

**APPORTS ET LIMITES DE L'UTILISATION DES PREVISIONS DE PLUIE
EXPERTISEES DANS LA MODELISATION HYDROLOGIQUE POUR LA
PREVISION DES CRUES A 24 H EN MILIEU CEVENOL***Benefits and limitations of using expert rainfall forecasts in hydrological
modelling for 24-h flood forecasting in the Cévennes region.***Auteurs : VALANTIN Pierre-Yves^{1*}, LABORDA Yann², DUSSUCHALE Antoine³,
MANNESSIEZ Fabrice⁴**** auteur correspondant*¹ DREAL Auvergne-Rhône-Alpes Pôle Hydrométrie Prévision des Crues Grand Delta, 89 rue Weber 3000 Nîmes, France, email : pierre-yves.valantin@developpement-durable.gouv.fr² Idem auteur 1, email : yann.laborda@developpement-durable.gouv.fr³ Idem auteur 1, email : antoine.dussuchale@developpement-durable.gouv.fr⁴ Idem auteur 1, email : fabrice.mannessiez@developpement-durable.gouv.fr**Résumé :**

Les services de prévisions des crues du réseau Vigicrues souhaitent produire sur tous les secteurs à enjeux des prévisions hydrologiques avec un horizon de 24 heures et des incertitudes qui restent pertinentes pour la gestion de crise. Si cet objectif est déjà atteint sur de nombreux bassins avec des crues lentes, il reste encore difficilement atteignable pour les petits bassins du sud de la France compte tenu des très fortes incertitudes qui peuvent exister sur les prévisions de pluies, tant en termes de localisation, d'intensité que de cumul.

Cet article présente une étude réalisée sur 5 bassins versants cévenols et 4 épisodes caractéristiques des incertitudes de ce secteur. Il précise les apports et les limites de ces prévisions en opérationnel. Dans les cas d'épisodes bien prévus par les modèles météorologiques, elles apportent une réelle plus-value tant en termes de chronologie que d'amplitude de la crue. En revanche lors des épisodes très incertains, l'incertitude actuellement fournie dans les bulletins de précipitation de Météo-France ne suffit pas à qualifier l'incertitude réelle.

Mots-clefs : prévision de crues, incertitudes, vigilance crues**Abstract :**

The flood forecasting services of the Vigicrues network wish to produce hydrological forecasts for all sectors at stake with a 24-hour horizon and uncertainties which remain relevant for crisis management. If this objective has already been achieved in many basins with slow flooding, it is still difficult to achieve for small basins in the south of France given the very high uncertainties that can exist in rain forecasts, both in terms of location, of intensity than of accumulation. This article presents a study carried out on 5 Cévennes watersheds and 4 episodes characteristic of the uncertainties of this sector. It specifies the contributions and limits of these operational forecasts. In the case of episodes well predicted by weather models, they provide real added value both in terms of chronology and amplitude of the flood. On the other hand, during very uncertain episodes, the uncertainty currently provided in Météo-France rainfall information is not sufficient to qualify the real uncertainty.

Keywords: flood forecasting, uncertainty, flood alertness

Dans les services de prévision des crues (SPC) du réseau Vigicrues, pour les bassins versant importants (supérieurs à 1000 km²) et en régime de pluie stratiforme, la production de la vigilance crue¹ et des

¹ La vigilance crue consiste à attribuer une couleur (vert, jaune, orange ou rouge) correspondant au niveau de risque estimé pour les 24 prochaines heures sur les cours d'eau surveillés par les SPC

prévisions² sont souvent confondues dans le même processus opérationnel avec une alimentations des modèles hydrologiques par des pluies observées et prévues. Le développement de passerelles permettant l'intégration des produits de prévision météorologique de Météo-France dans les outils du réseau de la prévision des crues a facilité l'utilisation des sorties de modèles météorologiques comme scénario d'entrée des modèles hydrologiques pour prévoir et anticiper l'ampleur des crues. Ainsi les SPC ont accès en temps réel à un certain nombre de sorties de modèles météorologiques (AROME, ARPEGE) qui peuvent être utilisées pour alimenter les modèles hydrologiques. Mais, en milieu méditerranéen, ces prévisions brutes sont souvent très incertaines (en cumul ou en localisation voire les deux à la fois) et très variables d'un run³ à l'autre du modèle météorologique. Ces limitations disqualifient donc ces prévisions non expertisées pour la production de la vigilance crue sur les petits bassins cévenols sur le territoire du SPC Grand Delta (SPC GD). Sur ces bassins, la vigilance reste essentiellement basée sur une approche par abaques qui permet d'intégrer facilement l'incertitude temporelle et spatiale liée à la prévision météorologique.

Dans le cadre de son projet stratégique à 10 ans, le réseau Vigicrues a décidé de généraliser dès le passage en vigilance crue jaune la publication de prévisions graphiques avec un horizon de 24 h. Cela s'appliquera donc sur des bassins inférieurs à 1 000 km². L'article ci-dessous fait le point sur les apports et les limites de ces prévisions sur les petits bassins versants (quelques centaines de kilomètres carrés) du secteur cévenol. L'impact des limites de la prévision météorologique sur les incertitudes de la prévision hydrologique et son expertise est illustré à travers l'exemple de plusieurs épisodes sur 5 bassins versants : l'Ardèche à Vallon Pont d'Arc (1 958 km²), la Cèze à Bessèges (230 km²), le Gardon d'Alès à Alès (315 km²), le Gardon d'Anduze à Anduze (543 km²) et le Vidourle à Sommières (650 km²).

1 DONNEES METEOROLOGIQUES DISPONIBLES POUR L'ESTIMATION DE LA VIGILANCE CRUE

Le territoire des SPC est découpé en zone d'avertissement précipitation (zones AP) qui sont un compromis entre les bassins versants et des zones relativement homogènes en termes de phénomènes météorologiques. La carte de la Figure 1 présente les 5 bassins versants considérés ici et les zones AP associées.

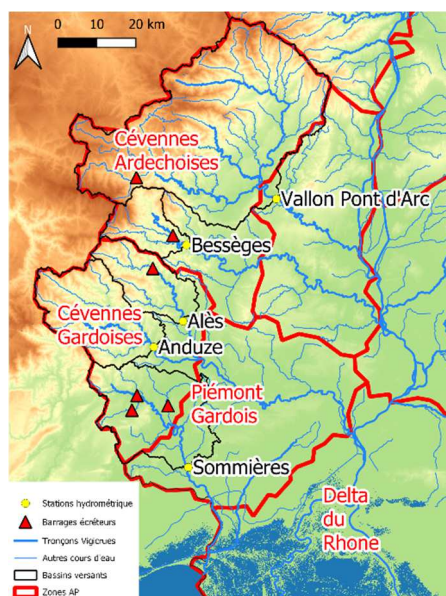


Figure 1: Carte des zones AP et des bassins versants

² A partir de la vigilance jaune les SPC produisent des prévisions de débits (ou de hauteurs) aux stations correspondants aux principaux enjeux.

³ Un run de modèle météorologique ou hydrologique est l'ensemble des résultats produits à partir d'un jeu de données d'entrée.

Pour élaborer la vigilance crue, les SPC se basent sur des prévisions expertisées transmises par Météo-France sous forme de bulletins de précipitations (BP) qui contiennent un tableau de valeurs de pluies prévues et un commentaire précisant la localisation, la chronologie des pluies et leurs incertitudes pour chaque zone AP.

Le tableau 1 présente un exemple de BP. Pour chaque zone AP et pour les 3 prochains jours, le tableau contient les valeurs des cumuls sur 24h des pluies prévues expertisées sous la forme d’une fourchette pour la pluie moyenne sur la zone et d’une fourchette pour le maximum local. Dans le sud-est de la France, ce maximum local est en général représentatif du cumul dépassé sur une zone représentant environ 10% de la zone AP. Par exemple pour la zone cévennes gardoises, le cumul moyen prévu pour le 22/11 est compris entre 50 et 80 mm mais localement il pourra atteindre 100 à 130 mm.

Zones AP	Observées du 21/11 01h au 22/11 01h	Observées du 22/11 01h au 22/11 06h	Prévus du 22/11 06h au 23/11 01h	Prévus du 22/11 01h au 23/11 01h		Prévus du 23/11 01h au 24/11 01h		Prévus du 24/11 01h au 25/11 01h
	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moy	Max local	Moy	Max local	Moyenne
Cévennes gardoises	29	0	50/80	50/80	100/130	100/130	150	Trace/3
Piémonts gardois	12	0	20/40	20/40	50	60/80	100	Trace/3
Cévennes ardéchoises	34	2	50/80	50/80	100/130	120/150	170/200	Trace/3
Piémonts ardéchois	20	3	20/40	20/40		70/100		Trace/3

Tableau 1 : Extrait du BP du 22/11/2019 à 7h25

Actuellement, pour chacun des cours d’eau surveillés, des abaques mettant en relation l’humidité du sol (calculée par la chaîne SIM de Météo France), la pluie prévue sur les 24 prochaines heures et la couleur de vigilance permettent au SPC GD de produire la vigilance. Les zones AP quoique très étendues par rapport à la taille des bassins versants (entre 1 500 et 5 300 km² sur le territoire du SPC GD) représente le niveau le plus fin d’expertise possible pour le prévisionniste météo. Cette granularité ne permet donc pas de différencier précisément les bassins versants d’une même zone AP. Cette incertitude spatiale est très limitante mais est assez réaliste en ce qui concerne les épisodes cévenols ou méditerranéens.

Enfin Météo France met à disposition des SPC la base de données SYMPO qui est initiée par les sorties brutes des modèles météorologiques et que le prévisionniste météo complète et critique au pas de temps trihoraire. Il est donc ainsi possible de disposer d’une prévision de pluie spatialisée qui est censée reprendre les valeurs du BP avec une résolution spatiale au km² et un pas de temps de 3 heures.

