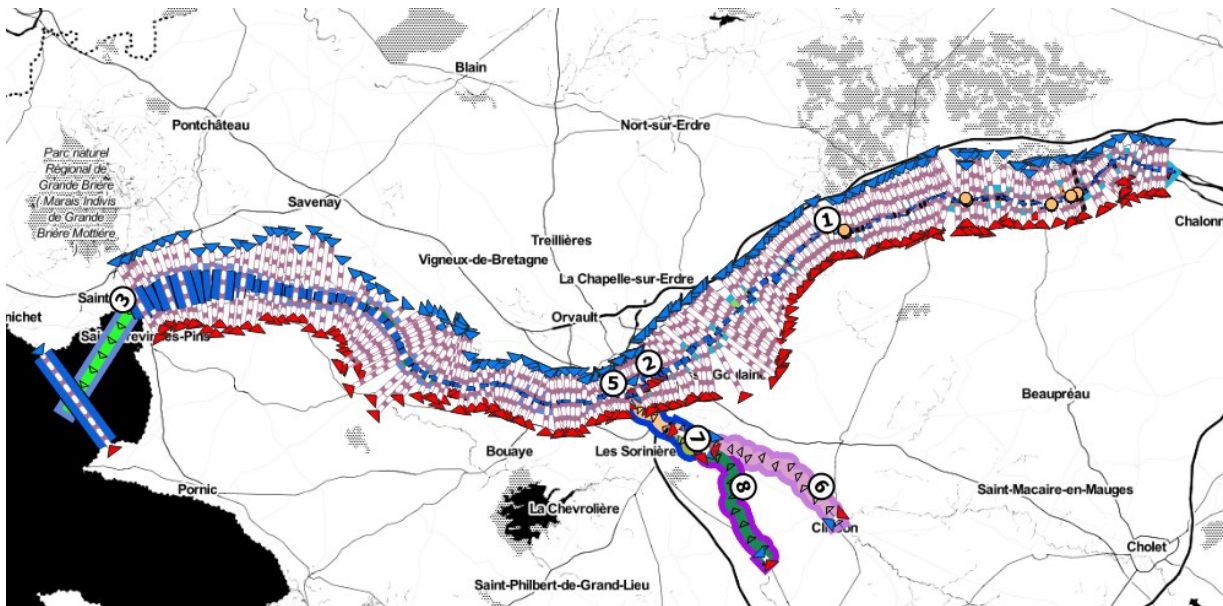


Figure 2 : Exemple de visualisation d'un modèle géoréférencé dans le Plugin QGIS Mascaret

Le plugin QGIS Mascaret nécessite l'installation des logiciels QGIS, Postgres, Postgis. En effet il s'appuie sur une base de données pour gérer les simulations sur plusieurs jeux de données d'entrée. Il dispose d'une documentation en ligne¹¹.

2.2 Construction du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est défini grâce à des « branches »¹² (couche « branches ») interconnectées au niveau des confluences ou des diffuences. Les branches constituent la colonne vertébrale d'un modèle. Elles permettent le référencement linéaire de tous les objets du modèle (profils en travers et singularités, apports...). Le référencement linéaire permet de passer du référentiel géographique (celui du SIG et de la construction visuelle à partir de données géoréférencées) au référentiel du modèle hydraulique monofilaire (celui que le code Mascaret est capable de prendre en charge). Les branches sont délimitées par les « extrémités » (couche « extremities ») sur lequel on applique différents types de conditions limites (Débits, Hauteurs, Courbes de tarage...).

Il est également possible de définir :

- des **casiers** interconnectés aux branches et entre eux grâce à des lois paramétrables (digue, seuil, chenal, siphon, orifice, vanne-clapet, etc.)
- des **ouvrages** paramétrables (de type seuil, pont, chenal, siphon, orifice, vanne-clapet, etc.) voire mobiles au cours du temps
- des **apports** ou **prélèvements** ponctuels ou linéiques

L'interface SIG est une véritable avancée pour la construction et la diffusion (et l'appropriation) des modèles « Mascaret ». Le plugin permet au modélisateur de partir de données géographiques (saisie des branches, profils en travers en utilisant des fonds de plan orthophotographiques, MNT¹³...) et de mettre en forme les données pour qu'elles soient utilisables par le code Mascaret. La visualisation

