

PLATHYNES : UNE PLATEFORME DE MODELISATION HYDROLOGIQUE DEVELOPPEE POUR LES BESOINS DE LA PREVISION DES CRUES

PLATHYNES : A SPECIFIC MODELING PLATFORM FOR FLOOD FORECASTING

Auteurs : NARBAIS-JAUREGUY Didier¹, LE PAPE Etienne¹, MARCHANDISE Arthur²,
LABORDA Yann³, DUSSUCHALE Antoine³, HORGUE Pierre⁴, ROUX Hélène⁴, LARNIER
Kévin⁵, MARTY Renaud⁶, BILDSTEIN Audrey⁷.

¹Service Central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI),
Toulouse, France, didier.narbais-jaureguy@developpement-durable.gouv.fr,
etienne.lepape@developpement-durable.gouv.fr.

²Direction Régionale de l’Environnement Occitanie (DREAL), Toulouse, France,
arthur.marchandise@developpement-durable.gouv.fr

³DREAL Auvergne Rhône-Alpes, Nîmes, France, yann.laborda@developpement-durable.gouv.fr,
antoine.dussuchale@developpement-durable.gouv.fr

⁴Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Université de Toulouse, CNRS,
Toulouse, France, helene.roux@imft.fr, pierre.horgue@imft.fr

⁵CS Group, Toulouse, France, kevin.larnier@c-s.fr

⁶DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France, renaud.marty@developpement-durable.gouv.fr

⁷DRIEAT, Paris, France, audrey.bildstein@developpement-durable.gouv.fr.

Résumé: Compte tenu de la diversité des bassins couverts pour la vigilance crue, le réseau Vigicrues exprime le besoin de mettre en place une plateforme de modélisation multi-modèles permettant la mise en œuvre des configurations de modélisation capables de répondre à ses besoins de prévisions. PLATHYNES depuis sa création remplit cet objectif. Tout d’abord avec son mode distribué et ses trois principaux modèles qui permettent sur le pourtour méditerranéen mais aussi dans d’autres contextes hydro-climatiques de fournir des prévisions de crues lors d’épisodes pluvieux très intenses et/ou avec une forte hétérogénéité spatiale.

Le mode global - semi-distribué de PLATHYNES est également très utilisé car il permet notamment de créer des modèles simples de propagation débit-débit. Ces modèles rapides à mettre en place constituent une aide à la décision pour les prévisionnistes qui peut venir en complément des approches hydrodynamiques sur les grands cours d’eau. Récemment de nouveaux modèles de propagation ont été intégrés dans PLATHYNES autorisant les modélisateurs à mieux reproduire les crues historiques.

Dans le cadre de son plan stratégique, le réseau Vigicrues ambitionne de fournir sur les stations présentant les enjeux les plus importants, des prévisions plus fiables et avec une échéance d’au moins 24h. En outre, une information de vigilance crues devra être publiée à terme, sur l’ensemble des cours d’eau de métropole. Pour atteindre ces objectifs ambitieux l’outil PLATHYNES de par sa polyvalence constitue un atout important.

Mots-clefs : modélisation hydrologique, prévision des crues, temps réel.

Abstract : Because of the diversity of the basins covered by flood warnings, the Vigicrues service needed a multi-model modelling platform that would be able to provide accurate forecasting in various contexts. Since its creation, PLATHYNES has fulfilled this objective. Firstly, with its distributed mode and its three main models, which can be used on French Mediterranean basins, but also in other hydro-climatic contexts, to provide flood forecasts for very intense rainfall events and/or with a high degree of spatial heterogeneity.

The global - semi-distributed mode of PLATHYNES is also widely used, in particular to create simple flow-discharge propagation models. These models, which are quick to set up, provide decision support for forecasters and can complement hydrodynamic approaches on large rivers. New propagation models have recently been integrated into PLATHYNES, enabling modellers to better reproduce historical floods.

As part of its strategic plan, the Vigicrues service aims to provide more reliable forecasts with a lead time of at least 24 hours for the stations with a great number of people exposed. In addition, flood warning information will be published for all French rivers. To achieve these ambitious objectives, the PLATHYNES tool is an important asset, thanks to its versatility.

Keywords: flood warning, hydrological modelling, real time forecast.

1 La genèse et les objectifs du projet PLATHYNES

1.1 Les premiers pas

Afin de pouvoir davantage anticiper les risques de crues sur les cours d'eau méditerranéens le réseau Vigicrues et notamment les SPC du sud-est de la France se sont intéressés dans les années 2000 à la modélisation pluie-débit distribuée. Son intérêt est de pouvoir prendre en compte la variabilité spatiale des paramètres et facteurs qui conditionnent la réponse hydrologique des bassins, notamment la variabilité spatiale inhérente aux précipitations méditerranéennes.

Cette variabilité spatiale des précipitations est en effet de mieux en mieux appréhendée, en observation par les produits de précipitations issus des réseaux de radars météorologiques (ANTILOPE, SERVAL, ...) (Tabary et al., 2013), en prévision par les sorties des modèles numériques de prévisions du temps non hydrostatiques à mailles fines (modèle AROME de METEO FRANCE en particulier) (Seity et al., 2011).

Dans le cadre de l'expérimentation Bassin Versant Numérique Expérimental (BVNE), les modèles distribués ALHTAÏR (Bressand, 2002), MARINE (Douinot et al., 2018 ; Garambois et al., 2015 ; Roux et al., 2011 2020) SCS/Lag and Route (Marchandise, 2007) ont été expérimentés avec l'appui de partenaires scientifiques comme l'Ecole des Mines d'Alès, l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse, le laboratoire Hydrosiences Montpellier et le Service de Prévision des Crues Grand Delta. L'idée générale était de construire une base de comparaison commune à ces modèles.

