

# Première utilisation des lames d'eau Rhythme pour le calage de modèles hydrologiques

**Lisa Marchand**

Direction des services météorologiques, Service Production, Météo-France, Toulouse

[lisa.marchand@meteo.fr](mailto:lisa.marchand@meteo.fr)

## Résumé

Dans le cadre du projet Rhythme (Risques hydrométéorologiques en territoires de montagnes et méditerranéens), de nouveaux radars en bande X ont été installés dans les Alpes du Sud. Le but est d'améliorer l'anticipation d'événements météorologiques dangereux dans les zones montagneuses. L'utilisation de ces mesures de précipitations dans les processus de calage-contrôle des modèles hydrologiques n'a jusqu'à lors jamais été testée. L'objet de cette étude est d'utiliser ces nouvelles données d'entrée dans deux types de modèles hydrologiques. Les problématiques d'assimilation de données radars en entrée de modèles hydrologiques seront mises en exergue en même temps que toutes les sources d'incertitudes auxquelles les services opérationnels sont confrontés.

## Abstract

### First use of Rhythme radar-derived rainfall accumulations for hydrological models calibration

In the framework of the Rhythme project, new X-band radars have been deployed in Southern Alps. The aim is to improve the anticipation of hazardous weather events in mountainous areas. The use of these new rainfall accumulation measurements in the calibration/validation process of hydrological models has never been explored until now. The purpose of this study is to use this new input data in two kinds of hydrological models. We underline the issue of radar data assimilation as input to hydrological models as well as uncertainties to which operational services are confronted.

La région Sud-Est peut être soumise à des épisodes intenses de type pluvio-orageux, caractéristiques du climat méditerranéen et se produisant généralement à l'automne. Cette particularité induit une résonance entre des événements météorologiques à cinétique rapide et des bassins-versants ayant des temps de réponse généralement très courts, provoquant des phénomènes parfois dévastateurs appelés « crues éclair »<sup>1</sup>. La présence des Alpes ajoute une contrainte à l'écoulement des précipitations qui sont contraintes à parcourir un chemin étroit et pentu. Une autre problématique s'ajoute aux bassins-versants<sup>2</sup> de haute montagne, avec la fonte nivale printanière. Ainsi, les bassins côtiers de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur peuvent donner lieu à des événements marquants, comme le 15 juin 2010 à Draguignan qui coûta la vie à 25 personnes, avec des cumuls journaliers de pluie dépassant 350 mm et une extension surfacique rare de l'isohyète<sup>3</sup> à 200 mm. D'autres types d'épisodes moins intenses mais d'une durée plus longue (2 à 3 jours) peuvent provoquer des inondations conséquentes, comme en novembre 2011, 2012 et janvier 2014. Aux fortes précipitations et aux morphologies particulières des bassins-versants peut s'ajouter en effet la saturation des sols en eau qui favorise le ruissellement de surface et accentue le risque de crue.

Environ 40 % des épisodes classés en vigilance orange par Météo-France sur la région Sud-Est se situent entre le mois de septembre et le mois d'octobre (statistiques réalisées sur la liste exhaustive des épisodes classés en vigilance orange par le Centre météorologique interrégional Sud-Est entre 2004 et 2014), à l'exception de l'épisode de

Draguignan. Ces orages peuvent être de nature variée, mais, dans la majorité des cas, il s'agit d'orages stationnaires. On peut distinguer ces systèmes par leur forme « en V », la pointe du V représentant l'endroit où l'orage se régénère (figure 1). Les mécanismes de formation de ce type d'orages sont présentés dans Goulet (2015).

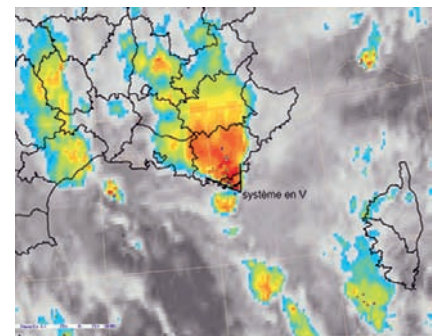


Figure 1. Image satellite *Meteosat MSG* infrarouge de Lalongue-les-Maures, le 19 janvier 2014 à 9 h 30 UTC.

Un autre type de crue est lié à la saturation du sol suite à une succession de passages pluvieux, comme ce fut le cas en janvier 1994 sur le fleuve Var. Les deux types peuvent cependant être combinés tel qu'en janvier 2014 sur le Gapeau, où les sols étaient saturés lors

1. Crues dont l'apparition est soudaine, souvent difficilement prévisible, de temps de montée rapide et de débit spécifique relativement important. Ces crues éclair sont généralement liées à des épisodes pluvieux intenses et se manifestent souvent sur des bassins de taille réduite (source : OMM).

2. Un bassin-versant est une aire délimitée par une ligne de partage des eaux, souvent assimilée à une ligne de crête.

3. Isohyète : ligne imaginaire sur une carte météorologique reliant des points d'égales quantités de précipitations tombées en une période déterminée.

de la mise en place d'un orage stationnaire. Ces intensités de pluie peuvent être mal perçues par les observations au sol. C'est pourquoi de nouveaux radars ont été déployés en 2011 dans les Alpes du Sud afin de pallier le problème récurrent des précipitations masquées par le relief. Ces installations s'inscrivent dans le cadre du projet Rhythme (Risques hydrométéorologiques en territoires de montagnes et méditerranéens) qui propose depuis fin 2013 une plate-forme d'avertissement des aléas naturels liés aux précipitations afin d'anticiper les événements dangereux (Westrelin *et al.*, 2013). La mise en place de ces radars étant relativement récente, aucune étude n'a pu montrer l'impact de ces nouvelles lames d'eau<sup>4</sup> dans des modèles hydrologiques de prévision des crues.

De nombreuses études ont été réalisées afin de modéliser au mieux le débit des cours d'eau sujets à ce genre de phénomènes afin d'améliorer la connaissance et l'anticipation des crues dans cette région. Les travaux de Garambois *et al.* (2011) mettent en évidence les relations entre des indices hydrologiques et des distributions de pluie à différentes échelles pour permettre d'améliorer la compréhension de la dynamique des crues éclair et de caractériser la réponse du bassin versant. Il a été montré que pour des bassins de taille moyenne (> 100 km<sup>2</sup>), la forme de la réponse du bassin est corrélée à la position des cellules orageuses à l'intérieur de ce même bassin-versant. Sur une grande majorité des bassins-versants de l'arc méditerranéen, les pluies orageuses peuvent être localisées près des exutoires<sup>5</sup> et amener des temps de réponse bien plus courts que par propagation. La plupart des sols sont de faible épaisseur et ont une conductivité hydraulique élevée, ce qui induit une saturation rapide. Les travaux de Roux *et al.* (2011) présentent les particularités du modèle Marine et son application sur le bassin du Gardon d'Anduze. Lobligeois *et al.* (2014) se focalise sur l'apport de la distribution spatiale des pluies dans la modélisation des crues. Il en résulte, sur les 3620 événements de crues utilisés, qu'une utilisation des données spatialisées sur le pourtour méditerranéen est fortement conseillée. Ailleurs, la tendance n'est pas nette quant à l'amélioration des prévisions grâce aux données radar. D'autres études ont montré l'apport significatif du pas de temps horaire par rapport au journalier dans la modélisation hydrologique (Berthet, 2010). La plupart des auteurs de ces études évoquent les incertitudes liées d'une part aux données hydrométéorologiques

d'entrée et d'autre part aux modèles eux-mêmes. Tout au long de cet article, la notion d'incertitude est présente et on tentera d'en évaluer toutes les sources.

## Problématique

L'originalité de cette étude réside dans l'utilisation inédite de lames d'eau intégrant les radars en bande X installés dans le cadre du projet Rhythme. L'étude se focalise sur le calage de deux types de modèles hydrologiques :

- GRP<sup>6</sup>, un modèle global hybride, mi-conceptuel, mi-empirique ;
- Marine, un modèle à bases physiques.

Le but est d'illustrer concrètement la problématique d'assimilation de données radar par les modèles hydrologiques et de fournir à terme, au SPC Med-Est, un jeu de données pertinent pour une utilisation de ces modèles en opérationnel.