¹¹ cf. <https://github.com/Artelia/Mascaret/wiki>

¹² Nommée biefs sous Fudaa-Mascaret

¹³ Modèle Numérique de Terrain

cartographique permet une compréhension plus aisée des choix du modélisateur. L’ergonomie d’ensemble rend plus facile et bien plus rapide la construction de modèles sur de grandes emprises. Par exemple, le plugin rend possible et courant la construction de modèles hydrauliques de plusieurs dizaines de kilomètres et plusieurs centaines de profils en travers et autres singularités. L’interface utilisateur historique ne permettait ce travail qu’au prix d’un effort très important de manipulation de données des profils en travers sur un tableur limitant considérablement le déploiement des modèles Mascaret dans le réseau Vigicrues.

2.3 Construction des profils en travers

Le tracé des profils en travers (couche « profils ») est effectué à la main sous forme de lignes brisées (en principe perpendiculaires aux écoulements à modéliser). Le plugin Mascaret permet ensuite d’extraire la topographie (MNT) sur ces profils en travers (fonction « Extract MNT for profile »). Enfin le modélisateur définit chaque profil en travers depuis une fenêtre d’édition qui lui permet de composer son profil hydraulique à partir de la topographie extraite du MNT et/ou les profils topobathymétriques levés in-situ par des géomètres voire de définir certains points à la main (ou des valeurs issues de l’interpolation de deux profils amont et aval). Il définit en outre les limites du lit mineur, du lit majeur et éventuellement des zones de stockage (qui ne participent pas à l’écoulement).

2.4 Singularités

Il est possible de définir des sections de calcul où l’on utilise pas les équations de Saint Venant tout en conservant la conservation des débits en amont et en aval.

D’autre part, le plugin Mascaret permet de définir des « ouvrages » (pont cadre, pont arche, dalot et buse) qui font appel à un code python pour générer des abaques utilisables par le code Mascaret. Ces ouvrages sont modélisés sous forme de lois (abaques) de débitance $Z_{am}=f(Q, Z_{av})$ en utilisant les lois suivantes : *Loi de seuil (Carlier, 1972)*, *Loi d’ouvrage de type orifice (Carlier, 1972)*, *Loi d’ouvrage de type Borda (Carlier, 1972)*, *Loi d’ouvrage de type Bradley (Bradley, 1960)*. L’interface graphique utilisée pour cela permet de construire et visualiser la géométrie de l’ouvrage (cf. figure ci-dessous).

Il permet en outre de prendre en compte des ouvrages ou des seuils mobiles en fonction du temps soit en jouant une chronique de manœuvres, soit en fournissant les consignes de gestion.