Les défis à surmonter étaient nombreux : mise en œuvre et calage de ces différentes approches sur des bassins aux caractéristiques très différentes, adaptation du code de calcul pour fonctionner en analyse et prévision, intégration de ces nouveaux outils dans une chaîne opérationnelle qui permette d'intégrer des données spatialisées avec un pas de temps infra-horaire et avec des temps de calculs qui soient compatibles avec les contraintes de la production de prévisions en crues.

Le besoin d'un environnement de travail unifié qui permette d'accueillir ces modèles distribués est apparu, afin d'être en mesure de :

- fabriquer la topologie distribuée à partir du Modèle Numérique de Terrain (topologie à mailles carrées régulières)
- préparer et traiter facilement les données hydrométéorologiques, notamment les matrices de pluie radar ;

- calibrer les paramètres des modèles ;
- comparer les résultats des sorties des modèles ;
- jouer les modèles en temps réel dans un environnement compatible avec l'écosystème temps réel mis en place par le SCHAPI ;

Le prototypage de la nouvelle PLATeforme HYdrologique pour la modélisation des Ecoulements Superficiels (PLATHYNES) s'est inspiré conceptuellement de la plateforme ATHYS (Bouvier et Delclaux, 1996), notamment sur l'aspect modulaire, tout en simplifiant certains modules - le module de traitement des modèles numériques de terrain en particulier- et en reprenant par ailleurs certains modèles.

1.2 La mise en œuvre récente

Développés dans un premier temps pour fournir une solution aux services de prévision des crues (SPC) méditerranéens, les modèles distribués ont finalement été testés et validés sur des bassins situés dans des contextes hydro-climatiques très différents. Ainsi, sur des bassins du centre et du nord du pays aux dynamiques plus lentes. Les SPC ont trouvé une solution de modélisation complémentaire aux approches continues et globales largement utilisés sur ces cours d'eau (Figure 1).

La possibilité d'exploiter les débits observés en amont dans un modèle distribué sur le bassin intermédiaire ainsi que les possibilités de personnalisation du calage et de la configuration des modèles font partie des atouts avancés par les services pour justifier l'utilisation de PLATHYNES.

Enfin, dans le cadre de la stratégie de modélisation du SCHAPI, il est préconisé de développer les approches distribuées en dehors du contexte méditerranéen pour faire face à la recrudescence des épisodes pluvieux intenses comme celui de juillet 2021 qui a touché l'Allemagne, la Belgique et le nord-est de la France

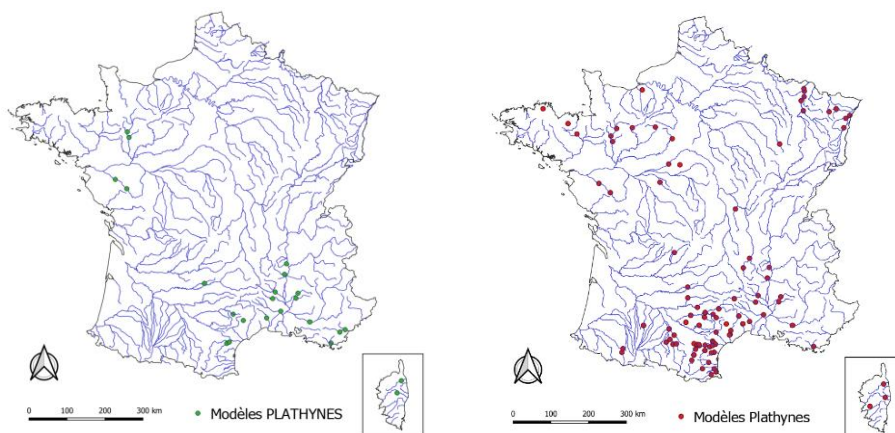


Figure 1 Modèles PLATHYNES recensés en 2019 et 2022

1.3 Les objectifs opérationnels

Avec le développement de PLATHYNES le SCHAPI vise plusieurs objectifs techniques, opérationnels et organisationnels.

L'objectif principal est de fournir à travers les différentes approches de modélisation une solution pour la prévision du franchissement d'un niveau de vigilance dans les 24h et pour la publication de prévisions de crues composées de trois tendances (basse, moyenne, haute) représentatives des incertitudes dont celles de la modélisation (Berthet et al., 2016). Ces différentes informations prévisionnelles (vigilance

et prévisions graphiques avec incertitudes) sont diffusées lors des épisodes de crues sur le site Vigicrues (Figure 2).

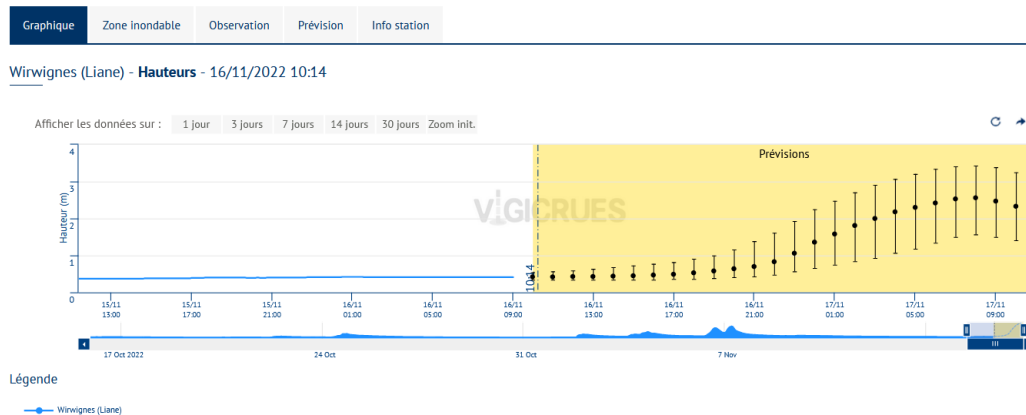


Figure 2 Graphique de prévision publié sur Vigicrues

Le calage des modèles sur les différents bassins est réalisé le plus souvent par les équipes de modélisateurs des SPC. Il est apparu par conséquent nécessaire de développer une interface pour faciliter les interactions avec le noyau de calcul PLATHYNES (voir 2.2).