## Présentation de la zone d'étude

Le domaine d'étude se concentre sur l'est du territoire du SPC Med-Est. Il comprend les départements du Var, des Alpes-Maritimes et une partie des Alpes de Haute-Provence. Quatre bassins-versants sont étudiés dont deux en haute montagne et relativement loin de la portée hydrologique du radar de Collobrières (radar en bande S). L'apport des radars en bande X est donc

pressenti sur ces deux bassins. Les deux autres bassins-versants sont situés dans le département du Var, à une altitude moindre, mais d'une importance cruciale dans la prévision des crues, notamment pour la plaine de Fréjus. La figure 2 montre la superposition d'un Scan25<sup>7</sup> de l'IGN avec les différents éléments descriptifs de la zone d'étude. On remarque une ligne verte délimitant le territoire du SPC Med-Est, les cercles rouges représentant les portées hydrologiques des radars en bande S, les cercles noirs représentant celles des radars en bande X (on note que le radar du mont Vial installé par la société Novimet n'est pas présent : après discussion avec la DSO<sup>8</sup>, il s'est avéré que les post-traitements spécifiques aux échos fixes n'étaient pas encore assez efficaces pour que ce radar puisse être pris en compte), ainsi que des points roses numérotés correspondant à l'altitude des stations climatologiques.

## Épisodes étudiés

Les événements étudiés s'étendent de 2011 à 2014, période durant laquelle la DSO a pu fournir à la fois les différentes lames d'eau opérationnelles et les lames d'eau prenant en compte les radars X. Malgré une durée de 3 ans à peine, la région a connu des épisodes hydrologiquement significatifs puisque sur onze événements au total (soit 26 journées) huit ont été placés en vigilance orange et trois en vigilance jaune (tableau 1).

Tableau 1. Liste des épisodes étudiés.

Épisodes	Commentaires
24/10/2011 au 26/10/2011	Première humidification automnale, vigilance jaune
03/11/2011 au 10/11/2011	Vigilance orange, proche de la vigilance rouge sur l'Argens et le Var amont
26/10/2012 au 27/10/2012	Pluie de bassin de 30 mm/h sur le cours d'eau de l'Aille, vigilance jaune
03/11/2012 au 05/11/2012	Réaction significative du Var amont et de l'Endre, vigilance jaune
09/11/2012 au 11/11/2012	Vigilance orange
26/11/2012 au 29/11/2012	Vigilance orange sur l'Argens aval
13/12/2012 au 15/12/2012	Vigilance orange sur le Gapeau
18/05/2013 au 19/05/2013	Vigilance orange sur l'Argens aval
19/12/2013 au 20/12/2013	Vigilance orange sur l'Argens aval
24/12/2013 au 26/12/2013	Vigilance orange sur l'Argens aval
16/01/2014 au 20/01/2014	Vigilance orange sur l'Argens aval, proche du rouge sur le Gapeau (Hyères)

4. Une lame d'eau est obtenue en divisant un volume d'eau écoulé en une station de mesure par la surface du bassin-versant à cette station. Elle est couramment exprimée en millimètres, ce qui permet de la comparer aux pluies qui en sont à l'origine.

5. Point bas du réseau hydrographique vers lequel toute goutte de pluie n'ayant été ni infiltrée ni évaporée ira à la fin de son parcours.

6. GRP : Génie rural pour la prévision des crues.

7. Le Scan25<sup>®</sup> est une image numérique continue sur tout le territoire français des cartes IGN au 1:25 000.

8. Direction des systèmes d'observation, Météo-France.

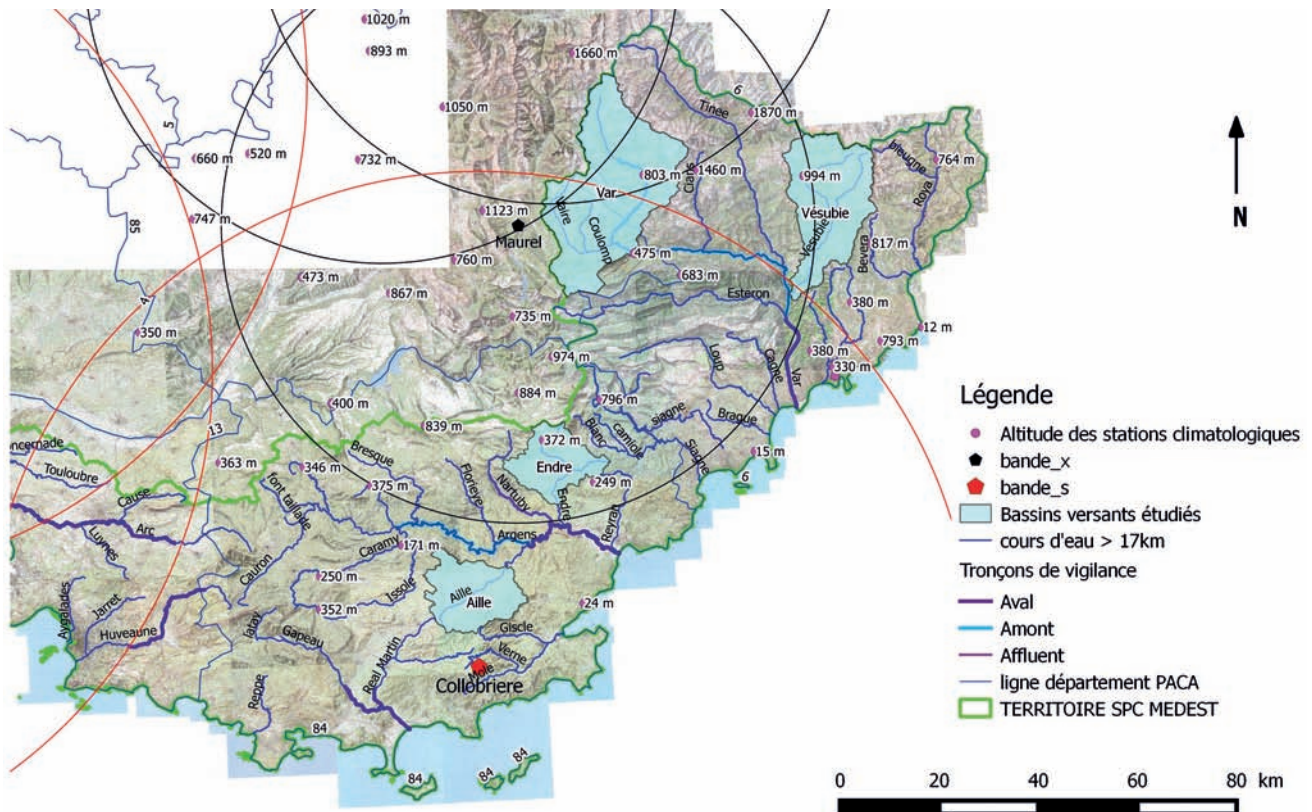


Figure 2. Carte générale de la zone d'étude.

On remarque que la plupart des épisodes ont lieu entre le mois d'octobre et le mois de janvier, période pendant laquelle la présence de neige est très probable surtout dans les bassins de haute montagne.

## Les lames d'eau radar

Le réseau radar de Météo-France, appelé Aramis, comprenait 24 radars en France métropolitaine en 2007. Il était composé de radars en bande C (longueur d'onde 5 cm) et en bande S (longueur d'onde 10 cm), ces derniers étant privilégiés dans le Sud-Est de par la sensibilité de la région à l'atténuation du signal par les fortes précipitations. En 2013, le projet Rhythme a eu pour objectif l'installation de trois radars en bande X (longueur d'onde 3 cm) dans les Alpes du Sud. Ces radars ont l'avantage d'être de taille beaucoup plus réduite par rapport aux radars en bande C ou S, ce qui facilite leur installation sur des sites de haute montagne (Lemaître *et al.*, 2013). L'utilisation de ces nouveaux radars n'aurait pas été pertinente sans les avancées technologiques considérables, notamment la mesure de la double polarisation et son potentiel à corriger des effets de l'atténuation du signal. Les radars en bande

X ont été récemment intégrés dans la mosaïque radar opérationnelle de Météo-France au même titre que ceux en bande C ou S déjà présents.

Les lames d'eau radar sont un des produits issus des radars. Ce sont des estimations de cumuls de précipitation au sol par combinaison linéaire pondérée des mesures effectuées à chaque angle d'élévation (Tabary *et al.*, 2013). De nombreux traitements sont appliqués aux calculs de lame d'eau comme l'élimination des échos fixes, la correction des masques, la correction de l'atténuation par les gaz..., de manière à rendre le plus juste possible la mesure issue du radar.