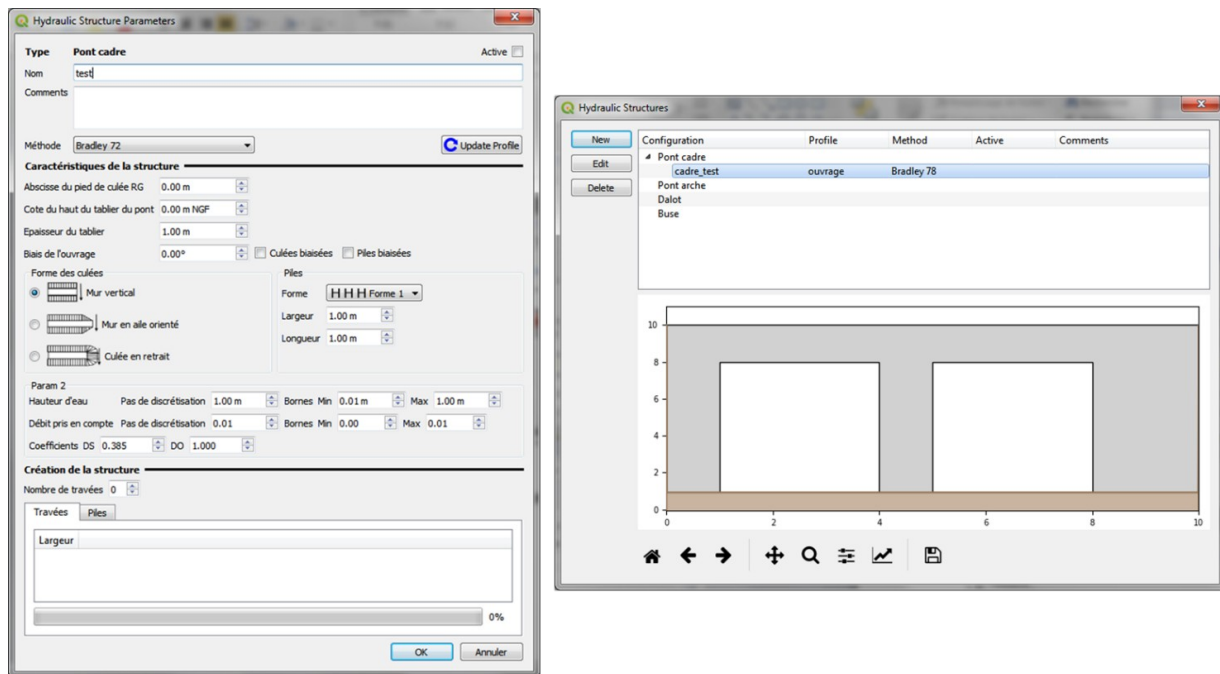


Figure 3 : Construction d'un ouvrage dans le plugin MASCARET

2.5 Conditions aux limites et apports

Les branches sont délimitées par les « extrémités » (couche « extremities ») sur lesquelles on applique différents types de conditions limites (Débits, Hauteurs, Courbes de tarage...). Lorsqu'ils ne sont pas explicitement modélisés par une branche, les affluents peuvent être modélisés sous formes d'apports ponctuels ou diffus le long du filaire du modèle.

Au niveau de ces extrémités (conditions aux limites amont et aval) et apports, les débits et hauteurs sont calculés en fonction des données présentes dans la base de données des observations à partir de relations linéaires. Par exemple, des coefficients multiplicatifs et décalages temporels sont couramment utilisés pour prendre en compte le fait que les observations utilisées en condition limite ou en apport ne sont pas forcément localisées au lieu d'injection dans le modèle.

2.6 Jeu d'événements et laisse de crues

Le plugin Mascaret permet de travailler en temps relatif (comme sous Fudaa-Mascaret) et/ou en temps absolu c'est-à-dire en événementiel. La seconde méthode est particulièrement utile pour la construction de modèles de prévision des crues. Pour cela il est nécessaire de définir des événements (typiquement des épisodes de crue) et d'insérer en base de données les données d'observations hydrométriques nécessaires. Dans le premier cas les entrées du modèle (lois) sont directement définies par le modélisateur, dans le second cas (pour le fonctionnement en événementiel) le plugin Mascaret calcule les entrées du modèle (lois) grâce à des relations linéaires (voir chapitre 2.2).

En complément de ces données le plugin permet l'insertion des données de laisses de crues pour les comparer aux résultats de ligne d'eau.

La gestion des calculs en mode événementiel constitue un véritable gain ergonomique pour les modélisateurs. Il est désormais aisé de lancer un calcul pour une configuration donnée d'un modèle

pour plusieurs événements avec une écriture et un archivage des résultats en base de données. La possibilité offerte par le plugin d’initialiser automatiquement une simulation en transitoire à partir d’une simulation en permanent constitue aussi une avancée intéressante pour le modélisateur.

Toute cette ergonomie développée avec l’émergence du plugin facilite le travail de calage et validation des modèles et augmente considérablement la qualité des modèles construits, le modélisateur étant concentré sur le travail de calage sans manipulation complexe et chronophage de fichiers de résultats.

2.7 Paramètres du modèle

Le modélisateur détermine manuellement les jeux de paramètres (Frottements du lit mineur, Frottements du lit majeur, Planimétrage, Maillage) pour chaque tronçon de rivière (plusieurs jeux de paramètres possibles sur chaque branche).