Afin de produire cette prévision en temps réel, le modèle doit pouvoir être alimenté par des flux de données (précipitations observées, prévues, humidité des sols...), les temps de calcul doivent également être faibles (quelques minutes au maximum). En outre, les modèles PLATHYNES doivent pouvoir être enchaînés à l'aval avec d'autres modèles de propagation.

Toutes ces contraintes ont conduit à la mise en place progressive d'une chaîne opérationnelle pour la production de la vigilance et des prévisions qui sera décrite par la suite en 2.3.

2 L'outil PLATHYNES et son fonctionnement opérationnel

2.1 Le noyau de calcul

Le noyau de calcul PLATHYNES a été développé sur la base du noyau MARINE en langage FORTRAN. Il contient à la fois la partie scientifique des modèles et certains pré- et post-traitements. Deux modes distincts sont disponibles : le premier mode permet de configurer des modèles distribués, les calculs sont faits sur chacune des mailles carrées d'un domaine qui couvre le bassin versant. Le deuxième mode permet de configurer des modèles globaux ou semi-distribués. Dans ce cas, les entités de calcul sont des objets (biefs et sous-bassins essentiellement) associés à des lois de production ou de transfert qui sont reliées par le modélisateur pour constituer un schéma conceptuel de fonctionnement du bassin versant (Figure 5).

Les modèles PLATHYNES sont des modèles événementiels qui se limitent à la simulation des seuls épisodes de crues. L'évapotranspiration étant négligeable à cette échelle de temps, elle ne constitue pas un forçage des différentes lois de production PLATHYNES. Une initialisation est alors nécessaire pour définir les variables d'état du bassin avant l'épisode de pluie générateur de la crue, c'est généralement l'humidité initiale du bassin issue du modèle SAFRAN-ISBA-MODCOU (Habets et al, 2008) qui est utilisée. Dans certains contextes, il est apparu avantageux d'initialiser les modèles avec le débit de base

du cours d’eau ou la hauteur d’eau d’un ou plusieurs piézomètres (Bildstein, 2018 et Hakoun et Charlier, 2022).

Pour le mode distribué, les différentes lois de production et de transfert présentent un certain nombre de paramètres dont les valeurs peuvent être différentes ou identiques sur chacune des mailles. Dans l’approche MARINE les paramètres comme l’épaisseur de sol ou la conductivité hydraulique sont entrés par points de grille et lors de la calibration, un coefficient multiplicateur unique pour l’ensemble de la grille sera calé. En ce qui concerne ALHTAIR et SCS/LR, les paramètres sont par défaut uniformes pour toutes les mailles du modèle, toutefois certaines zones (sous-bassins versants ou zones personnalisées) peuvent être définies par le modélisateur pour la prise en compte de comportements spécifiques sur certaines parties du bassin versant. Il est ainsi possible de distinguer par exemple les mailles des versants, des mailles du réseau de drainage. L’intérêt de ce paramétrage par zone a été mis en évidence sur le bassin de la Sorgues (cf 4.1).

La calibration automatique permet d’optimiser les paramètres de chaque loi lorsque des observations de débits sont disponibles en minimisant une fonction coût du type Nash and Sutcliffe ou erreur quadratique moyenne. Pour les besoins de la prévision des crues, la fonction coût LNP introduite par Roux et al. (2011) peut être avantageuse car elle est basée sur trois composantes : le Nash, l’estimation de la date et de la valeur du maximum de la crue.

2.2 L’interface PLATHYNES

Dès les débuts du projet le choix a été fait de développer une interface graphique pour piloter le noyau de calcul (Figure 3), afin de faciliter la prise en main de l’outil par les modélisateurs des SPC. L’interface PLATHYNES présente trois onglets : (i) le premier pour configurer le modèle (choix des lois de production, de transferts, définition d’un ou plusieurs points de sortie, définition des types de paramètres ...), (ii) Le deuxième onglet permet de charger les différents événements (forçages, débits observés, humidité des sols) qui serviront au calage ou à la validation, (iii) enfin le dernier onglet permet de lancer des simulations ou des calages et de visualiser les hydrogrammes produits avec le calcul automatique d’indicateurs pour évaluer la pertinence des simulations par rapport aux observations.

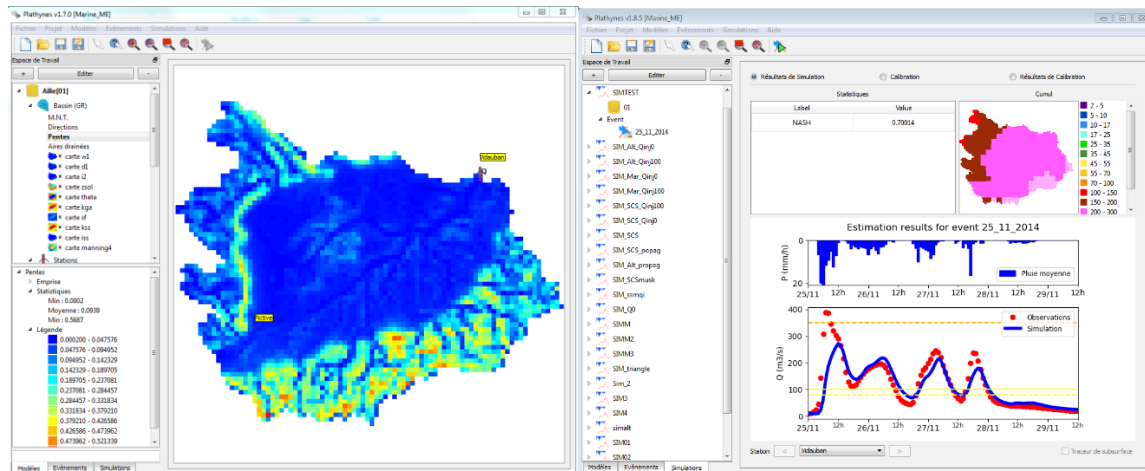


Figure 3 : Interface graphique de PLATHYNES, carte des pentes et visualisation des simulations