Cependant l’alimentation de cette base n’est pas toujours synchrone avec la production des BP et il peut y avoir des différences significatives entre ces deux sources. De plus si la résolution spatiale de SYMPO est cohérente par rapport à l’échelle des phénomènes orageux méditerranéen, sa résolution temporelle à tendance à lisser fortement les intensités de pluies qui sont une composante essentielle pour expliquer la réactivité des cours d’eau et l’ampleur des crues. Les modèles utilisés dans cette étude utilisent un pas de temps horaire.

Néanmoins, pour produire des prévisions de crues cohérentes avec la couleur de vigilance retenue, la base SYMPO est le produit de prévisions météorologiques le plus pertinent, mais ses limitations (pas de temps trihoraire et incohérence avec le BP liée à son rythme de mise à jour) nécessitent de tester sa pertinence réelle sur des épisodes significatifs de ces dernières années.

2 METHODOLOGIE RETENUE

L’étude réalisée a pour objectif, à partir de quelques situations météorologiques emblématiques, d’analyser de manière qualitative les apports d’une modélisation hydrologique à horizon 24 h pour la prise de décision du prévisionniste et de questionner la façon de communiquer l’incertitude associée.

La méthodologie retenue vise à exploiter au mieux les informations de la base SYMPO et des BP pour bénéficier à la fois de l’expertise du prévisionniste météo traduite dans le BP et d’une représentation spatio-temporelle plus fine que le BP à travers la base SYMPO.

Plusieurs SPC réalisent déjà ce type de croisement pour les modèles non spatialisés. Dans ce cas, les manipulations sont relativement simples puisqu’il s’agit d’opération de proportionnalité pour faire correspondre le cumul journalier de la pluie de bassin SYMPO au pas trihoraire avec les valeurs du BP.

Mais dans le cas des bassins cévenols, compte tenu de l’hétérogénéité spatiale des pluies il est indispensable d’utiliser un modèle spatialisé et de l’alimenter avec des images (ou grilles) de pluies observées et prévues. Le modèle utilisé pour cette étude est le modèle opérationnel du SPC GD : Alhtair. Les images des pluies observées sont les pluies ANTILOPE⁴ produites par Météo France.

La première étape a donc consisté à générer des pluies prévues en croisant les prévisions SYMPO et celles des BP. Les pluies ainsi générées ont été utilisées dans des modèle d’étude proches des modèles opérationnels et les résultats sont analysés sous deux angles :

- Quel est leur apport en temps réel pour le choix de la couleur de vigilance ?
- Sont-ils utilisables pour produire des hydrogrammes prévus à 24h qui apportent une information pertinente aux gestionnaires de crise ?

2.1 Méthode de génération des grilles de pluies prévues

Afin de bénéficier à la fois de l’expertise du BP et de la précision spatio-temporelle de SYMPO, il est nécessaire de mettre en place un traitement des pluies prévues avant de pouvoir les utiliser dans les modèles hydrologiques. Pour cela, pour un réseau⁵ donné à un instant t et pour chaque zone AP, les cumul 24 h des prévisions SYMPO sont comparées avec les valeurs BP (en prenant en compte les pluies déjà observées) pour en déduire des coefficients multiplicateurs qui seront appliqués aux pluies trihoraires SYMPO. Deux types de précipitations sont distinguées :

- Les pluies moyennes correspondant au cumul moyen SYMPO sur la zone AP sont comparées avec les valeurs inférieures et supérieures de la colonne « Moyenne » de chaque jour du BP (BPJ_{MoyInf} et BPJ_{MoySup} respectivement J1 et J2),
- et les pluies fortes correspondant au cumul SYMPO dépassé sur 10% des points de grille au sein de la zone AP sont comparées avec les valeurs inférieures et supérieures de la colonne « Max. local » de chaque jour du BP ($BPJ_{MaxLocInf}$, $BPJ_{MaxLocSup}$ respectivement J1 et J2).

Pour cela SYMPO fournit des statistiques de cumul sur la durée choisie (entre 1 et 48 h) par zone AP :

- RRt_{Sympo_J} : Cumul SYMPO moyen entre t et J1 0 h sur la zone AP.
- $RRt_{SympoQ90_J}$: Quantile 90 du cumul SYMPO entre t et J1 0 h sur la zone AP. Cette valeur correspond aux pluies fortes définies ci-dessus
- $RR24_{Sympo_J1}$: Cumul 24h SYMPO moyen pour le jour J1 (respectivement J2) sur la zone AP
- $RR24_{SympoQ90_J1}$: Quantile 90 du cumul 24 h SYMPO pour le jour J1 (respectivement J2) sur la zone AP. Cette valeur correspond aux pluies fortes définies ci-dessus

Pour le jour J, les pluies ANTILOPE, observées entre 0h et t qui doivent être soustraites aux valeurs du BP, sont récupérées :

- $RRt_{AntilopeMoy}$: Cumul Antilope moyen entre minuit et l’instant t pour le jour J sur la zone AP
- $RRt_{AntilopeQ90}$: Quantile 90 du cumul Antilope entre minuit et l’instant t pour le jour J. Cette valeur correspond au cumul de pluie qui est dépassé sur 10% des points de grille compris dans la zone AP

Ainsi pour chaque zone AP et pour chaque jour du BP des coefficients inférieurs et supérieurs sont calculés pour les pluies moyennes et fortes selon les équations 1 à 8 ci-dessous :

- Pour J :

$$\begin{aligned} \circ \text{ Si : } BPJ_{MoyInf} > RRt_{AntilopeMoy}, C_{J_{MoyInf}} &= \frac{BPJ_{MoyInf} - RRt_{AntilopeMoy}}{RRt_{Sympo_J}}, \\ \text{sinon } C_{J_{MoyInf}} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

⁴ Météo-France produit plusieurs lames d’eau ANTILOPE par fusion des données radar et des pluviomètres. La lame d’eau utilisé dans cette étude est ANTILOPE J1 qui est produite à J+1 intègre le maximum de données observées. Sa résolution spatiale est de 800 m et son pas de temps est horaire.

⁵ En météorologie, un réseau est l’ensemble des données d’entrée d’un modèle disponibles à un instant donné pour lancer un calcul. Dans cet article, un réseau correspond à l’ensemble des données de pluies ANTILOPE et des prévisions SYMPO et des BP à un instant t pour servir de données d’entrée aux modèles hydrologiques.

$$\circ \text{ Si : } BPJ_{MoySup} > RRt_{AntilopeMoy}, CJ_{MoySup} = \frac{BPJ_{MoySup} - RRt_{AntilopeMoy}}{RRt_{Sympo_J}}, \quad (2)$$

sinon $CJ_{MoySup} = 0$

$$\circ \text{ Si : } BPJ_{MaxLocInf} > RRt_{AntilopeQ90}, CJ_{MaxLocInf} = \frac{BPJ_{MaxLocInf} - RRt_{AntilopeQ90}}{RRt_{SympoQ90_J}}, \quad (3)$$

sinon $CJ_{MaxLocInf} = 0$

$$\circ \text{ Si : } BPJ_{MaxLocSup} > RRt_{AntilopeQ90}, CJ_{MaxLocSup} = \frac{BPJ_{MaxLocSup} - RRt_{AntilopeQ90}}{RRt_{SympoQ90_J}}, \quad (4)$$

sinon $CJ_{MaxLocSup} = 0$

• Pour J1 et J2 :

$$\circ CJ1_{MoyInf} = \frac{BPJ1_{MoyInf}}{RR24_{Sympo_J1}} \text{ (respectivement J2)} \quad (5)$$

$$\circ CJ1_{MoySup} = \frac{BPJ1_{MoySup}}{RR24_{Sympo_J1}} \text{ (respectivement J2)} \quad (6)$$

$$\circ CJ1_{MaxLocSup} = \frac{BPJ1_{MaxLocInf}}{RR24_{SympoQ90_J1}} \text{ (respectivement J2)} \quad (7)$$

$$\circ CJ1_{MaxLocSup} = \frac{BPJ1_{MaxLocInf}}{RR24_{SympoQ90_J1}} \text{ (respectivement J2)} \quad (8)$$

Pour chaque pas de temps entre l’instant t et J3 0 h, le cumul trihoraire de chaque point de grille SYMPO est multiplié par les coefficients « Moy » inférieurs et supérieurs du jour si le point de grille est dans une zone de pluies moyenne ce jour-là ou par les coefficients « MaxLoc » inférieurs et supérieurs s’il est dans une zone de fortes pluies (Figure 2).