Deux types de lames d'eau sont utilisés dans le cadre de cette étude. D'une part, les lames d'eau Panthère fournies au pas de temps cinq minutes, à la résolution de 1 km<sup>2</sup>. Elles sont opérationnelles à Météo-France depuis mi-2006. Un contrôle en temps réel est effectué en indiquant le sens et la valeur du rapport radar/pluviomètre. Un ajustement est alors possible si la lame d'eau n'est pas en adéquation avec les mesures des pluviomètres. D'autre part, les lames d'eau Antilope, produit de fusion de données au pas de temps horaire à la résolution de 1 km<sup>2</sup>

couvrant toute la France métropolitaine (hors Corse), comprenant en entrée :

- les données radar de Panthère au pas de temps 5 minutes et à la résolution du km<sup>2</sup> ;
- les données pluviométriques du réseau Radome<sup>9</sup> et de réseaux annexes (EDF, Direction de l'eau, Inra...). Cette lame d'eau est opérationnelle depuis 2006. Une nouvelle version d'Antilope (Antilope V2) est désormais opérationnelle depuis juillet 2013. Elle conserve les deux principes de base de l'ancienne version d'Antilope de 2006 à savoir :
  - la combinaison des données radars et pluviométriques ;
  - la décomposition des précipitations en deux parties par séparation d'échelles spatiale et temporelle : les précipitations stratiformes (grande échelle) et les épisodes convectifs (petite échelle).

La différence majeure se situe dans l'utilisation des données pluviométriques qui sont employées non seulement

9. Les stations météorologiques professionnelles du réseau de Météo-France, appelé réseau Radome, sont au nombre de 554 en métropole (une tous les 30 km) et 67 en outre-mer. Source : [www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/moyens/les-stations-au-sol](http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/moyens/les-stations-au-sol)

pour les précipitations stratiformes, mais également pour les épisodes convectifs. La méthode utilisée est celle du krigeage par dérive externe qui permet de spatialiser les données pluviométriques grâce à la connaissance d'une variable auxiliaire qui mesure indirectement le même phénomène en tout point de grille : ici, les lames d'eau radar.

Dans cette étude, quatre types de lames d'eau sont distinguées :

- les lames d'eau Panthère intégrant les radars en bande X ;
- les lames d'eau Panthère n'intégrant pas les radars en bande X, c'est-à-dire telles qu'elles sont fabriquées depuis 2006 ;
- les lames d'eau Antilope intégrant les radars en bande X ;
- les lames d'eau Antilope n'intégrant pas les radars en bande X.

## Les modèles hydrologiques

La modélisation hydrologique a pour but de transformer une série chronologique de précipitations tombant sur un bassin-versant en une série de débits à l'exutoire. De nombreux modèles ont été développés depuis les années 1960 suivant l'utilisation finale et les données d'entrée dont on dispose. On peut distinguer les modèles suivant leur représentation des processus :

- modèle empirique : il est établi à partir des observations de pluies et de débits sur le bassin versant en question par des relations statistiques reliant les deux. Ces modèles ne cherchent pas à décrire les processus qui relient la pluie au débit et sont donc souvent considérés comme des modèles de type « boîte noire » ;
- modèle conceptuel : il repose sur un certain nombre de principes de base (plus ou moins physiques) comme la conservation de la masse et de l'énergie, ou la description du bassin-versant par fonction de production et de transfert. Ces modèles sont souvent composés de réservoirs connectés entre eux et qui représentent les différents compartiments hydrologiques des bassins-versants (Berthet, 2010) ;
- modèle à base physique : il est fondé sur une découpe du bassin-versant en volumes élémentaires sur lesquels on peut employer les lois de la physique (Berthet, 2010). Ce genre d'approche doit faire face à la très grande hétérogénéité que peut présenter un bassin-versant et au problème de rapport des

similitudes reliant les grandeurs mesurables dans la réalité et celles mesurables sur les modèles<sup>10</sup>.

Les modèles peuvent aussi être distingués selon leur représentation de l'espace (figure 3) :

- modèle global : le bassin-versant est considéré comme une seule entité homogène spatialement. Les données d'entrée sont alors moyennées sur cette surface. Un tel modèle peut également définir des sous-éléments et établir des relations entre ces compartiments (écoulements de surface, souterrains, etc.) (Berthet, 2010) ;

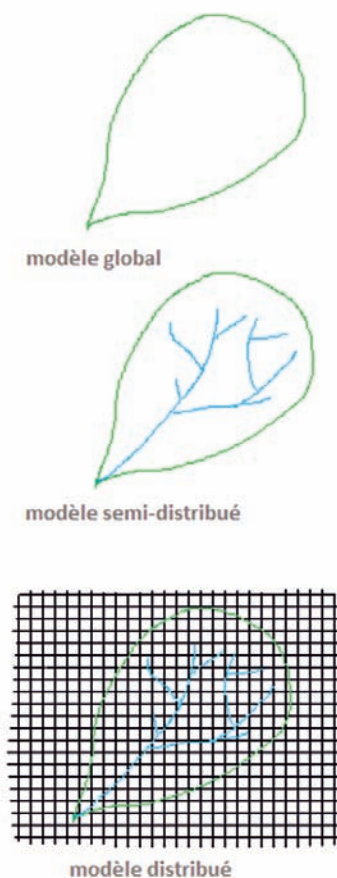


Figure 3. Les types de modèles suivant leur représentation de l'espace.

- modèle semi-distribué : détaille le bassin versant en sous-bassins versants considérés comme homogènes. Les entrées du modèle sont spécifiées pour chaque unité et les flux entre ces unités doivent être explicités. Ce modèle permet de prendre en compte la variabilité spatiale des processus étudiés ;
- modèle distribué : le bassin-versant est découpé en plusieurs entités spatiales homogènes par une grille régulière le plus généralement. Les données d'entrée du modèle sont adaptées à cette maille. Ce modèle permet de prendre en compte la variabilité spatiale des processus étudiés.

Ces différents modèles peuvent servir pour la simulation, mais aussi pour la prévision des crues. C'est pourquoi le Service de prévision des crues Med-Est a rendu opérationnel un modèle global hybride mi-conceptuel, mi-empirique appelé GRP. À terme, un modèle distribué à base physique pourrait être utilisé, comme le modèle Marine développé par l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT).

La suite de cet article va consister à évaluer les scores de chaque modèle obtenus après un processus de calage-validation de chacun d'eux avec en entrée les différentes lames d'eau explicitées précédemment.

## Le modèle GRP

Le modèle de prévision GRP est conçu pour la prévision des débits à court terme, notamment la prévision des crues. Il comporte deux utilitaires :

- un utilitaire de calage et d'évaluation qui exploite les données historiques ;
- un utilitaire pour la prévision qui permet de réaliser les prévisions de débit en temps réel ou en temps différé pour l'analyse *a posteriori* des événements.

C'est un modèle :

- continu (par opposition aux modèles événementiels) ; il se sert de l'historique des conditions météorologiques antérieures à l'événement en cours, notamment pour déterminer les conditions d'humidité du bassin à l'instant de la prévision ;
- global ; on fait l'hypothèse que les hétérogénéités spatiales des caractéristiques et des précipitations du bassin ne jouent pas un rôle de premier ordre dans la réponse du bassin-versant ;
- avec une structure à réservoirs, l'apparentant ainsi à des modèles conceptuels, bien que son mode de construction conduise à le classer entre les modèles conceptuels et empiriques .

Il a été développé par Tangara (2005) et poursuivi par Berthet (2010). Il est utilisé à ce jour par de nombreux services de prévision de crues pour sa simplicité d'utilisation et d'application. L'assimilation de débit pour les crues lentes lui permet d'éliminer en grande partie la difficulté épineuse et fondamentale du contenu en eau du sol en début d'événement. La figure 4a présente le schéma global de fonctionnement du modèle.