2.3 La chaîne opérationnelle Vigicrues

Les contraintes de la production de prévisions régulièrement mises à jour en cours d'épisode et l'alimentation des modèles avec différents produits de prévisions de pluies ont conduit le SCHAPI à construire une chaîne opérationnelle de production (Figure 4).

Dans ce système les différents modèles nationaux Telemac, GRP, Mascaret et PLATHYNES sont pilotés par la POM (Plateforme Opérationnelle pour la Modélisation) qui va gérer l'alimentation des modèles, leur lancement, les éventuels enchaînements et la récupération des prévisions. Les bases de données BD Image pour les données météorologiques (observées et prévues) et PHYC pour les données hydrométriques (observées et prévues) mettent à disposition des webservices pour faciliter les échanges avec la POM. Le superviseur permet ensuite au prévisionniste de visualiser les différentes entrées et sorties (météorologiques et hydrologiques). Chaque prévision brute est enfin expertisée par un prévisionniste avant d'être publiée sur Vigicrues.

Pour répondre aux contraintes des calculs temps réel, le pilotage de PLATHYNES par la POM intègre le déclenchement automatique de l'initialisation du modèle dès que les pluies observées dépassent un certain cumul sur une durée donnée. En outre il intègre la possibilité de lancer des calculs d'analyse sur la base des observations de pluies et de prévision à partir des prévisions de pluies (plusieurs scénarios possibles). A la fin de chaque analyse, un fichier relai de sauvegarde de l'ensemble des états du modèle est conservé. Il est ensuite repris par les calculs de prévision ou le prochain calcul d'analyse, ce type de fonctionnement permet d'éviter le chargement à chaque lancement de l'ensemble des données de pluies observées depuis la date de l'initialisation.

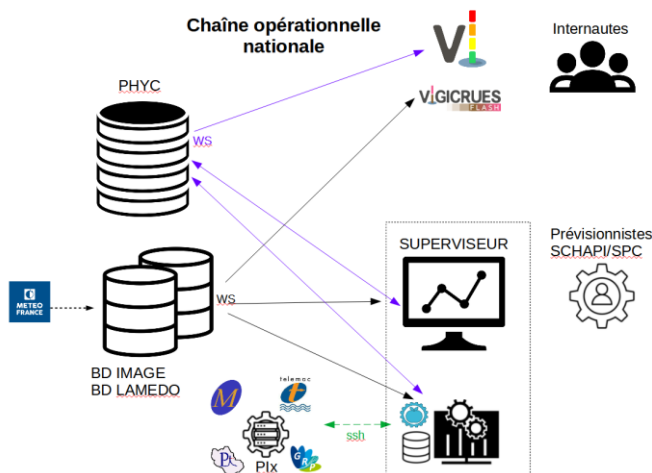


Figure 4 Chaîne opérationnelle Vigicrues

3 Les différentes approches de modélisation

3.1 Les modèles distribués

MARINE

Le modèle MARINE (Modélisation de l'Anticipation du Ruissellement et des Inondations pour des événements Extrêmes) (Roux et al., 2011) est un modèle à base physique développé spécifiquement pour la prévision des crues éclaircies sur le pourtour méditerranéen. La structure du modèle permet de gérer

l'infiltration, les écoulements de subsurface et les écoulements de surface sur les versants et le réseau de drainage. L'infiltration considérée comme verticale sur une colonne homogène de sol est régie par l'équation de Green et Ampt : elle permet de dissocier la part de la pluie qui va ruisseler en surface de la part qui va s'infiltrer. Les écoulements de subsurface représentent les écoulements à travers la couche superficielle des sols en zone non saturée, ils sont simulés sur la base de la loi de Darcy. Enfin les écoulements de surface sur les versants et le réseau de drainage sont calculés à l'aide de l'approximation de l'onde cinématique, en tenant compte d'une géométrie simplifiée sur les cours d'eau établie à partir de relations géomorphologiques (Liu et Todini, 2002).

SCS – Lag & Route

La loi de production SCS a été mise au point aux Etats-Unis pour simuler de manière conceptuelle un ruissellement à l'échelle de parcelles. Elle a été adaptée (Marchandise, 2007) pour pouvoir simuler des crues rapides dans un contexte méditerranéen. La principale modification a consisté à introduire un terme de vidange pour mieux simuler le ressuyage des sols et les décrues par une reprise partielle de cette vidange. Le transfert par Lag & Route s'apparente à un transfert par hydrogramme unitaire largement utilisé en hydrologie. Le temps de transfert est calculé à partir d'un paramètre assimilé à une vitesse de transfert et de la distance de la maille par rapport à l'exutoire.