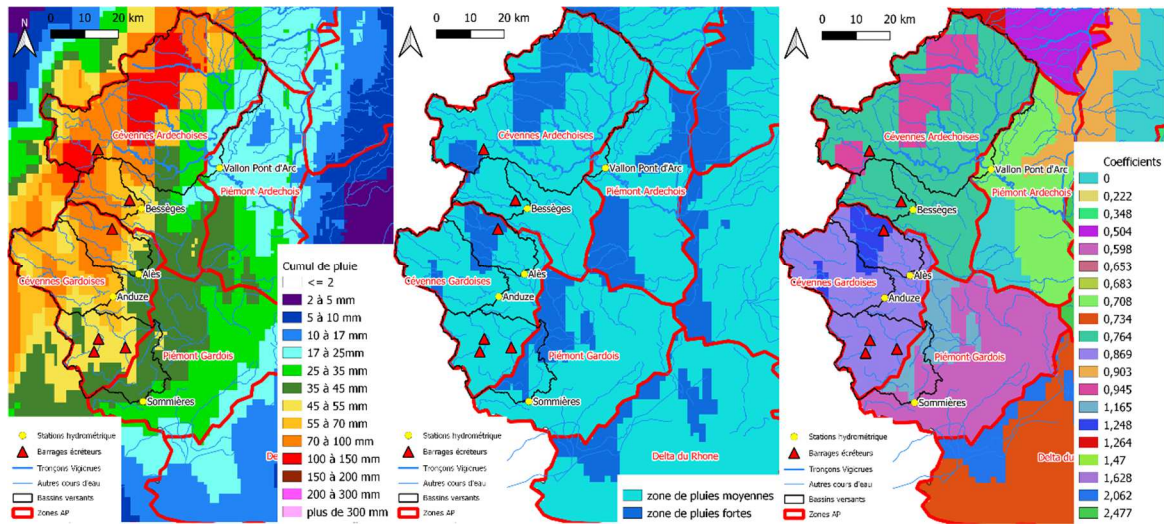


Figure 2 : Cumul SYMPO pour la journée du 22/11/2019 (réseau du 22/11/2019 à 6h UTC) à gauche, zones de pluies fortes et moyennes au centre et coefficients pour le scénario inférieur à droite

On obtient ainsi trois scénarios de pluies prévues spatialisées trihoraires qui sont concaténées aux pluies observées issue de la lame d’eau radar ANTILOPE (Figure 3) :

- Un scénario SYMPO basé sur les $RR3_{SYMPO}$ directement extraits de la base.
- Un scénario inférieur basé sur les $RR3_{SYMPO}$ pondérés par les valeurs minimums (moyennes et locales) du BP.
- Un scénario supérieur basé sur les $RR3_{SYMPO}$ pondérés par les valeurs maximums (moyennes et locales) du BP.

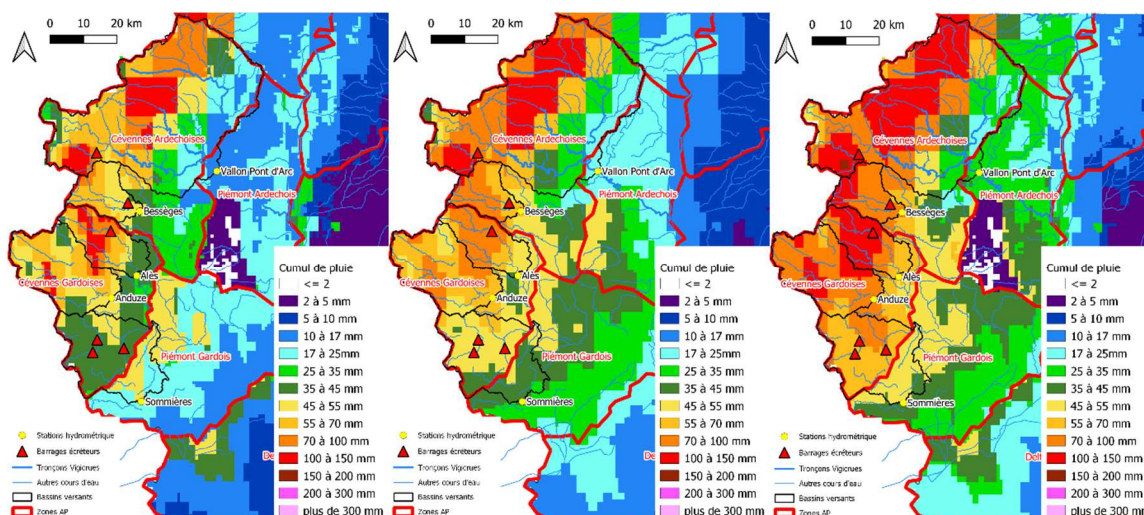


Figure 3 : Scénarios inférieur, SYMPO et supérieur pour le 22/11/2019 (réseau du 22/11/2019 à 6h TU)

Ces opérations sur les images sont effectuées par des scripts python basés sur la librairie GDAL.

2.2 Choix des épisodes et des réseaux

Pour cette étude, l’objectif n’étant pas de réaliser une analyse statistique mais d’avoir une approche qualitative des apports et limites de ce type de modélisation, 4 épisodes ont été choisis. Deux épisodes (celui du 23 novembre 2019 et celui du 2 octobre 2021) correspondent à des situations bien prévues par les modèles météo. En revanche les épisodes du 12 juin et du 19 septembre 2020 n’étaient pas facilement prévisibles à partir des sorties des modèles météo. Pour tous ces épisodes, les réseaux choisis ($t = 6h$ et $12h$ UTC) correspondent aux données disponibles aux heures de travail du prévisionniste Vigicrues pour la production de la vigilance. Pour l’épisode du 12 juin 2020, compte tenu de la chronologie de l’épisode, le réseau du 12/06/2020 0h UTC a été ajouté.

3 PRESENTATION DES EPISODES CHOISIS

3.1 L’épisode du 23 novembre 2019

Cet épisode a essentiellement concerné le relief des Cévennes. Dès le 21 novembre, l’épisode est assez bien prévu dans SYMPO en termes de cumul et de localisation et les différents réseaux restent relativement stables même s’ils sont un peu majorants (cf. Figure 4). Dans les BP les prévisions expertisées sont elles aussi relativement stables et majorantes (cf. Figure 5).

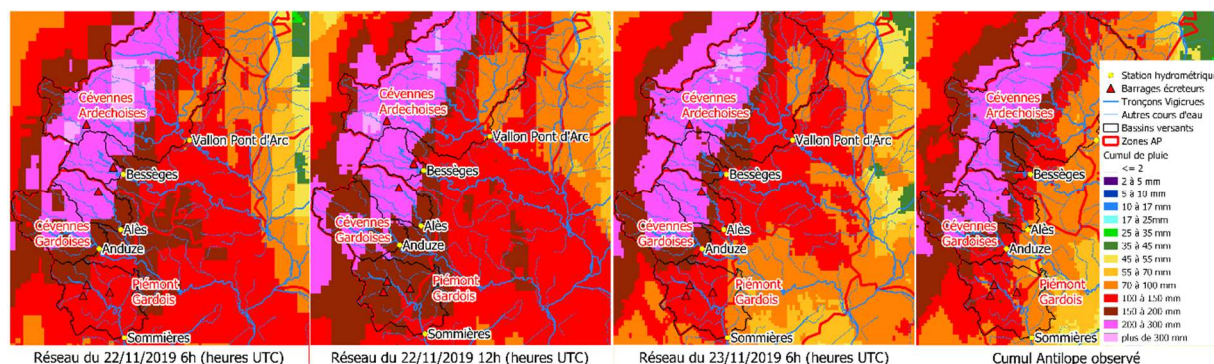


Figure 4: Evolution du cumul sur 3 jours du 22/11/2019 0h au 25/11/2019 0h (heures TU) utilisé en entrée des modèles hydrologiques (source des cumuls : ANTILOPE avant l’instant du réseau et SYMPO après)

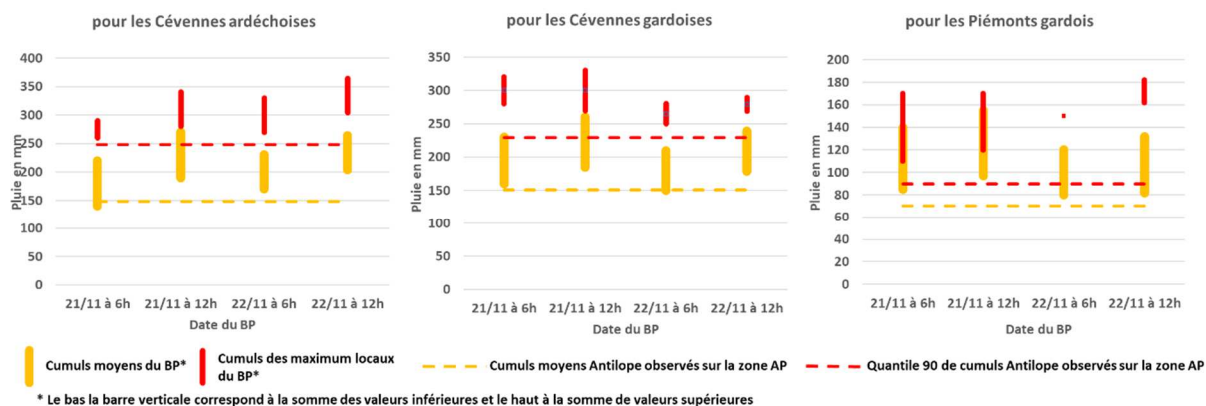
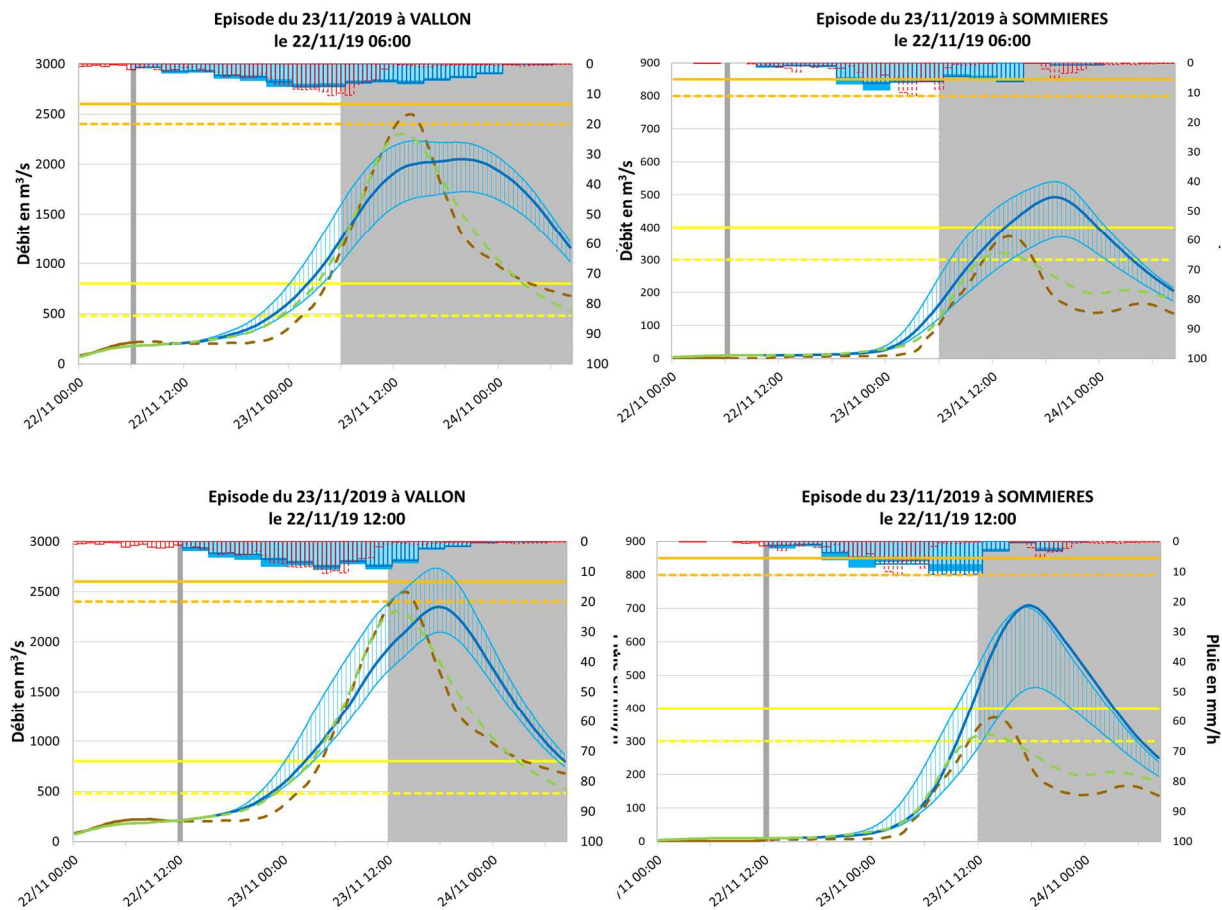