10. Source : <http://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICMODEL.HTM>

11. Source : <http://webgr.irstea.fr/modeles/modele-de-prevision-grp/>

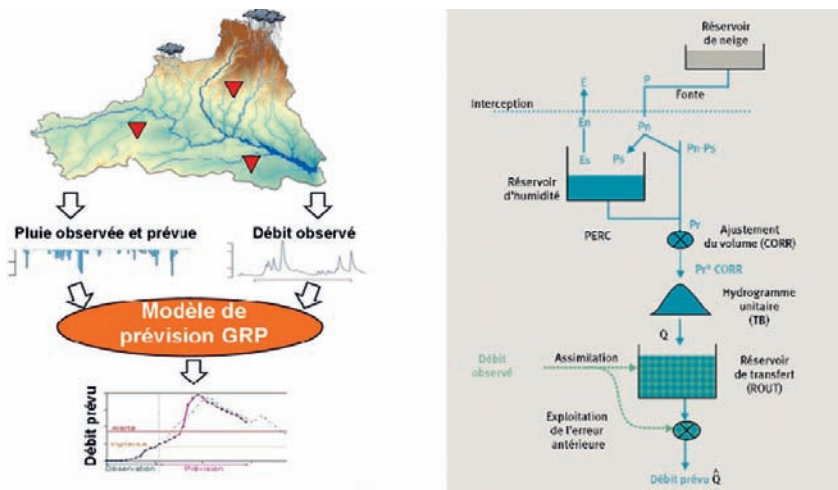


Figure 4. (a) Schéma global de fonctionnement du GRP. (b) Structure du modèle GRP avec :  $E$  l'évapotranspiration,  $P$  les précipitations,  $Q$  le débit, CORR le facteur de correction des pluies efficaces,  $TB(h)$  le temps de base de l'hydrogramme unitaire, ROUT la taille du réservoir de transfert.

La structure du modèle, présentée sur la figure 4b, est la suivante :

- un réservoir d'humidité (de capacité fixe égale à 275 mm) qui permet d'assurer un suivi des conditions d'humidité du bassin ;
- une fonction d'ajustement de la pluie efficace (paramètre adimensionnel CORR supérieur ou inférieur à 1) ;
- un hydrogramme unitaire de temps de base TB (en heures) ;
- un réservoir de transfert, de capacité ROUT (en mm).

Le fonctionnement du modèle au pas de temps  $t$  repose sur les étapes suivantes :

- l'évapotranspiration potentielle (ETP)<sup>12</sup> est retranchée de la pluie ;
- le reste éventuel de pluie  $P_n$  est divisé en deux parties en fonction du taux de remplissage du réservoir de production, une partie  $P_n$  alimentant ce réservoir et une partie  $P_n - P_n$  alimentant l'écoulement. Le reste éventuel d'ETP,  $E_n$ , contribue à la vidange du réservoir de production par évapotranspiration réelle (ETR),  $E_n$  ;
- une percolation issue du réservoir de production (PERC) va alimenter l'écoulement ;
- la quantité d'eau totale alimentant l'écoulement,  $E_n$ , est multipliée par un facteur d'ajustement, CORR, qui permet de tenir compte des éventuels échanges avec les nappes profondes et les bassins voisins ;
- le transfert de l'eau est d'abord assuré par l'hydrogramme unitaire qui permet de tenir compte du décalage temporel entre pluie et débit, puis par le réservoir de routage.

Le réservoir comprenant la neige provient d'un module appelé Cemaneige et ne sera pas utilisé ici, car il n'est applicable que sur le modèle GRP au pas de temps journalier, alors que le pas de temps utilisé dans cette étude est horaire.

L'étude s'est concentrée sur quatre bassins versants :

- le bassin-versant du Var amont dont la station hydrométrique se situe à Entrevaux avec une surface drainée de 674 km<sup>2</sup> ;
- le bassin de la Vésubie, un affluent du Var, d'une surface drainée de 392 km<sup>2</sup> et dont la station hydrométrique se situe à Cros d'Utelle ;
- le bassin-versant de l'Endre, un affluent de l'Argens, d'une surface drainée de 183 km<sup>2</sup> et dont la station hydrométrique se situe au Muy ;
- le bassin-versant de l'Aille, également affluent de l'Argens, d'une surface drainée de 227 km<sup>2</sup> et dont la station hydrométrique se situe à Vidauban.

Le modèle GRP étant un modèle global, les données de pluie en entrée doivent être moyennées sur ces quatre bassins-versants. Ces précipitations sont appelées « pluie de bassin (PB) ». Pour les quatre lames d'eau (Antilope et Panthère avec et sans radars en bande X), on calcule une moyenne arithmétique sur chaque bassin-versant. Les données de pluie sont horaires et doivent être continues sur une longue période. Ainsi, pour combler certains manques de données entre les épisodes, les quatre lames d'eau sont superposées à une lame d'eau dite « de base », continue dans le temps entre 2011 et 2014 : la lame d'eau Antilope première génération (n'intégrant pas les radars en bande X).

Ce modèle a la particularité de mettre à jour les états de son réservoir de transfert directement grâce aux débits observés. Ces données de débits sont obtenues par combinaison des hauteurs d'eau mesurées aux stations et des courbes de tarage<sup>13</sup> stockées dans un espace

appelé Banque Hydro fournie par le Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (Schapi).

Les données d'évapotranspiration potentielle sont obtenues au pas de temps journalier via un outil climatologique utilisé à Météo-France (Okapi).

## Les résultats du modèle GRP

Une fois les données d'entrée mises au bon format, le modèle GRP est lancé via des exécutables successifs. L'utilitaire de calage est utilisé. Il permet notamment d'évaluer les performances du modèle sur plusieurs bassins-versants en suivant une procédure de calage-contrôle (autrement appelée calage-validation) sur des périodes indépendantes et de caler les paramètres du modèle sur les données disponibles. Un minimum d'un an de données est requis afin d'avoir un cycle hydrologique complet. On choisit un horizon de prévision à 24 h. Cet horizon est fixe, mais cela n'empêche pas que des prévisions soient effectuées à d'autres échéances. Ce choix de l'horizon peut être fait suivant deux aspects assez antagonistes :

- en fonction du temps de réaction estimé du bassin ;
- en fonction du souhait du Service de prévision des crues (en général de 24 à 72 h selon le type de cours d'eau et les besoins des services de la Sécurité civile pour l'évacuation de la population).

On choisira préférentiellement l'horizon le plus étendu parmi les deux. Dans notre cas particulier, on souhaite réduire la correction par assimilation du débit et savoir si le modèle GRP à l'échéance 24 h pourrait être utilisé pour la vigilance. Les critères de Nash (voir encadré) sur les quatre bassins versants et pour les quatre lames d'eau ont été calculés à l'horizon de prévision 24 h.

12. L'évapotranspiration est la somme de la transpiration du couvert végétal et de l'évaporation des sols. On désigne comme évapotranspiration réelle (ETR) la valeur de ce flux à un instant donné. Lorsque la disponibilité en eau n'est pas limitative, ce flux tend vers une limite appelée évapotranspiration potentielle (ETP). Source : <http://www.precis-mecanique.com>

13. Courbe décrivant la relation expérimentale entre les hauteurs d'eau et les débits correspondants d'un cours d'eau ou d'un canal, établie à partir de mesures de vitesses à travers une section de référence. Source : <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/FRDIC/DICTARAG.HTM>