ALHTAIR

Développé au sein du Service d'Annonce des Crues du Gard (actuel SPC Grand Delta) au début des années 2000, le modèle ALHTAIR¹ (Bressand, 2002) permet, en se basant sur le principe du réservoir d'Horton, une restitution fidèle des hydrogrammes observés sur les bassins à réactions rapides impactés par des précipitations intenses. Constituant l'unité de base de la chaîne de modélisation du SPC Grand Delta depuis plus de 20 ans, il est utilisé principalement sur des bassins versants de petites tailles (< 500 km²) soit pour produire une prévision directe à une station hydrométrique, soit pour modéliser un hydrogramme sur un bassin versant non jaugé afin d'alimenter un modèle de propagation.

En plus de sa loi de production, il est constitué d'une loi de transfert calée sur les caractéristiques des bassins versants cévenols gardois qui présentent des pentes relativement marquées et continues. Son implémentation dans PLATHYNES permet à la fois d'initialiser la capacité d'infiltration initiale du réservoir sol en fonction de l'humidité de la chaîne SIM mais aussi de le coupler à des lois de transfert permettant une meilleure prise en compte des phénomènes liés à la propagation de chaque hydrogramme unitaire le long du cheminement hydraulique jusqu'à l'exutoire. Cela offre donc la possibilité d'une utilisation optimisée d'ALHTAIR sur des bassins présentant des caractéristiques topographiques différentes de ceux pour lesquels il a été pensé.

¹ Alerte Hydrologique Territorialisée Avec Indicateur de Risque

http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/La_pr%C3%A9vision_des_crues_%C3%A0_l%27aide_du_mod%C3%A8le_pluie/d%C3%A9bit_spatialis%C3%A9_ALHTAIR_sur_les_bassins_c%C3%A9venols

3.2 Les modèles globaux et semi-distribués

PREVI

Le modèle PREVI est un modèle de propagation conceptuel développé par le SPC Grand Delta pour modéliser simplement la propagation des débits le long du cours d'eau principal tout en intégrant la production des différents affluents ou bassins versants intermédiaires (voir Figure 5). Le principe du modèle réside dans la création d'un retard de l'écoulement des débits supérieurs à un débit de débordement fixé par le modélisateur. En pratique, le cours d'eau est divisé en casiers de propagation dans lesquels des lois simples permettent de simuler les échanges de débordement/restitution entre le lit mineur et la zone inondable en fonction des débits entrants/stockés/sortant. Ainsi, il est possible de simuler des retards dans l'écoulement ou des écrêtements généralement observés lors des crues débordantes dans des zones de faible expansion de crues. L'efficacité du modèle repose notamment sur l'assimilation de l'hydrogramme modélisé par rapport à celui observé jusqu'à l'instant de prévision en modulant quatre paramètres. Deux de ces paramètres concernent l'incertitude des données de forçage ($\pm 20\%$ pour les débits observés, $\pm 50\%$ pour les débits modélisés des affluents contributeurs non jaugés), un autre paramètre concerne le retardement plus ou moins important des débits débordants et enfin un dernier permet de prendre en compte un débit de base afin que la prévision corresponde au débit observé à la station de prévision en début d'épisode. Son intégration dans PLATHYNES, permet au SPC Grand Delta de piloter la grande majorité de ses modèles de prévisions avec la POM et PLATHYNES.

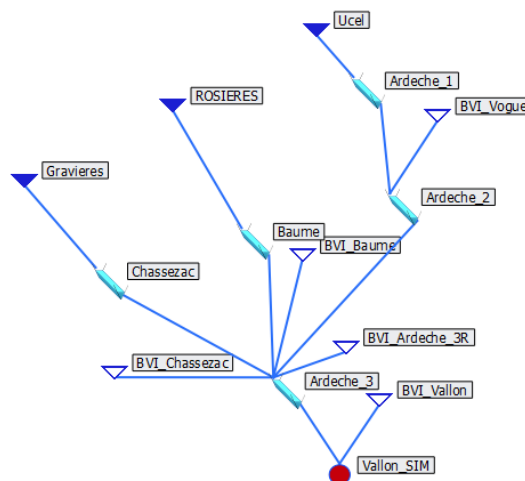


Figure 5 Modélisation PREVI - Bassin versant de l'Ardèche (les triangles bleu pleins correspondent à des débits observés, les vides à des débits modélisés)

MOHYS

L'approche MOHYS est une adaptation d'une modélisation de la propagation d'onde de crue de type Lag and Route (LR) développée par le SPC Loire-Allier-Cher-Indre. La méthode LR est uniquement capable de représenter la translation de l'onde de crue par décalage temporel fixe mais n'intègre pas de modélisation de processus d'atténuation. Le temps de propagation peut dépendre de la profondeur de l'écoulement, de l'activation du lit majeur, de la géométrie du réseau hydrographique. Par ailleurs, les sites hydrologiques des affluents du cours d'eau principal sont rarement situés au droit des confluences. Il est donc nécessaire de prendre en compte le bassin intermédiaire situé entre le site et la confluence.

Sans oublier qu'un affluent peut représenter les apports d'autres cours d'eau non jaugés. MOHYS complète le formalisme de LR en autorisant un temps de propagation variable (initialement estimé par l'écart temporel entre les pointes amont et aval), selon une information disponible en temps réel (exemple: pointe de crue observée ou prévue au site hydrologique amont, débit maximal sur les heures précédentes...), un coefficient multiplicatif variable afin de tenir compte d'éventuels effets de laminage (initialement estimé par le rapport des pointes de crue amont/aval), d'apports sur les affluents jaugés et/ou les affluents voisins (initialement estimé par le rapport des surfaces jaugées et contributives). MOHYS intègre également un hydrogramme unitaire associé à chaque site hydrologique amont. Cela permet de lisser les ondes de crues propagées, ce qui s'avère indispensable en aval des grands ouvrages hydrauliques où les changements rapides de consigne d'évacuation de crue sont lissés temporellement par l'environnement naturel du cours d'eau. Cette fonctionnalité peut être annulée lorsque le modélisateur définit une fonction Dirac. MOHYS offre donc un formalisme qui s'adapte à un grand nombre de situations connues lorsque le modélisateur cherche à représenter la propagation des ondes de crues d'amont en aval, en intégrant aussi les affluents. Les différentes options sont illustrées à la Figure 6 qui présente les simulations de l'événement novembre 2016 sur la Loire à Digoin : au formalisme Lag and Route sont successivement ajoutés le temps de propagation variable, les coefficients d'apport et les hydrogrammes unitaires.