Figure 5 : Comparaison des cumuls prévus dans les BP et du cumul ANTILOPE sur 3 jours du 22/11/2019 0h au 25/11/2019 0h (heures TU)

Des exemples de prévisions obtenues avec les 3 scénarios (inférieur, SYMPO et supérieur) sont présentés dans la Figure 6 pour les 3 dernières cartes de vigilance avant le pic de crue (22/11/2019 à 6h et 12h et 23/11/2019 à 6h TU).



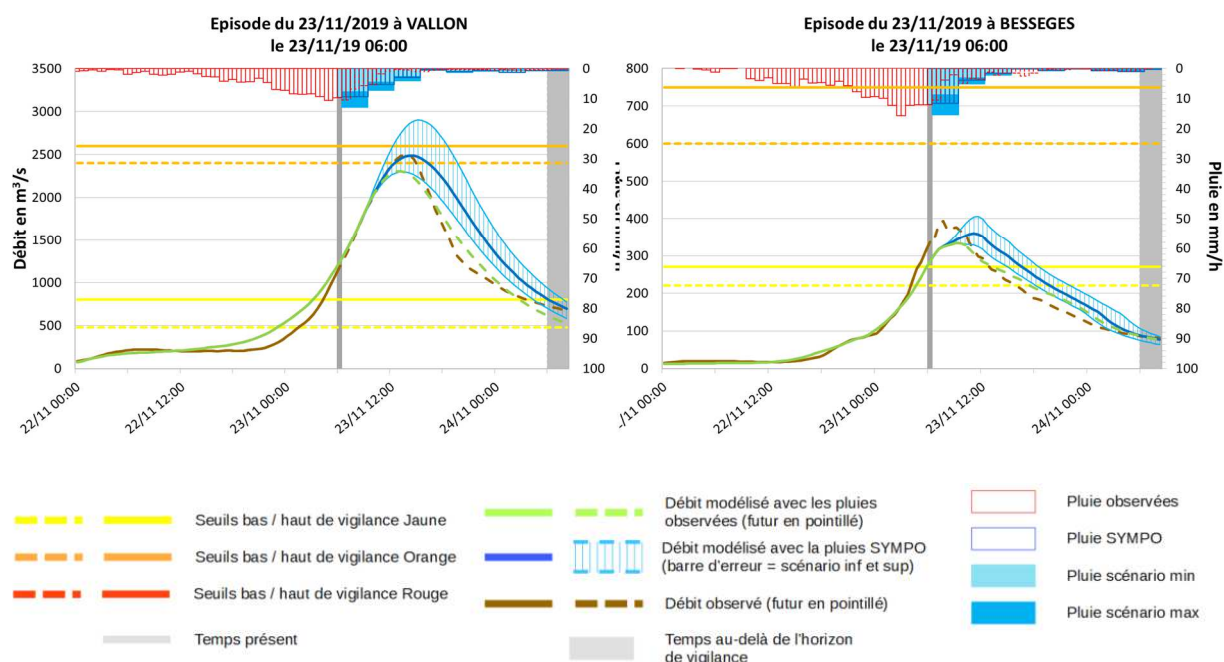
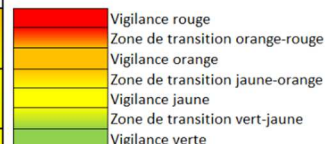


Figure 6 : Exemples de prévisions pour Vallon et Sommières du 22/11/2019 à 6h TU au 23/11/2019 à 6h TU

Le tableau 2 synthétise les vigilances qui peuvent être déduites des modélisations, les vigilances réellement produites avec les abaques et la couleur de vigilance correspondant au pic de crue observé.

Tableau 2 ; Analyse des vigilances produites et de celles déduites des modélisations pour l'épisode du 23/11/2019

Station	scénario	22/11/19 6h TU (carte de 10h HL)		22/11/19 12h TU (carte de 16h HL)		23/11/19 6h TU (carte de 10h HL)		Vigilance observée (date et heure TU du maximum)
		Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	
Ardèche à Vallon	supérieur							23/11/2019 13:30
	Sympo							
	inférieur							
Cèze à Bessèges	supérieur							23/11/2019 07:30
	Sympo							
	inférieur							
Gardon d'Alès à Alès	supérieur							23/11/2019 07:30
	Sympo							
	inférieur							
Gardon d'Anduze à Anduze	supérieur							23/11/2019 05:00
	Sympo							
	inférieur							
Vidourle à Sommières	supérieur							23/11/2019 13:30
	Sympo							
	inférieur							



Cet épisode illustre une des difficultés de la vigilance pour les petits bassins cévenols : l'impossibilité de différencier à partir des BP les réactions des bassins d'une même zone AP. Dans ce cas, les prévisions permettent d'identifier dès le 22/11/2019 à 6h que l'Ardèche est le bassin le plus susceptible de réagir et elles donnent une bonne estimation du pic de crue 24 à l'avance.

Elles permettent aussi d'éviter une surestimation pour les Gardons et la Cèze. Mais sur le Vidourle, le signal est beaucoup moins clair.

Dans une logique de production de prévision à échéance de 24h, les hydrogrammes des scénarios inférieur et supérieur permettent un affichage très pertinent pour tous les bassins sauf le Vidourle à Sommière. Mais ce problème (notamment la surestimation du 22/11/2019 à 12h) est sans doute en partie dû à une modélisation trop simpliste de l'effet des barrages écrêteurs amont.

3.2 L'épisode du 12 juin 2020

Cet épisode a essentiellement concerné le bassin d'Anduze. Il était mal prévu par les modèles météo qui

étaient très instables d’un run à l’autre et par les BP où les valeurs de pluies étaient largement sous-estimées (Figure 7 et Figure 8). L’incertitude en termes de cumul était clairement indiquée dans le commentaire du BP.

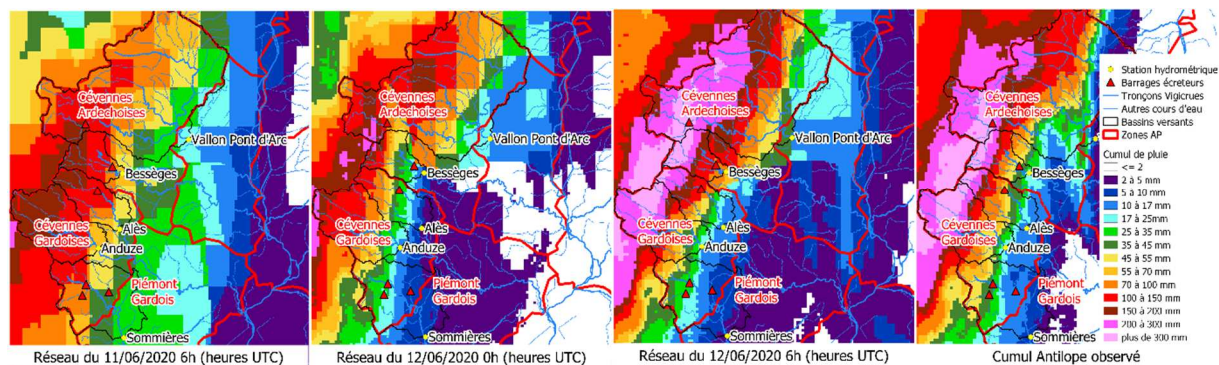


Figure 7 : Evolution du cumul sur 2 jours du 11/06/2020 0h au 13/06/2020 0h (heures TU) utilisé en entrée des modèles hydrologiques (source des cumuls : ANTILOPE avant l’instant du réseau et SYMPO après)