2.8 Lancement de simulations, visualisation des résultats et calcul de scores

Le plugin permet de lancer des simulations sur le modèle Mascaret (en choisissant l’un des trois noyaux de calculs Mascaret) pour différents événements et de visualiser les résultats :

- sous forme de ligne d’eau (à un instant où le maximum atteint) sur le profil en long, avec visualisation des repères de crues,
- au niveau des profils en travers, avec superposition graphique des hauteurs et débits observés pour les sections où l’on en dispose et possibilité de calcul de scores permettant d’objectiver les résultats,
- au niveau des casiers et des liaisons, au niveau des ouvrages mobiles.

En termes de gestion des résultats, la véritable plus-value du plugin réside dans l’écriture et l’archivage de ceux-ci en base de données sans intervention de l’utilisateur. L’interface utilisateur historique Fudaa-Mascaret ne permettait de lancer les calculs qu’un à un, avec écrasement des résultats précédents ce qui imposait un travail de gestion de répertoire et de copier/coller des résultats dans un tableur rendant le travail de calage et de validation fastidieux.

3. L’historique de l’utilisation de Mascaret par les services de l’Etat

Dès 2006, un modèle Mascaret a été construit sur un secteur influencé par la marée : l’Adour maritime. En effet sur des cas complexe comme les estuaires, la modélisation hydrodynamique 1D permet de prendre en compte la condition maritime aval ainsi que les crues générées en amont du bassin versant. Petit à petit de nouveaux modèles de prévision des crues ont été construits : Laïta, Seine aval, Loire aval, Marne, Aube...

A partir de 2017, la construction de modèles Mascaret a progressivement augmenté (d’une petite dizaine à désormais une cinquantaine). De nombreux utilisateurs du plugin ont été formés dans le réseau Vigicrues (Schapi, SPC et Cerema). De nombreux modèles ont été construits pour le compte du réseau par le Cerema et par les SPC en régie (en Bretagne, sur la Moselle, la Saône et le Doubs...). Au-delà de l’ergonomie offerte par le plugin, les résultats très probants et les qualités des modèles ont contribué à convaincre de nouveaux SPC et modélisateurs à concevoir de nouveaux modèles Mascaret.

La plupart des 17 SPC sont désormais dotés de modèles Mascaret et pour certains SPC tous les secteurs à propagation en sont couverts. De nombreux modélisateurs du ministère sont désormais formés à l'utilisation de Mascaret (une vingtaine au Cerema, plus d'une vingtaine dans le réseau Vigicrues et dizaine dans d'autres services de DREAL et DDT¹⁴).

La construction de modèles Mascaret a vocation à se poursuivre notamment sur les secteurs à forts enjeux surveillés par Vigicrues.

Le réseau Vigicrues et le CIH d'EDF¹⁵ restent pour l'instant les principaux maîtres d'ouvrage de modèles Mascaret. Côté Vigicrues, l'approche 1D reste particulièrement adaptée à la prévision de crues de part la rapidité de calcul nécessaire en opérationnel. En outre, la fonctionnalité de composition des lits (lit mineur, lit majeur, zones de stockage) permet de ne pas systématiser le recours à des casiers ce qui facilite la construction des modèles et permet de gagner en rapidité de calcul.