Historiquement, la définition de l'hydrogramme unitaire optimal de MOHYS était réalisée manuellement, par itération. L'intégration du formalisme MOHYS dans PLATHYNES est l'occasion de réduire le nombre de paramètres en utilisant des formules paramétriques pour caractériser cet hydrogramme unitaire. Une vingtaine de formes ont été évaluées, que ce soient des formes géométriques simples (triangle, rectangle), des fonctions mathématiques discrètes ou des fonctions déjà proposées dans la littérature (voir notamment Le Moine 2008, Berthet 2010). La recherche des meilleures formulations paramétriques repose sur l'analyse de 133 hydrogrammes unitaires extraits de la modélisation du SPC LACI. Elle met en évidence que la fonction de Berthet (2010) est la plus ressemblante. Les formes géométriques simples sont également pertinentes pour PLATHYNES. La dernière formulation retenue (puissance) est symétrique et permet d'avoir des décroissances non linéaires autour du point central de l'hydrogramme unitaire.

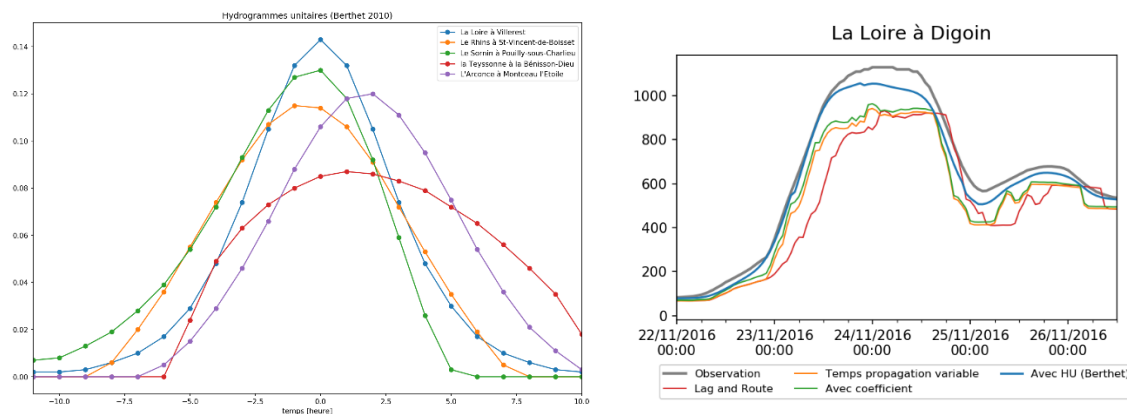


Figure 6: Modélisation selon le formalisme MOHYS. A gauche : les hydrogrammes unitaires. A droite : les simulations de l'événement de novembre 2016 obtenues en ajoutant successivement le temps de propagation variable, les coefficients d'apport et les hydrogrammes unitaires.

4 Des configurations adaptables aux besoins de la prévision opérationnelle

4.1 La Sorgues à Saint-Felix-de-Sorgues

Le bassin de la Sorgues a connu une crue dévastatrice en novembre 2014. La commune de Saint-Affrique a notamment payé le plus lourd tribut, avec 20 % de la ville sinistrée. Suite à cette crue, le Service de Prévision des Crues Garonne Tarn Lot, en charge de la vigilance de la prévision des crues sur le tronçon Dourdou-Sorgues-Rance, a travaillé à mettre en place une modélisation pluie-débit qui, associée à des prévisions de précipitations, doit permettre de mieux anticiper la montée des eaux sur la Sorgues. Le premier travail a été réalisé sur la station de Saint-Félix-de-Sorgues, située en amont de Saint-Affrique. Deux défis étaient à relever : prendre en compte une variabilité importante des précipitations et appréhender la réponse hydrologique spécifique d'un système karstique, le Causse du Larzac-, situé sur la partie nord et est du bassin. Le système karstique est suspecté d'atténuer fortement la réponse hydrologique aux précipitations intenses en termes de débit de pointe : des études réalisées en retour d'expérience de l'épisode du 12 septembre 2015 sur le bassin voisin de la Lergue - qui partage le Causse du Larzac -, ont montré des débits de pointe trois fois inférieurs sur la partie karstique du bassin à ceux de la partie socle, pour une taille de bassin identique (Brunet et Bouvier, 2017).

La plateforme PLATHYNES a été utilisée pour prendre en compte une différenciation des paramètres de la loi de production du modèle SCS entre la zone de socle et la zone karstique. Les résultats du calage aboutissent à faire jouer au système karstique un rôle secondaire sur la réponse rapide du modèle à des précipitations intenses (valeurs du paramètre $S > 600$ mm du modèle SCS), tout en lui faisant jouer un rôle prépondérant sur la dynamique de décrue (Figure 7).

La performance du modèle évaluée sur une dizaine d'épisodes de crue entre 2012 et 2023 est sensiblement améliorée. Sur l'épisode exceptionnel du 28/11/2014, la représentation permet notamment de réduire sensiblement la surestimation du modèle qui était constatée sur la configuration initiale du modèle sans différenciation du comportement du karst. (Voir Figure 8).



Figure 7 Bassin hydrogéologique de la Sorgues : différenciation des valeurs des paramètres du modèle sur la partie socle (en noir) de la partie karstique (en rose, source BD LISAH).