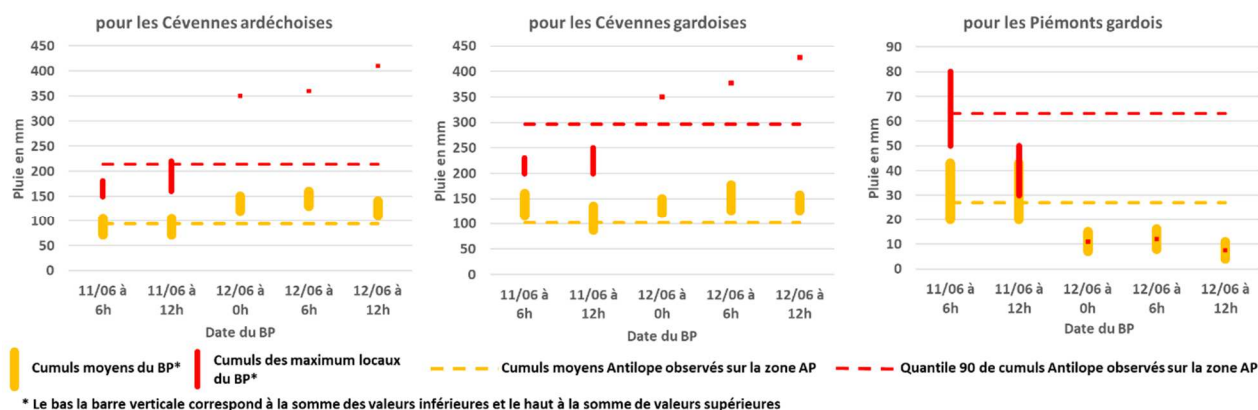
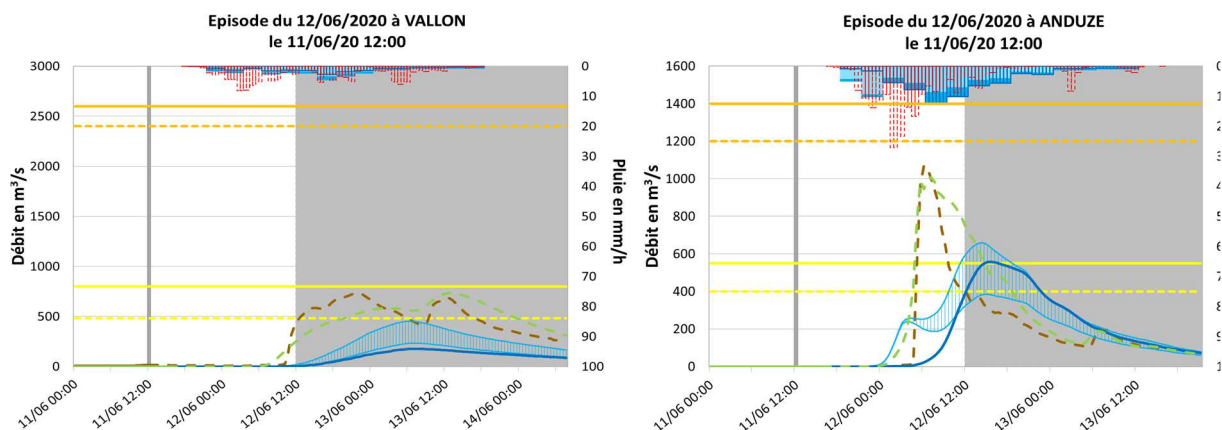


Figure 8 : Comparaison des cumuls prévus dans les BP et du cumul ANTILOPE sur 2 jours du 11/06/2020 0h au 13/06/2020 0h (heures TU)

Des exemples de prévisions obtenues avec les 3 scénarios (inférieur, SYMPO et supérieur) sont présentés ci-dessous (Figure 9). En plus des 3 dernières cartes de vigilance nominales (11/06/2020 à 6h et 12h et 12/06/2020 à 6h TU), lors de cet épisode, le prévisionniste a produit une carte d’actualisation produite le 12/06/2020 à 4h TU avant le pic de crue. Le réseau du 12/06/2020 0h a été modélisé pour correspondre aux données disponibles lors de cette production.



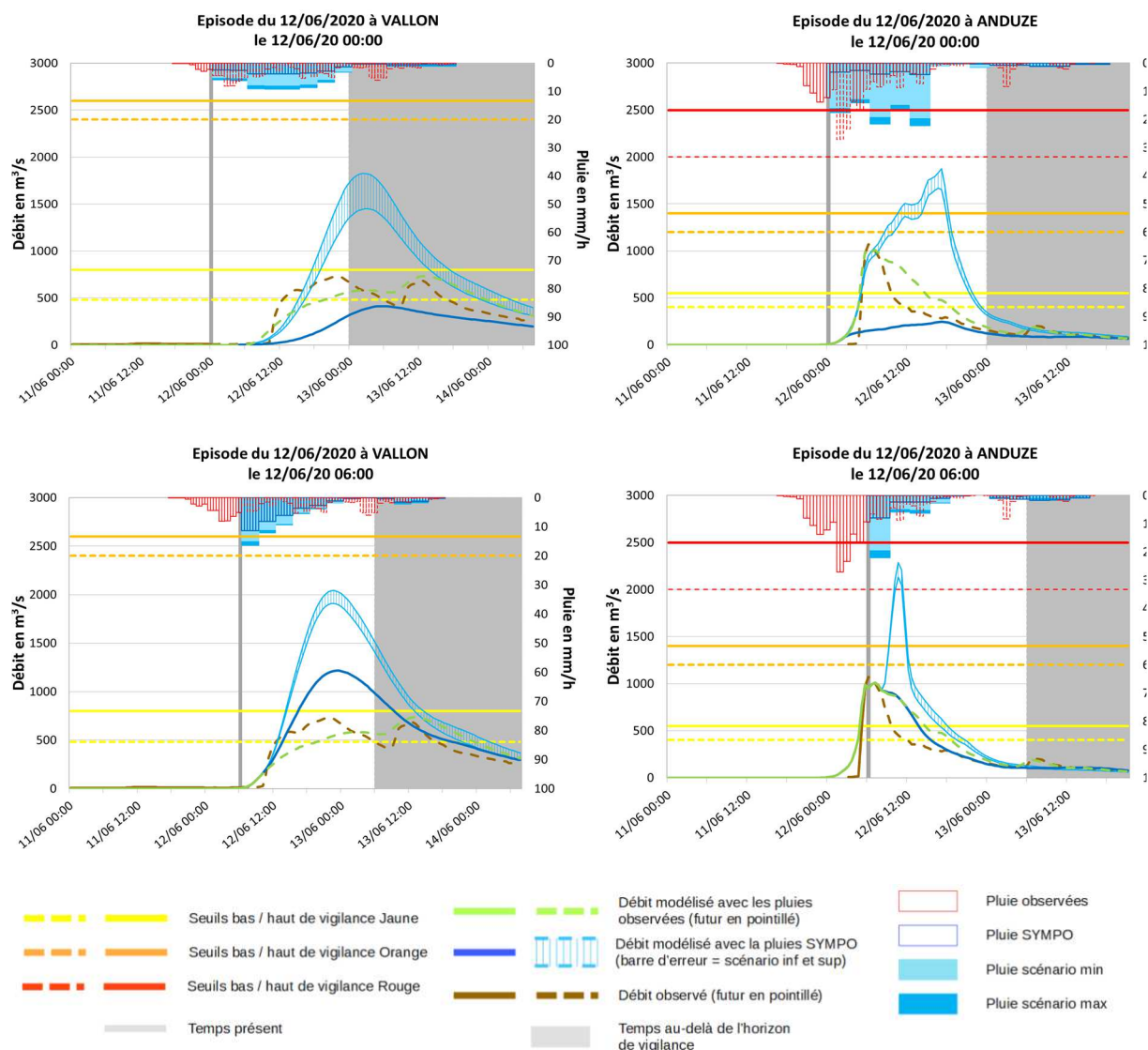


Figure 9 : Exemples de prévisions pour Vallon et Anduze du 11/06/2020 à 6h TU au 12/06/2020 à 6h TU

Le tableau 3 synthétise les vigilances qui peuvent être déduites des modélisations, les vigilances réellement produites avec les abaques et la couleur de vigilance correspondant au pic de crue observé.

Tableau 3 : Analyse des vigilances produites et de celles déduites des modélisations pour l'épisode du 11/06/2020

Station	scénario	11/06/20 6h TU (carte de 10h HL)		11/06/20 12h TU (carte de 16h HL)		12/06/20 0h TU (carte de 6h HL)		12/06/20 6h TU (carte de 10h HL)		Vigilance observée (date et heure TU du maximum)
		Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	
Ardèche à Vallon	supérieur									12/06/2020 21:30
	inférieur									
Cèze à Bessèges	supérieur									12/06/2020 06:30
	inférieur									
Gardon d'Alès à Alès	supérieur									12/06/2020 18:00
	inférieur									
Gardon d'Anduze à Anduze	supérieur									12/06/2020 06:00
	inférieur									
Vidourle à Sommières	supérieur									12/06/2020 06:30
	inférieur									

Vigilance rouge
Zone de transition orange-rouge
Vigilance orange
Zone de transition jaune-orange
Vigilance jaune
Zone de transition vert-jaune
Vigilance verte

Lors de cet épisode l'apport de la prévision à 24h pour le choix des couleurs de vigilance est beaucoup plus limité que pour le 1^{er} épisode. Il permet néanmoins lors des deux premiers réseaux d'identifier que le bassin d'Anduze est le plus concerné et donne un signal pouvant permettre le passage en jaune.