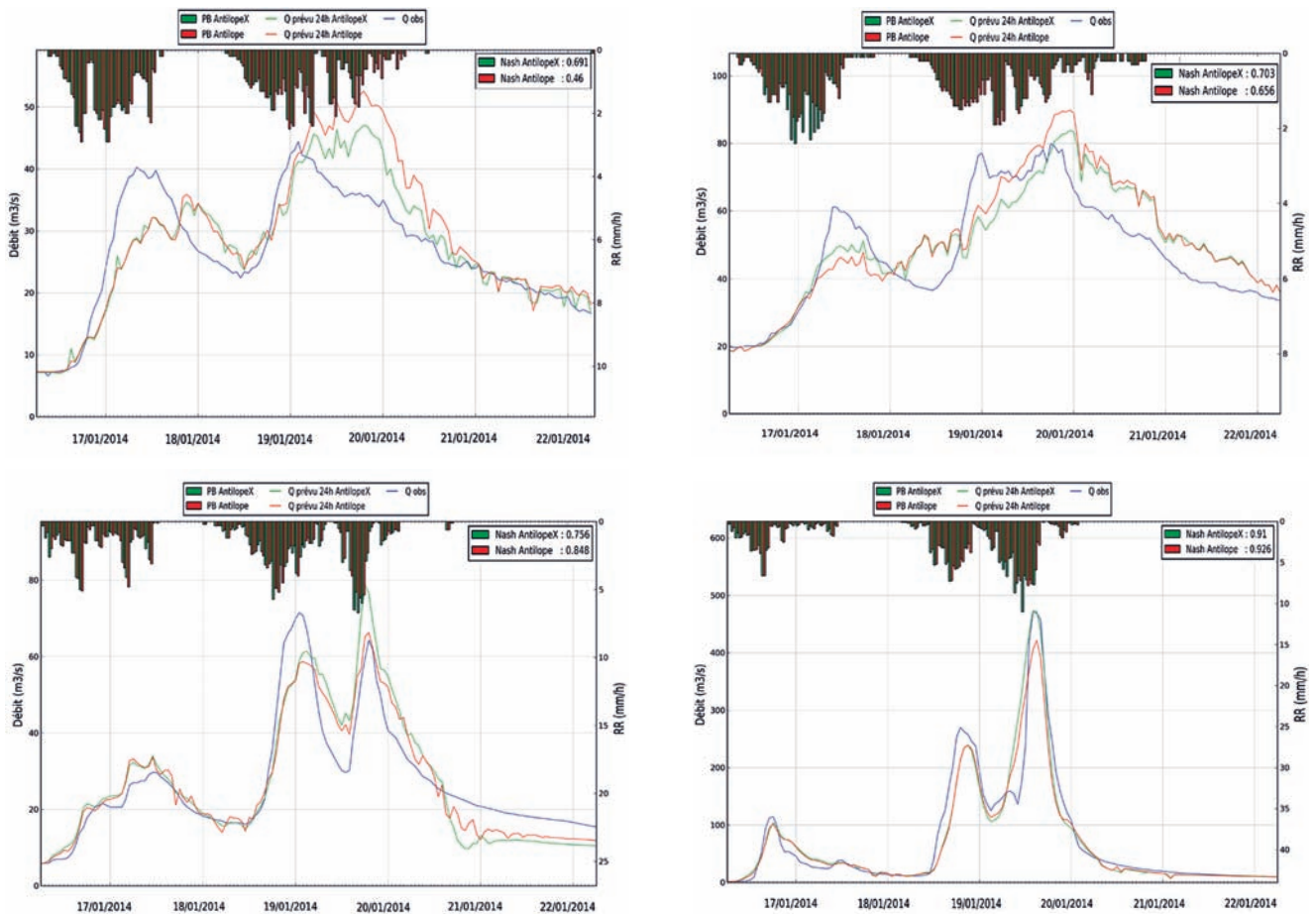


Figure 5. Évolution temporelle du débit observé et simulé à 24 h d'échéance par le modèle GRP et hyétogramme des lames d'eau Antilope avec et sans radar en bande X sur l'événement du 16 au 22/01/2014. De gauche à droite : Cros d'Utelle (Vésubie) ; Entrevaux (Var Amont) ; Le Muy (Endre) ; Vidauban (Aille).

## Le critère de Nash

Le critère de Nash exprime la proportion de la variance des débits expliquée par le modèle hydrologique : il varie entre  $-\infty$  et 1. Un critère de Nash égal à 1 correspond à un accord parfait entre les valeurs observées et simulées. Une valeur négative indique que le modèle est moins performant que la prévision de référence constituée par la simple moyenne des débits observés. Il s'exprime ainsi :

$$N = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{i=N} (Q_j^s - Q_j^o)^2}{\sum_{j=1}^{i=N} (Q_j^s - \bar{Q})^2}$$

où  $Q_j^o$  et  $Q_j^s$  sont respectivement les débits observé et simulé. La barre indique la moyenne des débits.

significativité des critères de Nash au centième près n'est pas avérée. Ces résultats sont calculés sur l'ensemble du jeu de données. Or les épisodes ayant un débit significatif ne représentent que 20 % de ce jeu de données. Il est donc important de considérer ces résultats avec précaution. En effet, les critères de Nash sont relativement élevés dans ce cas, mais lorsque l'on réitère la procédure de calage-validation uniquement sur les montées de crue, les scores se dégradent.

L'illustration de l'apport des lames d'eau Antilope intégrant les radars en bande X est visualisable sur l'épisode du 16 au 22 janvier 2014. La figure 5 montre l'évolution du débit observé et simulé par le modèle GRP en intégrant

en entrée les lames d'eau Antilope avec et sans radar en bande X sur les quatre bassins d'étude.

On remarque sur la figure 5 que les résultats diffèrent selon les bassins-versants. En effet, les lames d'eau Antilope sans radar en bande X donnent des scores de Nash supérieurs sur les bassins de l'Endre (0,848) et de l'Aille (0,926). Sur ces bassins, le critère de Nash est moins bon avec les radars en bande X, mais l'intensité du pic est mieux reproduite avec ces derniers. En revanche, sur les bassins-versants de haute montagne, à savoir ceux de la Vésubie et du Var amont, les scores sont nettement supérieurs avec les lames d'eau Antilope intégrant les radars en bande X (0,691 et 0,703,

Tableau 2. Critères de Nash obtenus après le processus de calage-validation du modèle GRP sur les quatre bassins-versants en utilisant les quatre lames d'eau en entrée.

Lames d'eau	Entrevaux	Cros d'Utelle	Le Muy	Vidauban
Antilope V2	0,8310	0,7915	0,8796	0,8960
Antilope V2 X	0,8442	0,7989	0,8716	0,8976
Panthère	0,7487	0,7662	0,7307	0,7810
Panthère X	0,7437	0,7222	0,8025	0,8339

Les résultats du tableau 2 ne mettent pas en évidence une meilleure simulation du modèle GRP avec une lame d'eau en entrée plutôt qu'une autre. La

respectivement). On a réalisé cette étude sur plusieurs épisodes et le résultat reste similaire, à savoir que les lames d'eau Antilope comprenant les radars en bande X donnent des débits simulés plus proches des débits observés sur les bassins-versants de haute montagne des Alpes du Sud. Pour les bassins de l'Endre et de l'Aille, les résultats sont plus contrastés, même si on peut remarquer une légère amélioration avec les lames d'eau Antilope sans radar en bande X. Cette distinction entre les bassins-versants peut s'expliquer par leur proximité avec la position du radar de Maurel ou du radar de Collobrières. Cependant, ces résultats sont à prendre avec précaution, puisque si l'on ne se focalise pas sur des événements en particulier, mais sur l'ensemble des données, les résultats changent quelque peu. De plus, la lame d'eau Antilope V2 intégrant les radars en bande X n'est pas censée dégrader les cumuls de pluie horaires hors de la portée hydrologique du radar de Maurel. Rappelons enfin que l'on utilise des données de débits qui peuvent introduire tout autant d'erreurs que les données de pluie.

Le modèle de prévision GRP donne de bons résultats pour la prévision des débits en période de décrue. En ce qui concerne la montée de crue et la prévision du débit de pointe, les résultats sont globalement moins bons et variables suivant les lames d'eau en entrée et les cours d'eau étudiés. Il est ressorti de cette étude que les lames d'eau Antilope avec radar en bande X apportent des résultats satisfaisants sur l'ensemble des bassins-versants étudiés. Les lames d'eau Panthère avec et sans radars en bande X donnent généralement de moins bons scores. Ces disparités entre bassins-versants peuvent s'expliquer par la nature du modèle à sous-estimer les débits lorsque les sols sont secs et que les réservoirs sont vides en début d'événement (cela explique en grande partie les mauvais scores du GRP en fin de saison sèche). Entre bassins et entre événements d'un même bassin, les différences peuvent s'expliquer par la mauvaise prise en compte de réseaux souterrains à fonctionnement variable, la répartition des pluies à l'intérieur des bassins, la présence de neige, la validité de la relation hauteur/débit<sup>14</sup>...

Une autre particularité du modèle a été soulevée lors de son utilisation. L'ajout de l'événement de novembre 2011 dans le calage du modèle semble fortement dégrader les scores. Il semblerait qu'un épisode d'une telle ampleur (50 mm de pluie en 1 h) ne puisse pas être pris en

compte correctement par le modèle. À des fins opérationnelles, il serait alors préférable de caler le GRP sur des événements relativement homogènes tout en sachant par la suite que si un événement d'une si grande intensité se produisait, le modèle sous-estimerait largement les débits, notamment en montée de crue.