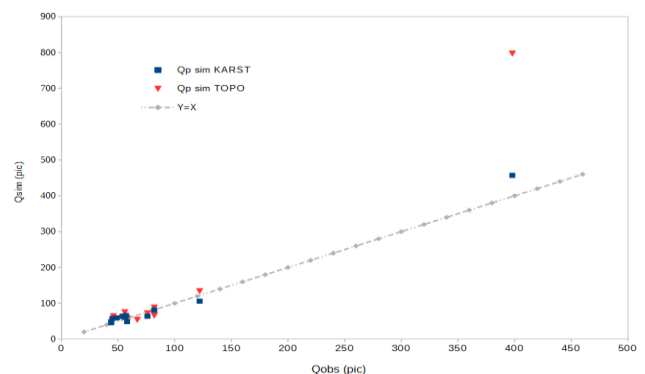


Figure 8 Comparaison entre les débits observés à Saint-Félix de Sorgues (en abscisse) et les débits simulés dans la configuration "socle" (triangles inversés en ordonnée) et "karst" (carrés en ordonnée)

4.2 Utilisation de l'injection de débits sur la Loire amont

PLATHYNES offre la possibilité de modéliser un bassin versant intermédiaire en autorisant l'injection de débits en une ou plusieurs mailles (Figure 9). Cette fonctionnalité est pertinente lorsque le

modélisateur souhaite ignorer une partie amont du bassin versant, soit parce qu’elle ne peut être modélisée par PLATHYNES (ex : présence d’ouvrages hydrauliques), soit parce qu’elle est modélisée de façon satisfaisante par un modèle plus simple ou encore pour tenir compte d’une expertise du prévisionniste en temps-réel que l’on souhaite alors propager. Parmi les cinq modèles SCS-LR PLATHYNES implémentés dans le système de prévision du SPC Loire-Allier-Cher-Indre, quatre se caractérisent par une ou plusieurs injections de débits (la Loire de Pont-de-la-Borie à Chadrac, la Loire de Chadrac à Bas-en-Basset, la Besbre de Saint-Prix à Saint-Pourçain-sur-Besbre et l’Indre d’Ardenes à Perrusson).

Dans la pratique, les volumes injectés dans PLATHYNES sont traités comme des volumes de pluie brute au niveau de la maille d’injection. L’ensemble des mailles en amont de l’injection est masqué : la pluie tombée en amont n’est alors pas prise en compte. La quantité d’eau injectée est soumise à la fonction de production puisqu’elle est considérée comme de la pluie précipitée, avant d’être transférée à l’exutoire. Cela peut alors nécessiter de différencier les mailles des versants et les mailles du réseau hydrographique afin de propager correctement cette injection. Bildstein (2018) met en évidence que l’absence de cette distinction dégrade les simulations de débit de la Loire à Chadrac en raison d’une atténuation trop forte de l’onde propagée par un coefficient de diffusion unique à l’échelle du bassin versant. La création de deux unités de surface améliore les critères de performance (Nash) et aussi la simulation des pointes de crues (en temps et en amplitude).

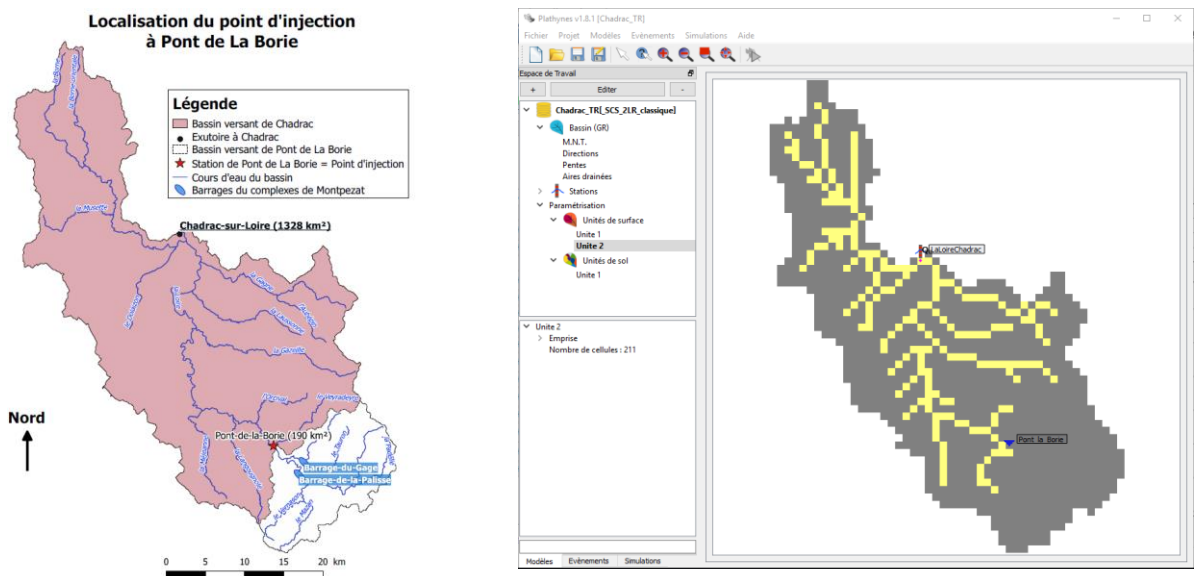


Figure 9: Modélisation de la Loire à Chadrac, (gauche) carte de l’injection de débit à Pont de la Borie (source: Bildstein (2018)), (droite) représentation simplifiée des unités de surface PLATHYNES

5 Conclusion et perspectives

Depuis le premier prototype jusqu’à aujourd’hui, la plateforme de modélisation PLATHYNES a été fiabilisée, s’est enrichie de nouvelles fonctionnalités et de nouveaux modèles. L’intégration du noyau de calcul dans une chaîne opérationnelle complète permet d’exploiter en situation de crise l’ensemble des possibilités offertes par PLATHYNES. La modélisation distribuée s’est largement développée au sein des SPC méditerranéens mais également au sein d’autres services dont les bassins peuvent eux aussi connaître des épisodes de crues générés par des pluies convectives. La souplesse de l’outil PLATHYNES qui permet de configurer différentes approches de modélisations et options de calculs offre aux SPC la possibilité de disposer de simulations sur une grande variété de bassins versants afin de produire une

information de vigilance et des prévisions quantitatives de débits publiées sur Vigicrues.