En revanche il met en évidence un problème important : le risque de très forte surestimation en cours d'épisode. C'est le cas pour les modélisations du 12/06/2020 à 0h et 6h sur Anduze. Ce problème est en partie lié au fait qu'il est difficile au plus fort de l'épisode pluvieux d'actualiser correctement le reste à tomber dans les BP compte tenu des intensités et de l'hétérogénéité des pluies. Ce sont les cumuls locaux du BP et leur application sur la zone de pluie supérieure au quantile 90 de SYMPO qui impactent fortement les résultats.

Dans ce cas la production d'hydrogrammes prévus à 24 h reste délicate en termes de chronologie comme de maximum attendu ; L'incertitude à affecter à ces prévisions est très difficile à estimer. Pour Anduze le 12/06 à 12h TU, par exemple, l'enveloppe des 3 scénarios n'encadre pas l'hydrogramme observé, ni en chronologie, ni en amplitude.

3.3 L'épisode du 19 septembre 2020

Cet épisode qui a concerné essentiellement le bassin d'Anduze a été très mal prévu par les modèles météo. Jusqu'au 19 septembre, aucun signal clair n'était perceptible et même ce jour-là les prévisions, à 6h TU, de la base SYMPO comme des BP sont restées très minorantes (Figure 10 et Figure 11).

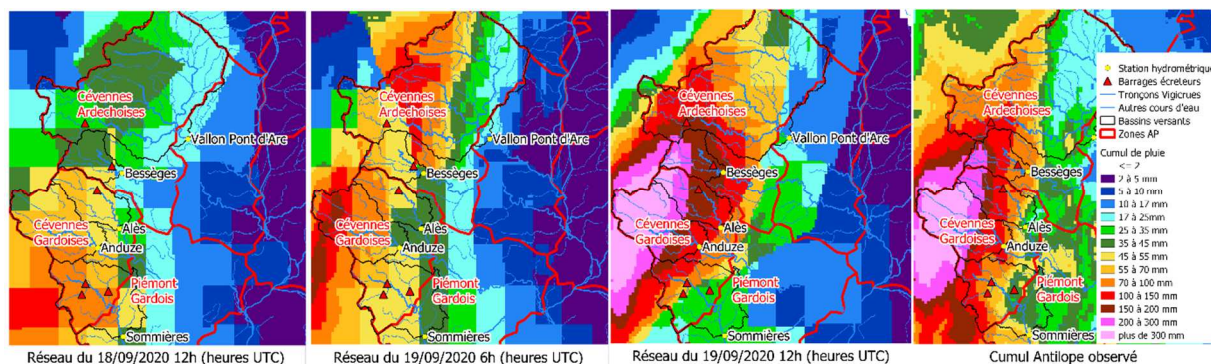


Figure 10: Evolution du cumul sur un jour du 19/09/2020 0h au 20/09/2020 0h (heures TU utilisé en entrée des modèles hydrologiques (source des cumuls : ANTILOPE avant l'instant du réseau et SYMPO après)

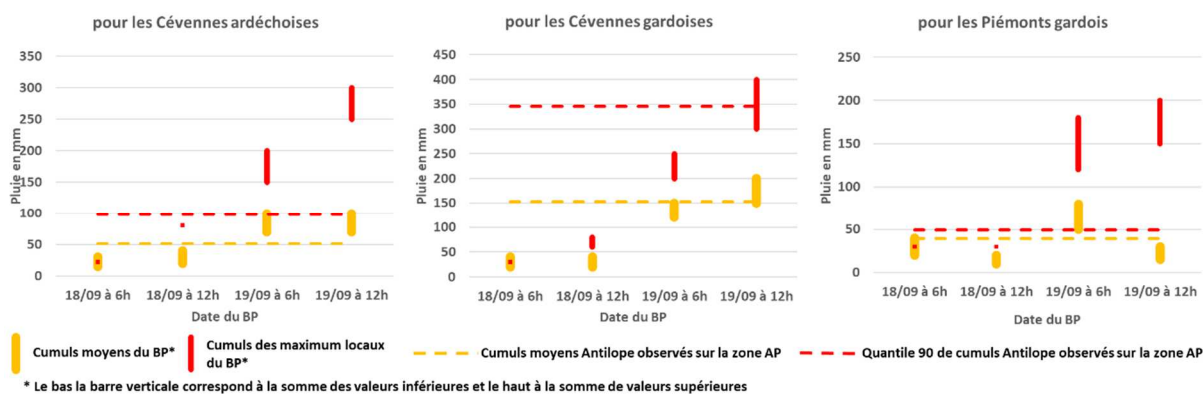


Figure 11 : Comparaison des cumuls prévus dans les BP et du cumul ANTILOPE sur un jour du 19/09/2020 0h au 20/09/2020 0h (heures TU)

Des exemples de prévisions obtenues avec les 3 scénarios (inférieur, SYMPO et supérieur) sont présentés ci-dessous (Figure 12). Elles correspondent aux 3 dernières cartes de vigilance produites avant le pic de crue.

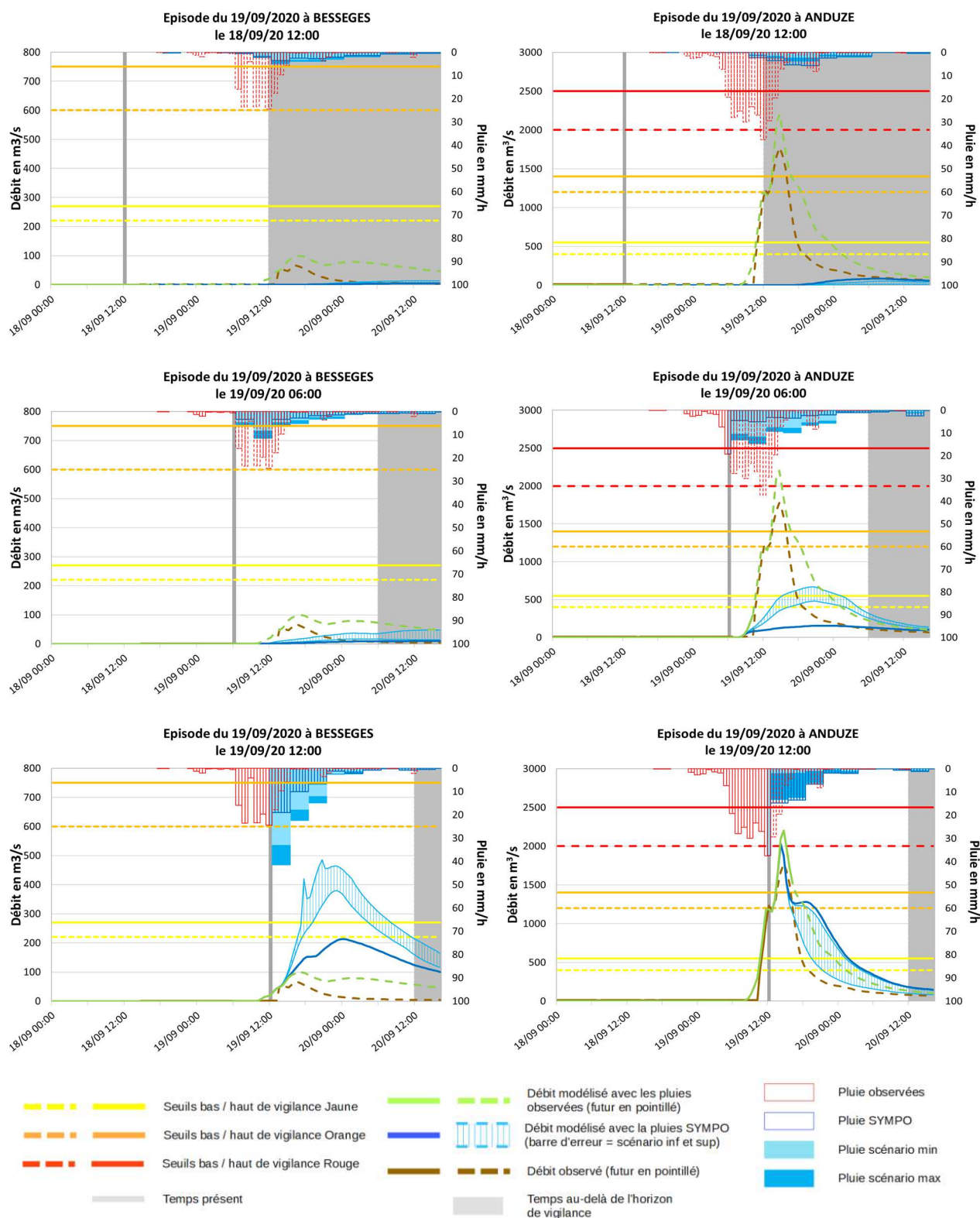
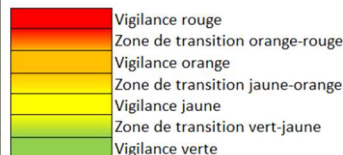


Figure 12: Exemples de prévisions pour Bessèges et Anduze du 18/09/2020 à 12h TU au 19/09/2020 à 12h TU

Le tableau 4 synthétise les vigilances qui peuvent être déduites des modélisations, les vigilances réellement produites avec les abaques et la couleur de vigilance correspondant au pic de crue observé.

Tableau 4 : Analyse des vigilances produites et de celles déduites des modélisations pour l'épisode du 19/09/2020

Station	scénario	18/09/20 12h TU (carte de 16h HL)		19/09/20 6h TU (carte de 10h HL)		19/09/20 12h TU (carte de 16h HL)		Vigilance observée (date et heure TU du maximum)
		Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	
Ardèche à Vallon	supérieur							20/09/2020 18:00
	Sympo							
	inférieur							
Cèze à Bessèges	supérieur							19/09/2020 16:00
	Sympo							
	inférieur							
Gardon d'Alès à Alès	supérieur							19/09/2020 19:00
	Sympo							
	inférieur							
Gardon d'Anduze à Anduze	supérieur							19/09/2020 14:00
	Sympo							
	inférieur							
Vidourle à Sommières	supérieur							20/09/2020 05:00
	Sympo							
	inférieur							



L'absence de bonnes prévisions météo a évidemment un impact direct sur les résultats des modélisations hydrologiques qui sous-estiment les crues jusqu'au 19/09/2020 12h. Néanmoins, elles permettent dès le 19/09/2020 06h de confirmer que le bassin de le plus concerné est celui d'Anduze. Mais même à ce moment-là les pluies restent très sous-estimées dans les BP comme dans SYMPO.