Cette première expérience avec un modèle de prévision global montre la multitude d'incertitudes auxquelles les services opérationnels de prévision de crue sont confrontés, aussi bien sur les données de pluie que sur les données de débits observés, mais aussi sur le modèle GRP lui-même. La sélection de la procédure de correction des erreurs du modèle (réseau de neurones ou méthode de Tangara) peut éventuellement changer les résultats tout comme le choix de l'horizon de calage. Une étude similaire en prenant un horizon de prévision à 3 h pourrait être envisagée par la suite.

Au final, à l'échéance de prévision 24 h, le GRP pourrait être utilisable en opérationnel sur les cours d'eau de l'Aille, de l'Endre et du Var amont avec une attention particulière pour des accroissements de débits supérieurs à 100 m<sup>3</sup>/s. En l'état actuel des choses, il n'est pas utilisable sur la Vésubie.

Le modèle de prévision GRP étant un modèle global hybride (mi-conceptuel, mi-empirique), il n'offre pas la possibilité d'inclure des paramètres physiques liés aux bassins-versants. Or, on a pu constater la divergence des résultats sur les quatre cours d'eau étudiés. C'est pourquoi le modèle à base physique Marine va nous permettre d'intégrer des états du sol en termes de composition et d'humidité afin de nous rapprocher un peu plus de la réalité du terrain et de la répartition spatialisée des pluies à l'intérieur d'un bassin.

## Le modèle Marine

Le modèle Marine a été développé en 2000 à l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse afin de mieux comprendre et analyser la réponse hydrologique des bassins-versants méditerranéens (Roux *et al.*, 2011). Il est dédié à la simulation des crues à cinétiques rapides. C'est un modèle à bases physiques distribué spatialement et dédié à la prévision et la simulation des crues. Il est fondé sur des processus physiques interprétables (l'infiltration, le ruissellement, les

écoulements en rivière) afin de faciliter leur estimation. Le calcul des paramètres du modèle s'effectue grâce à la connaissance de la topographie, de la végétation, de la carte d'occupation des sols et de la nature même des sols (texture, structure, porosité) sur l'ensemble des bassins-versants étudiés. Ces différentes données d'entrée permettent notamment de connaître :

- les pentes du relief à l'origine des écoulements superficiels de l'eau *via* un modèle numérique de terrain ;
- les vitesses de ruissellement grâce à l'occupation du sol ;
- l'infiltrabilité grâce à la texture du sol ;
- la morphologie des lits mineurs et majeurs grâce à la rugosité et une première approche de la géométrie du cours d'eau ;
- l'humidité initiale du sol ;
- le forçage atmosphérique grâce aux lames d'eau Antilope et Panthère.

Il ne nécessite pas une longue série de données continue comme le modèle GRP, mais travaille par événements distincts. C'est pourquoi l'évapotranspiration n'est pas un facteur pris en compte dans le modèle puisqu'elle est jugée négligeable dans le cas des épisodes fortement pluvieux à simuler.

L'initialisation du contenu en eau initiale du sol se fait à partir de l'épaisseur de sol et du paramètre  $Hu_2$ <sup>15</sup> avant le début de l'événement. Ce dernier représente l'indice d'humidité issu de la chaîne SIM (Safran-Isba-Modcou) de Météo-France calculé au pas de temps journalier sur la grille régulière de 64 km<sup>2</sup>. Le modèle Modcou découpe la colonne verticale du sol en trois zones distinctes : la zone superficielle très fortement influencée par les précipitations, la zone intermédiaire et la zone profonde, dont les temps de réaction sont beaucoup plus lents. Le paramètre  $Hu_2$  correspond à l'humidité de la zone intermédiaire, située entre 1 à 2 m de profondeur. Il possède deux particularités qui le rendent intéressant : son lien direct avec l'humidité de la couche racinaire qui contribue directement au ruissellement dans le modèle ISBA et sa présentation relative à la saturation, qui est variable

14. Ainsi la courbe de tarage de la station de Cros d'Utelle sur la Vésubie a bénéficié d'une mise à jour significative en 2015 suite à une étude de la Dreal dans le cadre du Papi (Programme action prévention du risque inondation) du Var.

15. À noter la mise en place d'une présentation du sol plus détaillée en 2016 (passage de 3 à 14 couches pour la description du sol) dont les impacts en prévision hydrologique seront attentivement analysés vu l'importance de l'estimation de l'humidité du sol.

d'une maille à l'autre. Il est défini comme le rapport du contenu en eau de la couche racinaire (en m<sup>3</sup> d'eau par m<sup>3</sup> de sol) avec le contenu à saturation théorique calculé en fonction du type de sol.

L'humidité du sol peut donc varier à l'intérieur même d'un bassin-versant et on a pu remarquer son impact sur les résultats du modèle. En effet, en prenant une humidité moyenne sur le bassin, certains événements étaient très mal reproduits. L'ajout d'une humidité spatialisée a significativement amélioré les résultats.

Le modèle Marine comporte trois modules principaux :

- l'infiltration de l'eau dans le sol est calculée grâce au modèle de Green & Ampt (Musy, 1991) ;
- les écoulements de subsurface sont résolus avec le modèle de Darcy (Darcy, 1856) et Topmodel (Beven et Kirkby, 1979) ;
- le ruissellement de surface, ainsi que le réseau de drainage sont représentés avec un modèle d'onde cinématique.

Comme la plupart des modèles hydrologiques, Marine dispose d'une phase de calage et d'une phase de validation. Un critère de performance est calculé afin de se rapprocher le plus possible des observations.

Les données de pluie sont horaires et spatialisées au kilomètre carré. Contrairement au modèle GRP, elles ne nécessitent pas d'être continues sur une longue période, mais sont traitées par événements (figure 6).

## Résultats du modèle

Dans un premier temps, une simulation est effectuée sur l'ensemble des onze événements avec les quatorze paramètres de base (profondeur, humidité, porosité du sol...) fournis par l'IMFT. Le jeu de paramètres ainsi pris en compte permet d'effectuer une simulation multi-événements sur les quatre bassins-versants avec la lame d'eau Antilope sans radar en bande X. Les résultats de cette simulation sont médiocres avec des scores de Nash négatifs sur l'ensemble des bassins-versants (un critère de Nash négatif signifie que le modèle est moins bon que le modèle naïf donnant à chaque pas de temps un débit constant égal à la moyenne des débits observés). Cela permet de mettre en exergue le fait que les paramètres initiaux intégrés dans le modèle ne correspondent pas aux bassins étudiés et nécessitent un calage.

## Le Cmb3

Le Cmb3 est le résultat d'une combinaison linéaire entre le coefficient de Nash et l'erreur en termes de décalage temporel et d'intensité du pic de crue. Sa formulation est la suivante :

$$Cmb3 = \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=N} (Q_i^s - Q_i^o)^2}{\sum_{i=1}^{i=N} (Q_i^o - \bar{Q}^o)^2} \right) + \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{|Q_p^s - Q_p^o|}{Q_p^o} \right) + \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{|T_p^s - T_p^o|}{T_c} \right)$$

avec  $Q_i^s$  et  $Q_i^o$  les débits simulé et observé ;  
 $T_p^s$  et  $T_p^o$  les temps au moment du pic de crue simulé et observé ;  
 $T_c$  le temps de concentration du bassin.

De même que pour le critère de Nash seul, plus le Cmb3 se rapproche de l'unité, plus le débit simulé par le modèle est proche du débit observé.

Ces résultats peuvent aussi s'expliquer par l'hétérogénéité des événements. Une analyse de chacun d'eux en termes d'intensité maximale de précipitation, de débits de pointe observés et simulés a permis d'effectuer un classement de ces épisodes en deux catégories. Une dans laquelle les cumuls horaires de pluie sont intenses ( $\geq 10$  mm/h) mais pas extrêmes, l'autre où ils sont moindres. Selon les concepteurs, le modèle atteindrait ses limites si les données de pluies et/ou de débits spécifiques sont trop faibles, c'est pourquoi on choisit des événements modérés. Un ou plusieurs événements représentatifs du sous-ensemble sont ensuite sélectionnés pour étalonner le modèle.