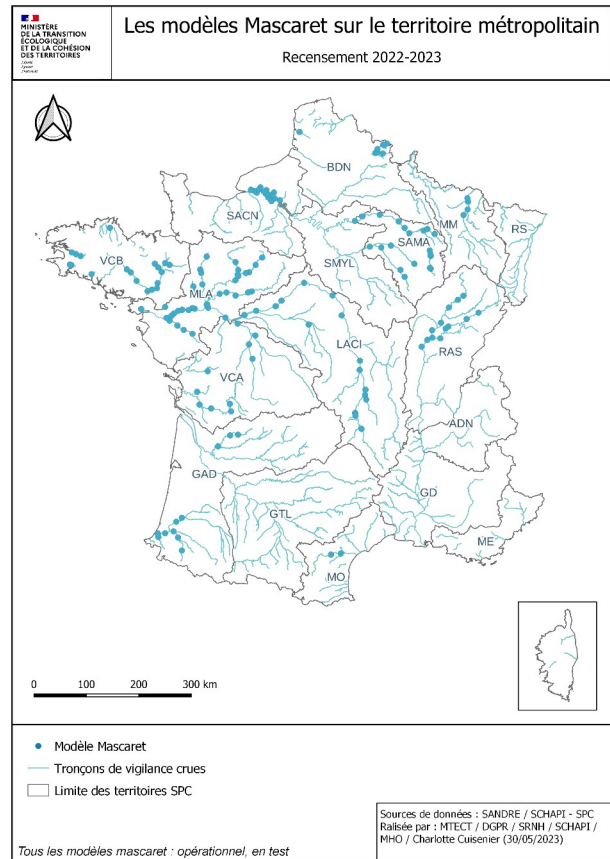


Figure 4: Modèles Mascaret du réseau Vigicrues

4. L'utilisation opérationnelle de Mascaret pour la prévision des crues et la cartographie des inondations

Mascaret rentre dans la chaîne de modélisation temps réel permettant au réseau Vigicrues d'élaborer la vigilance crues et de diffuser des prévisions quantitatives à certaines stations. Comme les autres modèles à base physique, il présente l'intérêt d'être capable de modéliser un événement au-delà de l'historique connu, ce qui peut se révéler important pour simuler des crues extrêmes dans un contexte de changement climatique.

Les différentes simulations nécessitent des techniques de reprises de calcul pour partir d'un état réaliste et éviter des problèmes de stabilité. La technique la plus courante est de repartir d'un état sauvegardé lors d'une simulation précédente avec la ligne d'eau calculée à chaque section de calcul ainsi que le remplissage des casiers le cas échéant.

¹⁴ Direction départementale des Territoires

¹⁵ Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF

Les entrées de Mascaret sont constituées des observations de débit et de hauteurs des sites et stations hydrométriques ainsi que des prévisions des modèles hydrologiques situés en amont. Des apports intermédiaires sont parfois nécessaires pour injecter un volume d’eau réaliste dans le modèle. L’estimation des apports de bassins non jaugés est effectuée grâce à des hypothèses de régionalisation (représentativité de certains points de mesure et/ou utilisation de modèles hydrologique avec des paramètres calés sur des bassins voisins). Pour les modèles en secteur estuarien, des prévisions de marée (issues du SHOM¹⁶) et de surcotes (issues de Météo France) permettent de disposer de conditions limites aval réalistes.

L’outil national d’alimentation temps réel des modèles Mascaret est la Plateforme Opérationnelle pour la Modélisation (POM). Cette plateforme permet de piloter et d’enchaîner les modèles d’amont en aval d’un bassin versant. Le modélisateur et le prévisionniste peuvent choisir les scénarios d’entrée de ces différents modèles. Plusieurs centaines de kilomètres de cours d’eau ont été modélisés sous le plugin Mascaret et sont en cours d’intégration dans la POM.

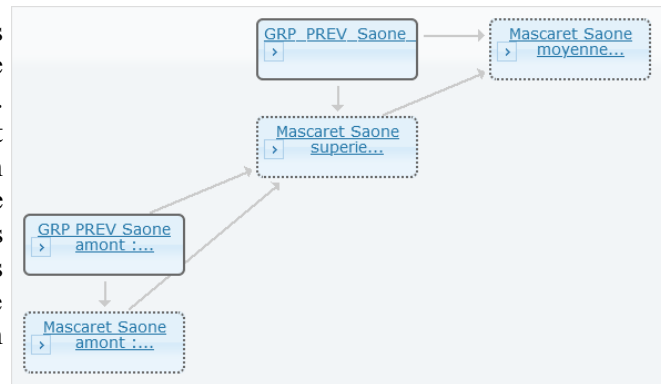


Figure 5: Schéma d'enchaînement de modèles via la POM

Les simulations de Mascaret en temps réel, ainsi que les simulations issues d’autres

plateformes de modélisation, permettent d’obtenir des prévisions brutes correspondant à différentes hypothèses de calcul. Le prévisionniste effectue alors une expertise en prenant en compte les incertitudes liées à la modélisation et à l’événement en cours et diffuse sur le site Vigicrues des prévisions chiffrées. Par rapport à cette thématique, la priorité pour le réseau Vigicrues pour les prochaines années est l’amélioration de la qualité de ces prévisions publiées pour les secteurs à forts enjeux en terme d’horizon temporel de prévision, d’estimation de incertitudes et de représentation de la dynamique, ce qui nécessite des outils de modélisation avancés dont Mascaret fait partie.