Les fortes surestimations du réseau du 19/09/2020 12h ont des causes différentes :

- Pour Anduze, elle est largement liée au calage du modèle qui même avec les pluies observées surestime la crue.
- Pour Bessèges, les pluies prévues dans SYMPO et les BP sont très majorantes par rapport aux pluies réelles. Les maximums locaux ont été particulièrement surestimés. La Figure 13 montre que l'ensemble du bassin de Bessèges était en zone de forte pluie sur laquelle est appliqué un coefficient de plus de 2. Cela conduit à une nette surproduction par rapport aux pluies observées
- Pour Alès on retrouve les mêmes causes que pour Bessèges mais le barrage écrêteur de crue de Sainte Cécile qui intercepte la partie du bassin concerné par les plus forts cumuls stocke une partie conséquente de la crue et limite la surestimation.

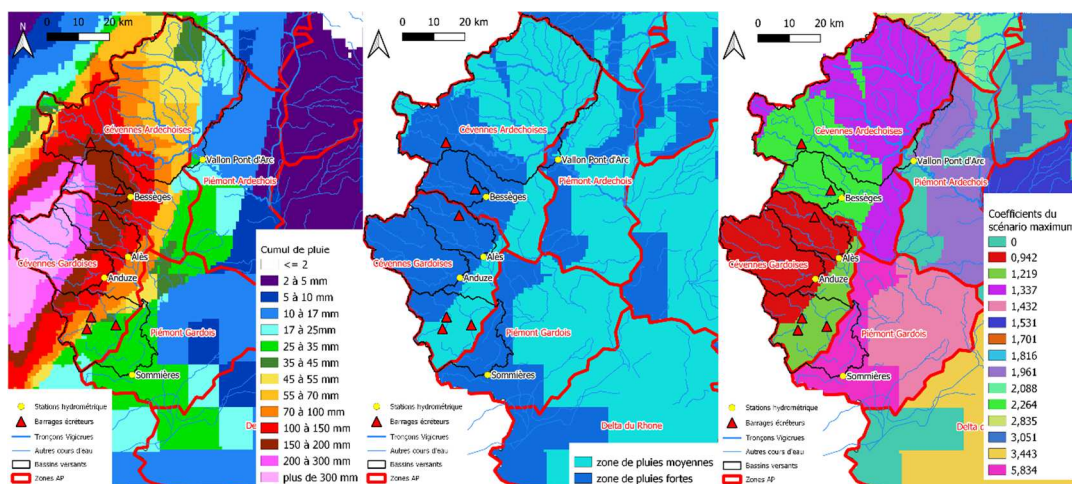


Figure 13 : Cumul SYMPO pour la journée du 19/09/2020 (réseau du 19/09/2020 à 12h TUT) à gauche, zones de pluies fortes et moyennes au centre et coefficients pour le scénario supérieur à droite

Lors de cet épisode, compte tenu de l'absence de signal pluvieux dans les sorties de modèles météo, les modélisations n'auraient été d'aucune aide pour la production de la vigilance du 18/09/2020 à 12h.

Lors de la production du 19/09/2020 à 6h, le prévisionniste Vigicrues est passé en orange sur la base des cumuls de pluies déjà tombées et sur l'information transmise par le prévisionniste météo du blocage des pluies. Mais les prévisions disponibles à ce moment-là dans le BP ou dans SYMPO et produites quelques heures avant, ne voyaient toujours pas le déclenchement de ce phénomène. Il n'aurait donc pas

été possible de produire un hydrogramme prévu à 24h cohérent avec la vigilance orange (ou jaune) sur la base de modélisations.

3.4 L'épisode du 3 octobre 2021

Cet épisode est plutôt bien anticipé par les modèles météo mais les intensités fortes qui sont tombées sur le bassin de Bessèges le 03/10 après-midi, n'ont pas bien été prévues avant le 3/10 à 12 h (Figure 14 et Figure 15).

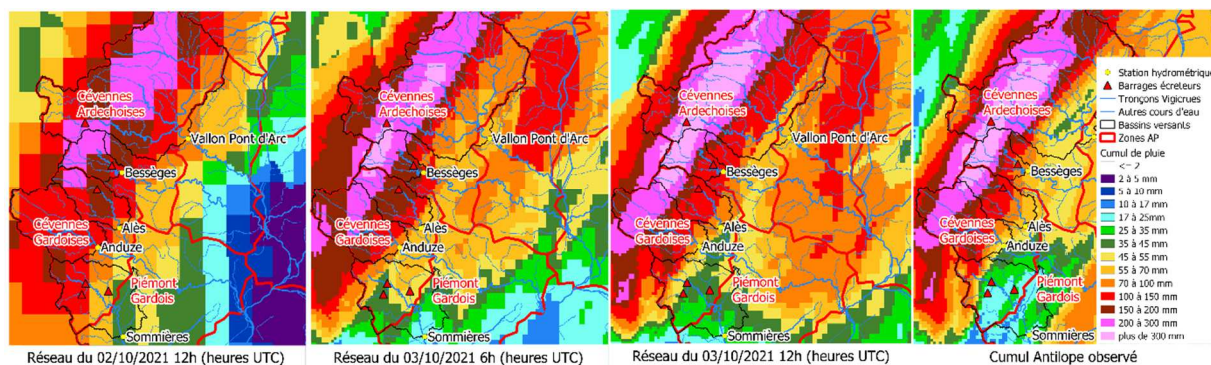


Figure 14: Evolution du cumul sur un jour du 03/10/2021 0h au 04/10/2021 0h (heures TU utilisé en entrée des modèles hydrologiques (source des cumuls : ANTILOPE avant l'instant du réseau et SYMPO après))

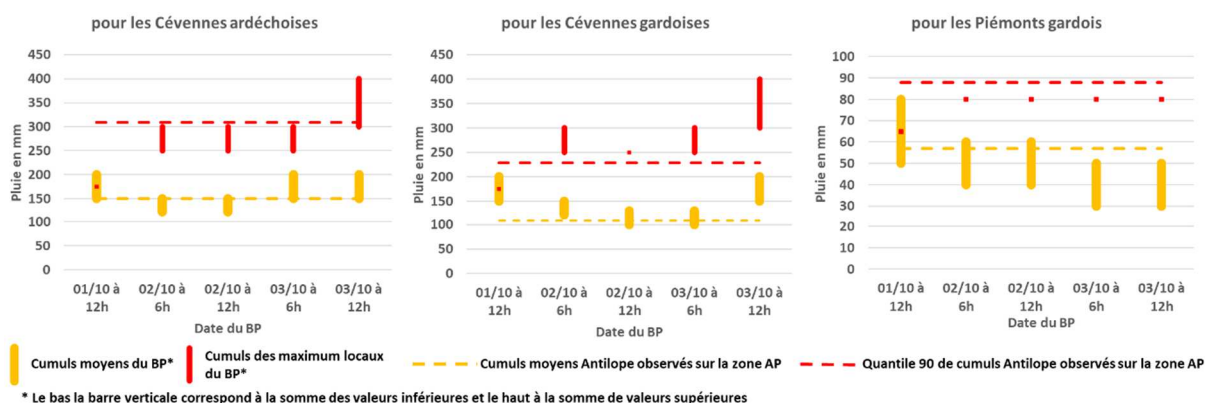
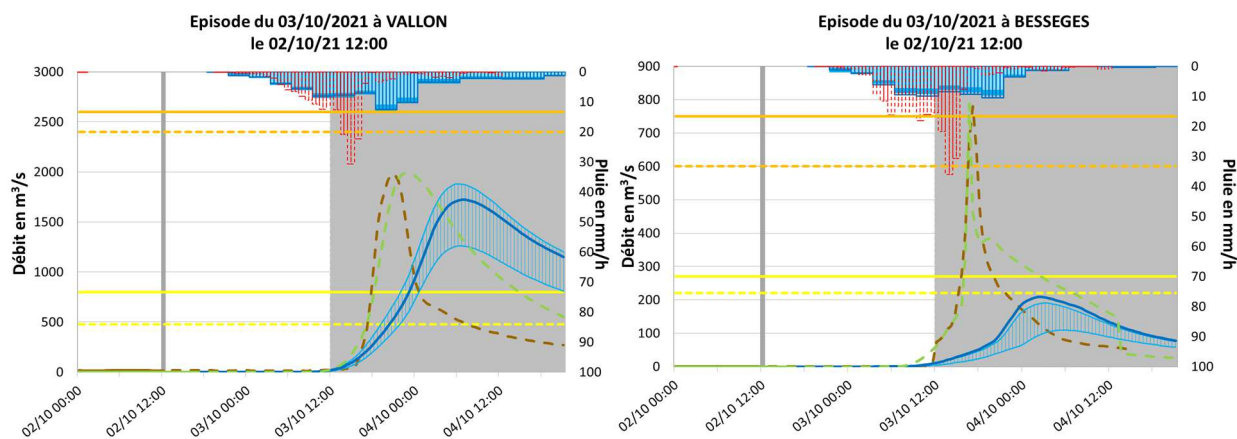


Figure 15 : Comparaison des cumuls prévus dans les BP et du cumul ANTILOPE du 03/10/2021 0h au 04/10/2021 0h (heures TU)

Des exemples de prévisions obtenues avec les 3 scénarios (inférieur, SYMPO et supérieur) sont présentés ci-dessous (Figure 16). Elles correspondent au 3 dernières cartes de vigilance produites avant le pic de crue.