Le calage est réalisé sur cinq paramètres (le coefficient de correction de la profondeur du sol, la conductivité

hydraulique à saturation, la transmissivité à saturation, la valeur des deux nombres de Strickler dans le lit mineur et majeur), choisis suite à une analyse de sensibilité réalisée par Roux *et al.* (2011). Elle est accomplie sur deux catégories d'événements : ceux d'intensité forte et ceux d'intensité modérée. Le Service de prévision des crues utilisera en opérationnel le jeu de paramètres le plus adapté à la situation du jour. Pour l'étude, on étalonne le modèle sur des événements jugés « moyens ». L'étude se concentre sur le bassin-versant de l'Aille à Vidauban.

On étalonne le modèle sur deux événements jugés modérés : du 13 au 15 décembre 2012 où les intensités horaires de pluie ont atteint 5,8 mm/h et le débit de pointe enregistré était de 193 m<sup>3</sup>/s et du 18 au 19 mai 2013 avec des intensités maximales de pluie

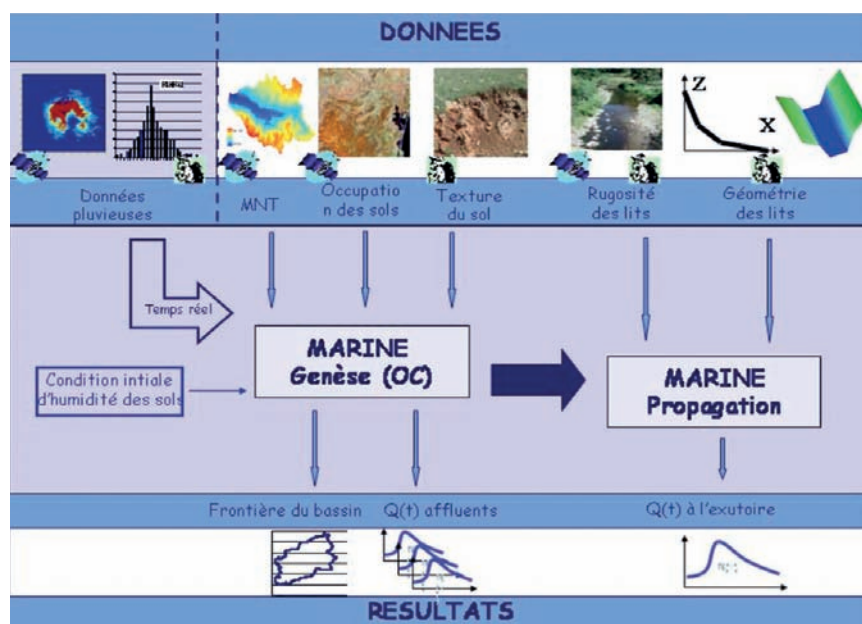


Figure 6. Illustration du fonctionnement du modèle Marine. Source : [http://hydrologie.org/THE/ESTUPINA\\_BORRELL.pdf](http://hydrologie.org/THE/ESTUPINA_BORRELL.pdf)



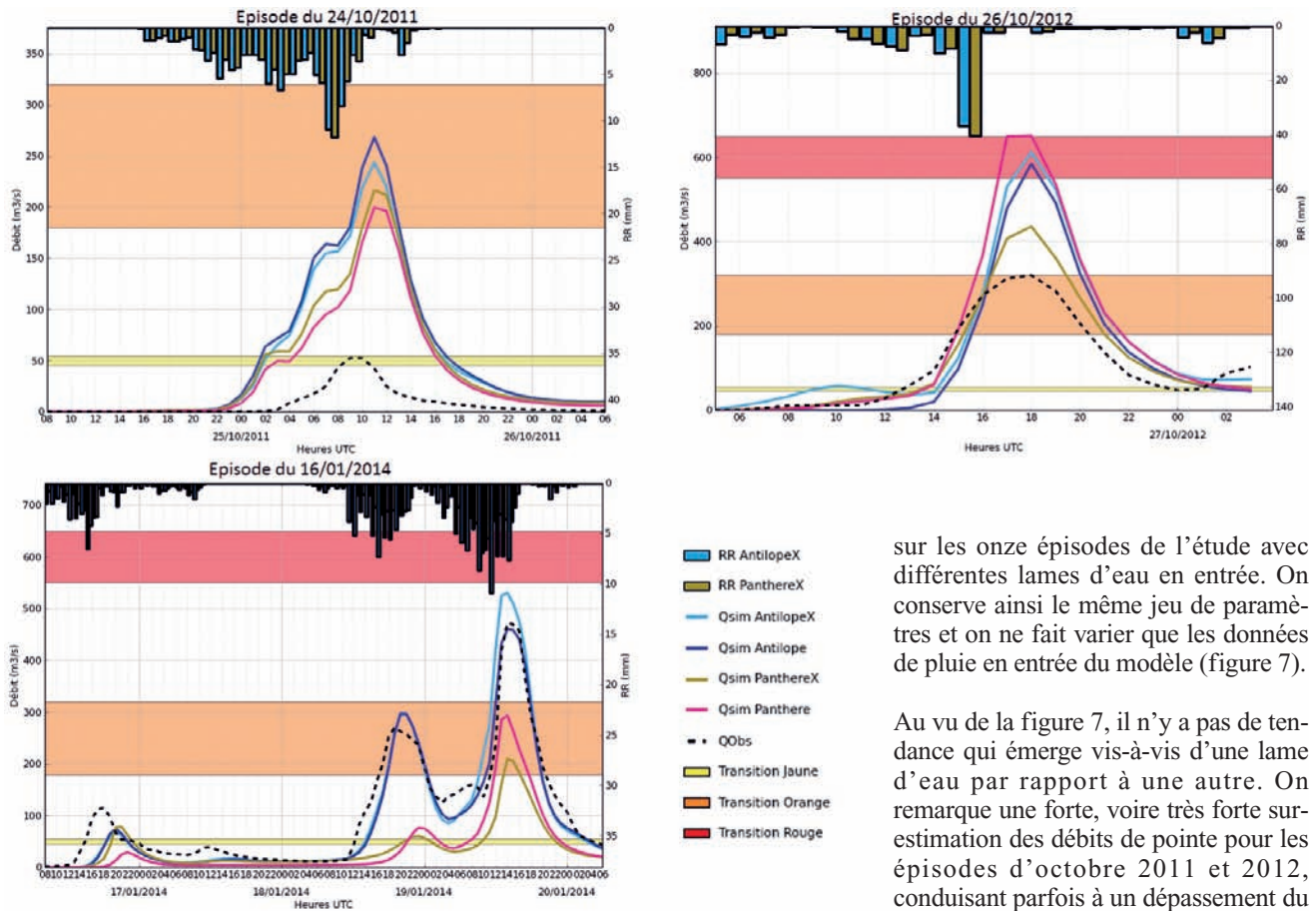


Figure 7. Procédure de validation du modèle Marine sur le bassin-versant de l'Aille pour trois épisodes avec le jeu de paramètres obtenu après calage du modèle avec la lame d'eau Antilope V2 en entrée (simulation sur l'ensemble de l'épisode sans recalage de débit sur l'observation, soit une échéance de 84 h pour le cas du 16/01/2014).

de 6,5 mm/h et un débit de pointe de 171 m<sup>3</sup>/s. On choisit un seuil de débit à 3 m<sup>3</sup>/s à partir duquel les scores seront calculés. Le calage est opéré avec les quatre lames d'eau différentes en entrée (tableau 3).

On remarque que les scores en calage sur des événements modérés sont bien meilleurs avec les lames d'eau Antilope. La différence cependant entre les lames d'eau Antilope avec et sans radar en bande X n'est pas évidente si ce n'est le décalage temporel des pics de crue qui semble mieux calé avec la lame d'eau Antilope V2 de base. Les critères de Nash et la combinaison linéaire des trois scores donnent des valeurs de l'ordre de 0,85, ce qui est très satisfaisant.

Une fois le jeu de paramètres retenu et mis en œuvre dans le modèle, on le valide sur tous les autres événements, qu'ils soient d'intensité forte ou faible. Cela permet d'observer le comportement de Marine sur des épisodes différents de ceux qui ont été utilisés lors du calage, à des fins d'utilisation en opérationnel pour des événements dont le caractère n'a potentiellement jamais été observé.

Afin d'étudier la variabilité des lames d'eau en entrée du modèle, on choisit de caler le modèle avec la lame d'eau Antilope V2 (n'intégrant pas les radars en bande X) qui semble donner de bons résultats en calage. Grâce au jeu de paramètres obtenu, on valide le modèle

sur les onze épisodes de l'étude avec différentes lames d'eau en entrée. On conserve ainsi le même jeu de paramètres et on ne fait varier que les données de pluie en entrée du modèle (figure 7).