Ces dernières années le mode global semi-distribué s’est enrichi de nouveaux modèles tels que MOHYS et PREVI. Il sera également complété dans l’année 2023 par un nouveau module barrage qui permettra de simuler l’évolution de la hauteur d’eau dans une retenue et le débit sortant en fonction des caractéristiques physiques d’un barrage et de ses règles de gestion.

Enfin dans le cadre du plan stratégique du réseau Vigicrues, le dispositif de vigilance crues évolue. Sur les stations à enjeux les prévisions devront répondre à un cadre technique plus exigeant (prise en compte des prévisions de pluies et incertitudes associées, publication des hydrogrammes durant la crue et la décrue ...). D’autre part, le réseau Vigicrues ambitionne d’étendre la vigilance crues à tous les cours du territoire métropolitain. Pour relever ce double défi nul doute que l’outil PLATHYNES de par sa polyvalence fera partie des solutions techniques qui pourront être mises en œuvre. Pour cela le réseau Vigicrues devra approfondir certains sujets transverses comme la prise en compte des prévisions météorologiques d’ensembles, l’estimation des incertitudes liées à la modélisation, la propagation des incertitudes dans les enchaînements de modèles, la calibration automatique sur un grand nombre de bassins et l’assimilation de données de différentes natures dans la modélisation hydrologique.

6 REFERENCES

Berthet L., Gaume E., Piotte O., les groupes de travail du Conseil scientifique et technique du SCHAPI and du chantier d’intérêt commun SCHAPI – SPC Estimation des incertitudes de prévision. 2016. Evaluer et communiquer les incertitudes associées aux prévisions hydrologiques pour mieux partager l'information. La Houille Blanche, 4: 18-24. <https://doi.org/10.1051/lhb/2016035>

Berthet, L. 2010. Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l’information de débit dans un modèle hydrologique. Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech, Paris, 603 pp. <https://theses.hal.science/tel-02594604v1>

Bildstein A. (2018). Modélisation hydrologique distribuée pour la prévision des crues de la Loire à Chadrac. Mastère spécialisé en Hydraulique, INP Toulouse, 117p.

Bouvier, C., Delclaux, F. (1996): ATHYS: A Hydrological environment for spatial modelling and complig with a GIS. Proceedings of the HydroGIS 96, Vienna, Austria, pp. 19-28. AIHS publication no 235

Bressand F., 2002, Le projet ALHTAÏR du service d’annonce des crues du Gard. La Houille Blanche n°2, 64-68

Brunet P., Bouvier C., retour d'expérience sur la crue du 12 septembre 2015 à Lodève (Hérault, France) : influence du karst sur les débits de pointe de crue. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2017, 3, pp.39 - 46.

Douinot, A., H. Roux, P.-A. Garambois, and D. Dartus. Using a Multi-Hypothesis Framework to Improve the Understanding of Flow Dynamics during Flash Floods. Hydrology and Earth System Sciences 22(10): 5317 40. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5317-2018>, 2018.

Garambois, P.A., H. Roux, K. Larnier, D. Labat, and D. Dartus. Characterization of Catchment Behaviour and Rainfall Selection for Flash Flood Hydrological Model Calibration: Catchments of the Eastern

Pyrenees. Hydrological Sciences Journal 60(3): 424-47. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.909596>, 2015.

Habets, F., et al. (2008), The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *J. Geophys. Res.*, 113, D06113, doi:[10.1029/2007JD008548](https://doi.org/10.1029/2007JD008548).

Hakoun V., Charlier J-B. (17 janvier 2022) – Evaluation de l’apport de l’information hydrogéologique sur les performances de modélisation des bassins karstiques. Rapport final V1

Le Moine, N., 2008. Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d’amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ? Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris), Cemagref (Antony), 324 pp.

Liu, Z. & Todini, E. 2002 Towards a comprehensive physically-based rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences* 6 (5), 859–881.

Marchandise A., 2007. Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d’Anduze ; étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l’extrême et tests d’hypothèses sur les processus hydrologiques. Thèse, Université Montpellier II sciences et techniques du Languedoc.

H. Roux, D. Labat, P.-A. Garambois, M.-M. Maubourguet, J. Chorda, D. Dartus. A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments. *Nat. Hazards Earth System Sciences*, 11, 2567–2582, 2011.

Roux, H., A. Amengual, R. Romero, E. Bladé, and M. Sanz-Ramos. Evaluation of Two Hydrometeorological Ensemble Strategies for Flash-Flood Forecasting over a Catchment of the Eastern Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20(2): 425-50. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-425-2020>, 2020.

Seity, Y., Brousseau, P., S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac and V. Masson, 2011 : The AROME-France convective scale operational model. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 976-99. doi : [10.1175/2010MWR3425.1](https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1)

Tabary P., C. Augros, J.L. Champeaux, J.L. Chèze, D.Faure, D. Idziorek, R. Lorandel, B. Urban, V. Vogt. Le réseau et les produits radars de Météo-France. *La Météorologie*, 2013.