La cartographie des zones inondées est effectuée en préparation des crises. Elle peut se baser sur les levés des niveaux atteints sur des crues historiques mais nécessite également souvent une modélisation hydraulique pour permettre de construire des jeux de cartes correspondant à des crues de différentes ampleurs. La modélisation de Mascaret permet de simuler les écoulements pour différents scénarios de crues. La projection des lignes d’eau ainsi obtenues sur un modèle numérique de terrain grâce à l’outil CartoZI¹⁷, permet de produire des cartographies des inondations.

5. Conclusions et perspectives

Les travaux réalisés autour du plugin QGIS Mascaret permettent dorénavant de construire, caler, valider et utiliser des modèles de propagation de crues à l’usage du réseau Vigicrues via une ergonomie nettement améliorée. Grâce au développement du plugin QGIS Mascaret ces cinq dernières années, Mascaret a désormais une place de premier rang dans la modélisation pour la prévision des crues et la cartographie des inondations. Au sein du réseau Vigicrues, la production de modèles s’est considérablement accélérée et l’intégration de ces modèles aux outils opérationnels est en cours. En parallèle, une communauté d’utilisateurs avec une dynamique d’échange a émergé. Les travaux de modélisation avec Mascaret ont vocation à se poursuivre avec une priorisation sur les secteurs de propagation hydraulique concernés par de forts enjeux soumis au risque inondation.

¹⁶ Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

¹⁷ cf. <http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/CartoZI>

D'autre part, il serait utile que le consortium TELEMAT-MASCARET poursuive le développement du code Mascaret et de ses interfaces utilisateurs en lien avec les services du Ministère de la Transition Écologique. Les thématiques de consolidation et d'évolution suivantes intéressent particulièrement le réseau Vigicrues : ergonomie des interfaces utilisateur, ouvrages, assimilation de données, couplage avec Telemat 2D.

Concernant les techniques d'assimilation de données, les travaux de recherche et les expérimentations temps réel ont démontré leur intérêt pour améliorer la précision des simulations et les faire « coller » aux observations sur le domaine modélisé. Des travaux sont en cours pour étudier la possibilité de migration de la première plateforme développée par le Cerfacs Damp¹⁸ (basée sur un filtre de Kalman) vers la seconde nommée Smurf¹⁹ (basée sur un filtre de Kalman d'ensemble).

6. Références

- Barthélémy S., Ricci S., Rochoux M., Le Pape E., and Thual O.. Ensemble-based data assimilation for operational flood forecasting – On the merits of state estimation for 1D hydrodynamic forecasting through the example of the “Adour Maritime” river. *Journal of Hydrology*, 552:210–224, Sept. 2017. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.06.017.
- Bradley. *Hydraulics of bridge waterways*. Washington: Bureau of Public Roads, US Dept of Commerce, 1960
- Carlier M., *Hydraulique générale et appliquée*, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Eyrolles, 1972 et 1987
- Goutal N. and Zaoui. F. MASCARET theory guide - Version v8p2. Technical report, 2020.
- Habert J. , Ricci S., Le Pape E., Thual O., Piacentini A., Goutal N., Jonville G., and Rochoux M.. Reduction of the uncertainties in the water level-discharge relation of a 1D hydraulic model in the context of operational flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 532:52–64, Jan. 2016. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.11.023.
- Ricci S., Piacentini, a., Thual, O., Le Pape, E., and Jonville, G. (2011). Correction of upstream flow and hydraulic state with data assimilation in the context of flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Tiberi-Wadier A.-L. , Goutal N., Ricci S., Sergent P., Taillardat M., Bouttier F., and Monteil C.. Strategies for hydrologic ensemble generation and calibration: on the merits of using model-based predictors. *Journal of Hydrology*, page 126233, 2021. ISSN 0022-1694.

18 cf. <http://damp.cerfacs.fr>

19 cf. <https://gitlab.com/cerfacs/Smurf>