Au vu de la figure 7, il n'y a pas de tendance qui émerge vis-à-vis d'une lame d'eau par rapport à une autre. On remarque une forte, voire très forte surestimation des débits de pointe pour les épisodes d'octobre 2011 et 2012, conduisant parfois à un dépassement du seuil de vigilance rouge. Dans un cadre opérationnel, une telle surestimation ne serait pas acceptable pour le prévisionniste. En revanche, pour l'épisode de janvier 2014, correspondant à une situation opérationnelle critique suite à la saturation des sols, le modèle donne d'excellents résultats en validation avec lames d'eau Antilope<sup>16</sup>.

La différence entre ces types d'événements provient d'une part de l'humidité initiale du sol et d'autre part de l'intensité des précipitations. Le modèle ayant été calé sur des épisodes modérés, il surestime alors largement les débits lorsque les épisodes sont d'une intensité particulièrement forte (cas d'octobre 2012). Un travail reste à faire également en cas de sécheresse initiale très forte du sol et du couvert végétal (surestimation d'octobre 2011 et 2012). On voit donc ici l'intérêt de disposer de deux jeux de paramètres (épisodes forts *versus* épisodes modérés voire faibles) pour un service opérationnel qui disposerait de ce type de modèle et plus largement de la connaissance des différents comportements du modèle

Tableau 3. Scores obtenus en calage sur le bassin-versant de l'Aille à Vidauban sur deux événements modérés (13/12/2012 et 18/05/2013). Débit de seuil fixé à 3 m<sup>3</sup>/s.

Scores	Nash	$dQ(q_{max})$	$dI(q_{max})$	Cmb3
Antilope V2	0,84	0,28	0,07	0,82
Antilope V2 X	0,84	0,22	0,15	0,82
Panthère	0,57	0,10	0,07	0,79
Panthère X	0,43	0,08	0	0,78

16. À noter une panne temporaire du radar de Collobrières durant l'événement expliquant la mauvaise simulation des lames d'eau Panthère sur cet événement. Cela illustre l'intérêt également de l'utilisation de la fusion de donnée en termes de sécurisation opérationnelle.

hydrologique selon le type d'épisode hydrométéorologique.

On pressent bien que la question de la prévisibilité des lames d'eau prévues en régime méditerranéen est également fondamentale. Les prochaines expérimentations sur une approche ensembliste de la prévision hydrométéorologique entre chercheurs et services opérationnels devraient alimenter fortement la réflexion méthodologique de la prévision de crue, notamment en régime méditerranéen.

Cette première étude du modèle Marine a pu d'ores et déjà mettre en avant certains résultats, notamment la sensibilité du modèle à certains paramètres comme l'humidité initiale qui, si elle n'est pas bien estimée en tout début d'événement, peut changer radicalement les résultats en simulation. Les données de pluies peuvent aussi affecter les résultats pour une même initialisation de modèle. Marine étant un modèle événementiel, le choix des épisodes pour le calage est primordial et conditionnera les résultats en validation par la suite. On a pu remarquer qu'en calage les lames d'eau Antilope avec et sans radars en bande X étaient très performantes sur le bassin de l'Aille. Cependant, il est très difficile de discriminer un type de lame d'eau par rapport à un autre sur les résultats de simulations qui sont très dépendants des épisodes. Dans l'ensemble, pour des épisodes similaires à ceux du calage, la validation du modèle donne de bons voire de très bons scores comme l'épisode du 16 janvier 2014 qui, malgré sa complexité, fut très bien simulé par Marine. Malgré le fait que le modèle ait tendance à lisser le signal de pluie, on

constate un réel impact des différentes données de lames d'eau sur les débits à l'issue des simulations.

## Conclusion

Cette étude a mis en évidence les nombreuses sources d'incertitude auxquelles le SPC Med-Est est confronté dans la prévision des débits. Les deux données essentielles à la modélisation hydrologique, que sont les lames d'eau et les débits observés, peuvent être entachées d'incertitude de 20 % voire plus. La problématique de la neige, non exposée dans cet article, est également un facteur aggravant, commun aux problématiques hydrologiques et météorologiques. Il serait fortement souhaitable d'avoir une meilleure gestion des précipitations solides dans la chaîne de production des lames d'eau d'une part et un module permettant de gérer le stockage et la fonte de la neige d'autre part. Dans un premier temps, la discrimination de la partie solide et liquide des précipitations en entrée d'un modèle peut permettre une meilleure prévision du débit simulé hors fonte nivale importante. L'hydrométrie, avec notamment l'estimation de débits par le biais de courbes de tarage, présente une incertitude. Des logiciels sont désormais disponibles pour établir un intervalle de confiance encadrant les courbes de tarage et devraient être utilisés à l'avenir, ne serait-ce que pour avoir une idée de l'incertitude liée à l'estimation des forts débits, souvent non jaugés.

Les deux modèles hydrologiques utilisés dans cette étude donnent des résultats sensiblement différents. Globalement, on

a pu remarquer qu'en calage les lames d'eau Antilope donnaient de meilleurs résultats pour les deux modèles. Cette tendance s'atténue fortement en phase de validation, notamment pour le modèle à bases physiques. Pour ce dernier, le calage est moins évident, mais permet à terme de mieux comprendre les mécanismes en jeu dans la formation des crues. Il a permis de mettre en évidence l'importance de la spatialisation des pluies, de l'humidité initiale et de la connaissance des sols. L'utilisation d'un même jeu de paramètres en entrée du modèle pour analyser l'influence de chaque lame d'eau n'a pas permis d'établir de conclusion définitive. L'étude devrait se poursuivre sur d'autres bassins pour tenter d'approfondir le sujet. Le modèle conceptuel GRP a quant à lui donné des résultats plus tranchés. Les lames d'eau Antilope semblent globalement donner de meilleurs résultats. L'exclusion d'événements extrêmes dans le calage du modèle semble indispensable.

Cette étude a permis de faire ressortir la sensibilité des modèles aux données pluviométriques d'entrée. Une réflexion serait à mener sur la manière dont les modèles hydrologiques utilisent ces données pour la prévision de crue.

## Remerciements

Je remercie tout particulièrement mon encadrant de stage, Jean Pansu, grâce à qui cette étude de cinq mois a pu être menée. Plus généralement, je remercie toute l'équipe du SPC Med-Est qui a su se rendre disponible ainsi que la Dreal PACA, l'Irstea d'Aix-en-Provence, le Cerema, l'IMF et les équipes radars de la DSO.

## Bibliographie

- 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 AgroParisTech.
- Beven K., Kirkby M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24, 43-69.
- Darcy H., 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. V. Dalmont, Paris.
- Garambois P.A., Roux H., Larnier K., Dartus D., 2011. Relations between stream flow indices, rainfall characteristics and catchment physical descriptors for flash flood events. *IAHS Red Book Weather Radar and Hydrology*.
- Goulet L., 2015. La prévision des systèmes orageux stationnaires dans le sud-est de la France. *La Météorologie*, 90, 27-39.
- Lemaître Y., Rysman J.-F., Verrier S., Moreau E., 2013. Le radar en bande X : un outil au service de l'étude des événements précipitants. *La Météorologie*, 83, 50-58.
- Lobligeois F., Andréassian V., Perrin C., Tabary P., Loumagne C., 2014. When does higher spatial resolution rainfall information improve streamflow simulation? An evaluation using 3620 flood events. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 18, 575-594. doi: 10.5194/hess-18-575-2014
- Musy A., Soutter M., 1991. *Physique du sol*. PPUR presses polytechniques, 335 p.
- Roux H., Labat D., Garambois P.-A., Maubourguet M.-M., Chorda J., Dartus D., 2011. A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments. *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.*, 11, 2567-2582. doi: 10.5194/nhess-11-2567-2011
- Tabary P., Augros C., Champeaux J.-L., Chèze J.-L., Faure D., Idziorek D., Lorandell R., Urban B., Vogt V., 2013. Le réseau et les produits radars de Météo-France. *La Météorologie*, 83, 15-24.
- Tangara M., 2005. Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse AgroTechParis.
- Westrelin S., Mériaux P., Dalle S., Fradon B., Jamet G., 2013. Déploiement d'un réseau de radars pour anticiper les risques hydrométéorologiques. *La Météorologie*, 83, 69-79.