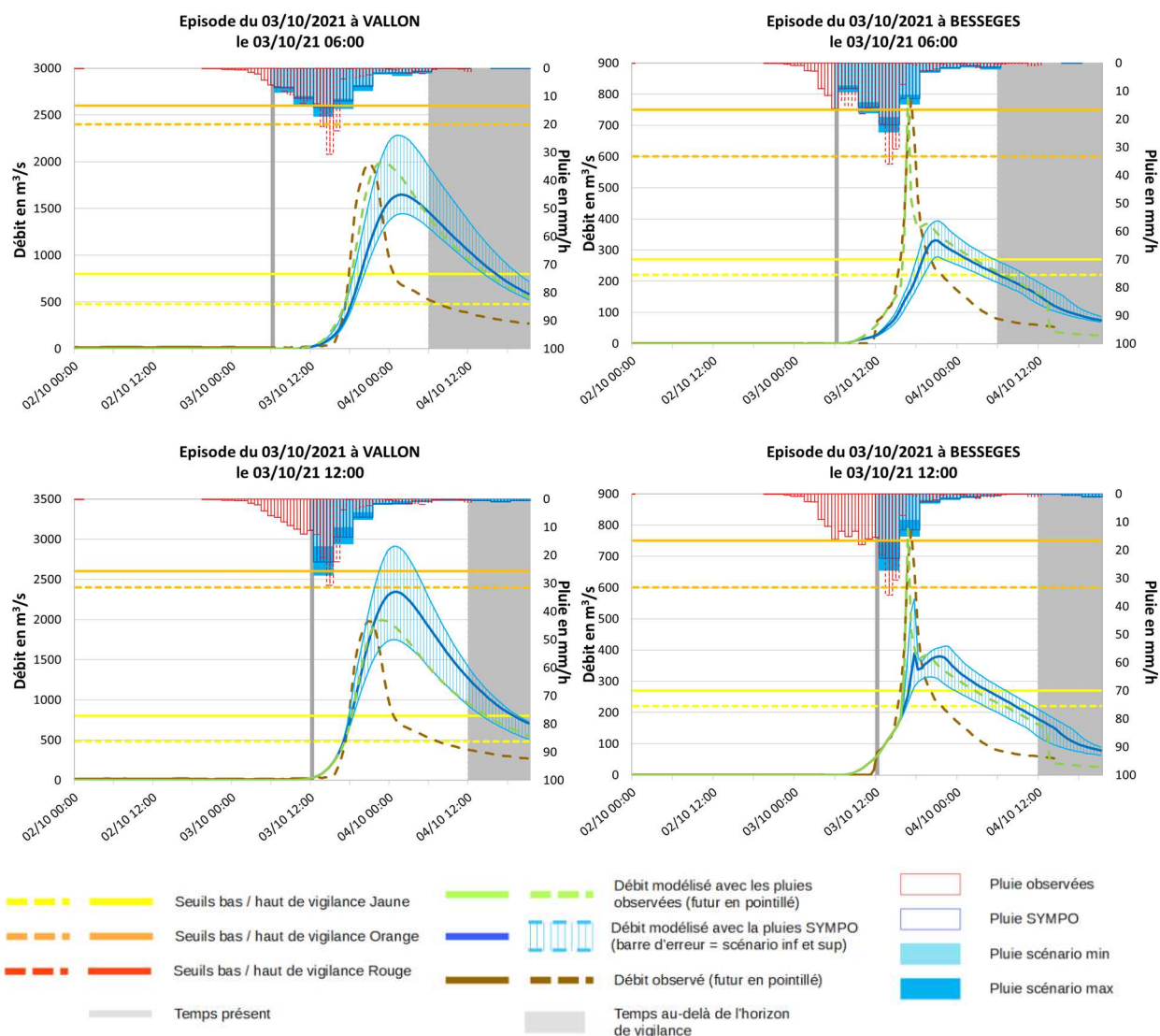


Figure 16 : Prévisions du 03/10/2021 à 6h TU et débits observés

Le tableau 5 synthétise les vigilances qui peuvent être déduites des modélisations, les vigilances réellement produites avec les abaques et la couleur de vigilance correspondant au pic de crue observé.

Tableau 5 : Analyse des vigilances produites et de celles déduites des modélisations pour l'épisode du 19/09/2020

Station	scénario	02/10/21 12h TU (carte de 16h HL)		03/10/21 6h TU (carte de 10h HL)		03/10/21 12h TU (carte de 16h HL)		Vigilance observée (date et heure TU du maximum)
		Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	Vigilance déduite des modélisations	Vigilance produite	
Ardèche à Vallon	supérieur							03/10/2021 20:30
	Sympo							
	inférieur							
Cèze à Bessèges	supérieur							03/10/2021 17:00
	Sympo							
	inférieur							
Gardon d'Alès à Alès	supérieur							03/10/2021 19:30
	Sympo							
	inférieur							
Gardon d'Anduze à Anduze	supérieur							03/10/2021 17:00
	Sympo							
	inférieur							
Vidourle à Sommières	supérieur							04/10/2021 12:00
	Sympo							
	inférieur							

Pour la carte du 02/10/2021 à 12h, les modélisations permettent une bonne estimation des vigilances à

part sur Bessèges. Lors des cartes suivantes, leur stabilité permet de conforter le choix.

Pour Bessèges, la sous-estimation et le manque de réactivité sont en grande partie dû à la mauvaise représentation des intensités de pluies. Dans la base de données SYMPO actuelles les pluies prévues sont trihoraires : elles lissent donc fortement les intensités. Le passage prochain à la base ALPHA en remplacement de SYMPO permettra de disposer de prévisions horaires. Cela pourra contribuer à limiter ce problème dans la mesure où les intensités sont bien prévues (ce qui n'est pas forcément simple).

Pour Vallon, la forme et la surface du bassins versant atténuent fortement cet aspect et la prévision est très correcte. Lors de cet épisode, la production d'hydrogrammes à 24 h sur la base des modélisations aurait été relativement simple (à part sur Bessèges) et aurait apporté une information pertinente en termes de chronologie et d'amplitude des crues pour les utilisateurs.

4 CONCLUSION

Cette étude est trop limitée pour tirer des conclusions pertinentes en termes de statistiques. Néanmoins ces 4 épisodes sont représentatifs de situations typiques vécues par les prévisionnistes :

- Un épisode bien prévu par les modèles météo : le 23/11/2019
- Une situation avec des modèles météo très instables et une sous-estimation des prévisions : le 12/06/2020
- Un épisode pas du tout prévu par les modèles météo : le 19/09/2020
- Un épisode globalement bien prévu mais avec une phase intense sous-estimée : le 03/10/2021

Dans ces 4 cas, la méthode de croisement des informations SYMPO et BP proposée permet de garantir la cohérence entre la meilleure information spatio-temporelle disponible et l'expertise du prévisionniste météo présente dans le BP, qui est la source officielle de décision pour la vigilance. Cette méthode s'est avérée simple et rapide en termes de calcul et est donc compatible avec une utilisation opérationnelle en temps réel.

Pour les 4 épisodes, la modélisation à horizon de 24 h apporte des informations (que ce soit en termes de chronologie, d'amplitude ou même d'incertitude) utiles au prévisionniste de crue. En particulier elle permet d'identifier l'impact des incertitudes indiquées dans le BP. Mais ce n'est malheureusement pas la seule incertitude comme le montre les épisodes de 2020 et de 2021. Les pluies réelles peuvent souvent s'écarter de la fourchette d'incertitude du BP. Si cette méthode permet de bien qualifier l'impact des incertitudes que le prévisionniste météo affecte au scénario qu'il privilégie, elle n'est pas représentative de l'ensemble des possibles. La prévision d'ensemble semble être une piste intéressante pour qualifier cette incertitude. Les rejeux effectués à partir de la chaîne Chrome par le SPC GD pour les épisodes des années 2008-2014 avait montré l'intérêt de cette approche même si la prise de décision sur la base de données probabilité reste complexe. Météo-France et le SCHAPI travaillent à la mise à disposition de ces prévisions pour les SPC. On peut donc espérer tester ces hypothèses dans les années à venir.

Un autre produit à tester pourrait être la méthode des analogues qui est aujourd'hui utilisé par la CNR sur ce secteur. Mais elle l'utilise surtout pour produire des prévisions d'apport au Rhône sur l'aval des bassins. Le SPC GD n'a jamais testé ce produit. La disponibilité des analogues en continu au SPC Loire Allier Cher Indre et au SPC Alpes de Nord, pourra faciliter ce test.

Il n'en reste pas moins qu'en cas de forte incertitude (comme par exemple dans le cas des épisodes de 2020) l'ampleur de ces incertitudes sera complexe à communiquer aux utilisateurs et aux gestionnaires de crise. Le mode de représentation actuel de Vigicrues (barres à moustaches) conduirait à afficher à 24 h une incertitude s'étendant sur une telle amplitude qu'elle « écraserait » visuellement les prévisions à court terme qui sont pourtant les plus utiles en gestion de crise.

Enfin, même si ce n'était pas l'objectif de l'article, pour tous les épisodes, hormis celui du 19/09/2020, un signal indiquant un épisode significatif sur au moins un des bassins était visible dans les résultats des modélisations hydrologiques au moins 48 h à l'avance. Cette information permet au prévisionniste de crue d'estimer un peu mieux l'instabilité éventuelle des prévisions météorologiques et son impact hydrologique. Elle est aussi très utile pour faciliter l'organisation d'un fonctionnement du SPC en continu (H24) selon l'adage bien connu : « un prévisionniste averti en vaut deux ».